

U 187 + příl.

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci,  
nositelka Řádu práce  
Fakulta strojního inženýrství  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ FOREM ZE SÁDROVÝCH SMĚSÍ  
POUŽÍVANÝCH PŘI VÝROBĚ PŘESNÝCH ODLITKŮ

Kandidátská disertační práce

Číslo a název vědního oboru  
23 - 07 - 9

Strojírenská technologie

Aspirant: Ing. Iva N o v á

Školitel: Doc. Ing. Zdeněk Holubec, CSc

Liberec, červenec 1985

|                                                                                                  |                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| OBSAH                                                                                            | str                                                                        | 2  |
| Seznam symbolů                                                                                   |                                                                            | 5  |
| <u>Úvod</u>                                                                                      |                                                                            | 8  |
| a) Přehled o současném stavu problematiky tepelného zpracování a výroby forem ze sádrových směsí |                                                                            | 9  |
| b) Cíl disertační práce                                                                          |                                                                            | 19 |
| 1.0                                                                                              | <u>Charakteristika forem ze sádrových formovacích směsí</u>                | 21 |
| 1.1                                                                                              | Fyzikální vlastnosti sádry                                                 | 21 |
| 1.1.1                                                                                            | Rozdělení sádry                                                            | 25 |
| 1.1.2                                                                                            | Vlastnosti sádry pro slévárenské účely                                     | 26 |
| 1.1.3                                                                                            | Tuhnutí a tvrdnutí sádry                                                   | 28 |
| 1.2                                                                                              | Sádrové směsi                                                              | 31 |
| 1.3                                                                                              | Formy ze sádrových směsí                                                   | 36 |
| 1.3.1                                                                                            | Výroba forem ze sádrových směsí                                            | 37 |
| 2.0                                                                                              | <u>Zákonitosti tepelného zpracování forem ze sádrových směsí</u>           | 39 |
| 2.1                                                                                              | Vlhkost sádrové formy                                                      | 39 |
| 2.1.1                                                                                            | Vazby vody v sádrové formě                                                 | 40 |
| 2.2                                                                                              | Vliv tepelného zpracování na vlastnosti forem ze sádrových směsí           | 42 |
| 2.2.1                                                                                            | Pohyb vody tepelně zpracovávanou formou                                    | 48 |
| 2.2.2                                                                                            | Odpařování vody s povrchu formy ze sádrové směsi                           | 49 |
| 2.3                                                                                              | Zákonitosti přenosu tepla při tepelném zpracování forem ze sádrových směsí | 50 |
| 2.3.1                                                                                            | Přenos tepla mezi formou a sušicí atmosférou                               | 50 |
| 2.3.2                                                                                            | Přenos tepla vedením v sádrové formě                                       | 51 |
| 2.4                                                                                              | Fyzikálně chemický popis tepelného zpracování sádrových forem              | 52 |
| 2.4.1                                                                                            | Přenos vody při tepelném zpracování sádrových forem                        | 54 |
| 2.4.2                                                                                            | Termodynamický popis tepelného zpracování sádrových forem                  | 55 |
| 3.0                                                                                              | <u>Vlastnosti vlhkého vzduchu v procesu sušení sádrových forem</u>         | 59 |
| 3.1                                                                                              | Fyzikální vlastnosti vzduchu                                               | 60 |
| 3.1.1                                                                                            | Diagram vlhkého vzduchu                                                    | 61 |
| 3.1.2                                                                                            | Změny stavu vzduchu v procesu sušení                                       | 61 |



|         |                                                                                                            |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2     | Princip činnosti vzduchové sušárny                                                                         | 63  |
| 4.0     | <u>Odlitky získané litím do forem ze sádrových směsí</u>                                                   | 66  |
| 5.0     | <u>Experimentální sledování tepelného zpracování forem ze sádrových směsí</u>                              | 68  |
| 5.1     | Návrh metodiky sledování tepelného zpracování sádrových forem v laboratorních podmínkách                   | 68  |
| 5.2     | Návrh měřicího zařízení pro sledování tepelného zpracování sádrových forem                                 | 71  |
| 5.2.1   | Požadavky na měřicí zařízení                                                                               | 71  |
| 5.2.2   | Popis měřicího zařízení                                                                                    | 72  |
| 5.2.3   | Měření teploty                                                                                             | 73  |
| 5.2.4   | Postup při termogravimetrickém měření vzorků sádrových forem                                               | 76  |
| 5.2.5   | Příprava vzorků pro termogravimetrická měření                                                              | 78  |
| 5.3     | Přehled termogravimetrických měření vzorků při sledování tepelného zpracování sádrových forem              | 80  |
| 5.3.1   | Vyhodnocení naměřených hodnot                                                                              | 81  |
| 5.3.1.1 | Závislost poměrného zbytku hmotnosti vzorku na teplotě                                                     | 81  |
| 5.3.1.2 | Vyhodnocení rozdílů teplot mezi povrchem a středem vzorku v závislosti na čase                             | 85  |
| 5.3.2   | Shrnutí výsledků a jejich praktické využití v technické praxi                                              | 89  |
| 5.3.3   | Termogravimetrické měření vzorků ze sádrových směsí prováděná na VŠCHT Praha                               | 91  |
| 5.4     | Porovnání získaných výsledků měření na VŠST a VŠCHT                                                        | 92  |
| 5.5     | Zhodnocení navrženého postupu termogravimetrických měření vzorků forem při jejich tepelném zpracování      | 93  |
| 5.6     | Sledování vlivu tvarového a velikostního činitele sádrových forem při jejich tepelném zpracování           | 94  |
| 5.6.1   | Návrh nomogramu pro tepelné zpracování forem ze sádrových směsí nenapěněných                               | 97  |
| 5.6.1.1 | Příklady odečítání z nomogramu                                                                             | 98  |
| 5.6.2   | Shrnutí výsledků sledování vlivu tvarového a velikostního činitele sádrových forem                         | 100 |
| 6.0     | <u>Výpočtové a experimentální metody použité při sledování tepelného zpracování sádrových forem</u>        | 103 |
| 6.1     | Aplikace fyzikálně chemických výpočtů pro reakce probíhající v sádrové formě při jejím tepelném zpracování | 103 |



|       |                                                                                                             |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1.1 | Aplikace výpočtu pro alabastrovou sádku                                                                     | 106 |
| 6.1.2 | Aplikace výpočtu pro stavební sádku                                                                         | 108 |
| 6.1.3 | Zhodnocení výpočtů                                                                                          | 109 |
| 6.2   | Experimentální stanovení fází soustavy $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$                                 | 112 |
| 6.2.1 | Druhy hodnocených sádkových směsí                                                                           | 114 |
| 6.2.2 | Výsledky rozborů sledovaných sádkových směsí                                                                | 114 |
| 6.2.3 | Zhodnocení výsledků rozboru sádkových směsí                                                                 | 116 |
| 7.0   | <u>Návrh a ověření režimu tepelného zpracování sádkových forem a zhodnocení získaných odlitků</u>           | 118 |
| 7.1   | Výroba a tepelné zpracování sádkových forem pro zhotovení odlitků tvaru desky                               | 118 |
| 7.1.1 | Režim tepelného zpracování sádkových forem                                                                  | 120 |
| 7.1.2 | Rozměrová a tvarová přesnost získaných odlitků a drsnost jejich povrchu                                     | 122 |
| 7.2   | Výroba a tepelné zpracování forem ze sádkových směsí pro výrobu odlitků používaných v moderní radiotechnice | 123 |
| 7.2.1 | Příprava forem, jader a jejich tepelné zpracování                                                           | 124 |
| 7.3   | Zhodnocení režimů tepelného zpracování sádkových forem a získaných odlitků                                  | 126 |
| 8.0   | <u>Diskuse výsledků</u>                                                                                     | 128 |
| 9.0   | <u>Závěr</u>                                                                                                | 133 |
| 10.0  | <u>Seznam použité literatury</u>                                                                            | 138 |



# Seznam symbolů

|                    |                                                                         |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $A_n$              | - konstanta                                                             |
| $C$                | - koncentrace                                                           |
| $C_1$              | - průměrná koncentrace vody v sádrové formě                             |
| $C_2$              | - průměrná koncentrace vody v sušicí atmosféře                          |
| $C_p$              | - tepelná kapacita $/J.mol^{-1}.K^{-1}/$                                |
| $\Delta G$         | - změna Gibbsovy energie $/J/$                                          |
| $\Delta H_{298}^0$ | - změna entalpie za standardních podmínek $/J/$                         |
| $I_m$              | - intenzita toku vody vlivem hmotnostního spádu $/kg.m^{-2}.s^{-1}/$    |
| $I_s$              | - intenzita tepelného zpracování sádrových dílů $/kg.m^{-2}.s^{-1}/$    |
| $I_t$              | - intenzita toku vody vlivem teplotního spádu $/kg.m^{-2}.s^{-1}/$      |
| $I_w$              | - intenzita toku vody v sádrovém dílu $/kg.m^{-2}.s^{-1}/$              |
| $M_{sv}$           | - množství suchého vzduchu                                              |
| $Q_{FA}$           | - množství tepla obsažené v látce před sušením $/J/$                    |
| $Q_{FB}$           | - množství tepla obsažené v látce po sušení $/J/$                       |
| $Q_{LA}$           | - množství tepla vzduchu před vstupem do sušárny $/J/$                  |
| $Q_{LB}$           | - množství tepla vzduchu na výstupu ze sušárny $/J/$                    |
| $Q_{OHR}$          | - množství tepla přivedené ohřivačem $/J/$                              |
| $Q_{VE}$           | - množství tepla vzniklé prací ventilátoru $/J/$                        |
| $Q_{ZTR}$          | - energetické ztráty $/J/$                                              |
| $R$                | - redukovaná tloušťka formy $/m/$                                       |
| $S$                | - plocha sádrového dílu $/m^2/$                                         |
| $\Delta S_{298}^0$ | - změna entropie při standardních podmínkách $/J.K^{-1}/$               |
| $T$                | - teplota $/K, ^\circ C/$                                               |
| $T$                | - změna teploty                                                         |
| $T_1$              | - teplota atmosféry při tepelném zpracování sádrových dílů $/^\circ C/$ |
| $T_2$              | - teplota povrchu sádrového dílu $/^\circ C/$                           |
| $T_3$              | - teplota ve středu sádrového dílu $/^\circ C/$                         |
| $T_s$              | - teplota vzduchu při sušení $/^\circ C/$                               |
| $T_m$              | - teplota vlhkého sádrového dílu $/^\circ C/$                           |
| $T_{vl}$           | - teplota vnitřku sádrového dílu $/^\circ C/$                           |
| $T_w$              | - teplota vody $/^\circ C/$                                             |
| $V$                | - objem sádrového dílu $/m^3/$                                          |
| $X$                | - měrná vlhkost vzduchu $/kg.kg_{sv}^{-1}/$                             |
| $X_m$              | - měrná vlhkost vzduchu na povrchu sádrového dílu $/kg.kg_{sv}^{-1}/$   |
| $X_v$              | - měrná vlhkost atmosféry tepelného zpracování $/kg.kg_{sv}^{-1}/$      |
| $a$                | - součinitel teplotní vodivosti $/m^2.K^{-1}/$                          |
| $c$                | - měrné teplo $/J.kg^{-1}.K^{-1}/$                                      |



- $d$  - tepelný obsah  $/J.kg^{-1}/$   
 $\Delta d$  - změna tepelného obsahu  $/J.kg^{-1}/$   
 $a'$  - součinitel vlhkostní vodivosti vlivem teplotního spádu  $/K^{-1}/$   
 $dq$  - přírůstek tepla za časový okamžik  $/J.s^{-1}/$   
 $q'$  - měrný tepelný tok  $/W.m^{-2}/$   
 $q$  - měrný tepelný výkon  $/W.m^{-2}/$   
 $j$  - entalpie vzduchu  $/J.kg^{-1}/$   
 $j_A$  - entalpie vzduchu na vstupu do sušárny  $/J.kg^{-1}/$   
 $j_B$  - entalpie vzduchu na výstupu ze sušárny  $/J.kg^{-1}/$   
 $k$  - součinitel vlhkostní vodivosti vlivem vlhkostního spádu  $/m^2.s^{-1}/$   
 $l_0$  - počáteční délkový rozměr  
 $\Delta l$  - změna délkového rozměru  
 $m$  - hmotnost  $/kg/$   
 $m_{FA}$  - hmotnost látky před sušením  $/kg/$   
 $m_{FB}$  - hmotnost látky po sušení  $/kg/$   
 $m_{LA}$  - hmotnost vzduchu vstupujícího do sušárny  $/kg/$   
 $m_{LB}$  - hmotnost vzduchu vystupujícího ze sušárny  $/kg/$   
 $m_{kon}$  - konečná hmotnost sádrového dílu po tepelném zpracování  $/kg/$   
 $m_{poč}$  - počáteční hmotnost sádrového dílu před tep. zpracováním  $/kg/$   
 $m_{sv}$  - hmotnost suchého vzduchu  
 $m_y$  - okamžitá hmotnost sádrového dílu při tep. zpracování  $/kg/$   
 $m_w$  - hmotnost vody v sádrovém dílu  
 $m_x$  - úbytek hmotnosti sádrového dílu při tepel. zpracování  $/kg/$   
 $n$  - počet úseků dělení sádrového dílu  $/l/$   
 $p_{pM}$  - parciální tlak vodní páry nad sádrovým dílem při teplotě jeho mokrého povrchu  $/MPa/$   
 $p_{pp}$  - parciální tlak vodní páry v atmosféře tep. zpracování  $/MPa/$   
 $p_p''$  - parciální tlak nasycené vodní páry  $/MPa/$   
 $t$  - čas  
 $u$  - měrná vlhkost sádrového dílu  $/\%/$   
 $u_{poč}$  -  $u_1$  počáteční měrná vlhkost sádr. dílu  $/\%/$   
 $u_{kr}$  - kritická měrná vlhkost sádrového dílu  $/\%/$   
 $v$  - rychlost tepelného zpracování  $/kg.h^{-1}, g.s^{-1}/$   
 $w$  - vlhkost sádrového dílu (dříve označovaná jako relativní vlhkost)  $/\%/$

- $x, y, z$  - souřadnice místa  
 $\alpha$  - součinitel přestupu tepla  $/W.m^{-2}.K^{-1}/$   
 $\beta$  - součinitel přestupu vody dotykem  $/J.K^{-1}.s^{-1}/$   
 $\beta_p$  - součinitel přenosu vody vztažený na rozdíl parciálních tlaků  
 $\beta_x$  - součinitel přenosu vody vztažený na rozdíl měrných vlhkostí  
 $\rho$  - měrná hmotnost  $/kg.m^{-3}/$   
 $\rho_{kon}$  - střední měrná hmotnost sádrového dílu po tepelném zpracování  $/kg.m^{-3}/$   
 $\rho_{MS}$  - střední měrná hmotnost suché látky  $/kg.m^{-3}/$   
 $\rho_p$  - měrná hmotnost páry  
 $\rho_{p''}$  - měrná hmotnost nasycené vodní páry  $/kg.m^3/$   
 $\varphi$  - relativní vlhkost  $/l/$   
 $\alpha$  - součinitel úměrnosti tepelného zpracování sádrového dílu  $/g.h^{-1}/$   
 $\alpha$  - součinitel úměrnosti tepelného zpracování sádrového dílu vztažený na jednotkový povrch  $/g.h^{-1}.cm^{-2}/$   
 $\lambda$  - tepelná vodivost  $/W.m^{-1}.K^{-1}/$   
 $Fo$  - Fourierovo číslo  $( Fo = \frac{a \cdot t}{(s/2)^2} )$   
 $Au$  - napařovaný sádrový vzorek zlatem  
 $BEM$  - řádkovací elektronový mikroskop  
 $VŠCHT$  - Vysoká škola chemicko technologická ( v Praze )  
 $VÚSH$  - Výzkumný ústav stavebních hmot ( v Brně )



## Ú V O D

Jedním z hlavních úkolů našeho průmyslu je neustálé zvyšování strojírenské výroby se snižujícími se náklady na suroviny a energii.

Probíhající vědeckotechnický rozvoj socialistické výroby je založen na vývoji techniky a plném využití poznatků vědeckotechnického pokroku ve výrobní praxi.

S l é v á r e n s t v í, které je důležitou součástí strojírenské výroby se orientuje na takové druhy technologií, které umožňují snížit spotřebu energie, kovů a pracnost ve strojírenské výrobě. Jedná se především o růst výroby odlitků a vyšší rozměrovou a tvarovou přesností. Jednou z těchto metod je odlévání do forem ze sádrových formovacích směsí. Současná slévárenská technologie klade na tyto formy vysoké požadavky. Základním požadavkem je nejen sledování minimální změny rozměrů, praskání při tepelném zpracování, prodyšnost, vývin par a plynů při odlévání roztaveného kovu, ale i jiné. U odlitků, které získáváme z těchto forem, požadujeme nejen velmi vysokou hladkost povrchu, kvalitu, ale také rozměrovou přesnost. Tyto uvedené požadavky lze zajistit řešením mnoha úkolů týkajících se fyzikálněchemických a slévárenských vlastností sádry a zejména sádrových formovacích směsí ( sádrových směsí ).

Jedním z těchto úkolů je také dokonalé prozkoumání procesu tepelného zpracování forem ze sádrových směsí. Tímto směrem je zaměřena i tato práce, a to na děje, které probíhají při tepelném zpracování ( sušením a žíháním ) forem ze sádrových směsí.

a) Přehled o současném stavu problematiky tepelného zpracování a výroby forem ze sádrových směsí.

Při odlévání tekutého kovu do formy ze sádrové formovací směsi ( sádrové formy ) dochází na rozhraní forma - kov k intenzivnímu odpařování vlhkosti obsažené v této formě, nebo k uvolňování některých plynných podílů formovací směsi, které vznikají jejím tepelným rozkladem. Z tohoto důvodu je nutno tyto formy tepelně zpracovávat ( sušit a žíhat ),

První etapa tepelného zpracování - sušení - probíhá při teplotě do 200°C v sušárnách a odstraňuje se převážně voda volná ( kapilární ), která je určena tak zvaným vodním poměrem ( množstvím rozdělovací vody ) a z části voda vázaná.

Druhá etapa tepelného zpracování - žíhání - se provádí při teplotě nad 200°C v komorových pecích, kdy se odstraňuje voda vázaná ( voda krystalická ) obsažená v dihydrátu nebo polohydrátu síranu vápenatého.

V zahraničí se používá pro komplexní výrobu sádrových forem metoda ANTIOCH nebo BENDIX / 28, 44 /.

Metoda ANTIOCH

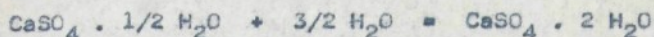
Je proces výroby prodyšných sádrových forem s fázovou přeměnou síranu vápenatého, který je známý pod názvem Antioch Process a byl vyvinutý na Antioch College Kellow Springs, Ohio, USA roku 1930.

Z fyzikálněchemického hlediska se dá proces výroby prodyšných sádrových forem rozdělit do 4 stádií. / 28 /.

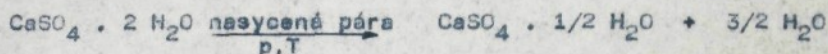
A) Pójení - spočívá v tom, že získáme spojením polohydrátu síranu vápenatého (  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$  ) a vody



dihydrát síranu vápenatého (  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$  )

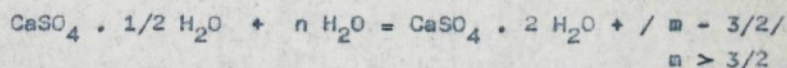


- B) Pak zahříváme dihydrát síranu vápenatého v atmosféře nasycené páry při teplotě 110 - 117°C, vzniká opět polohydrát síranu vápenatého, protože dihydrát je při této teplotě termodynamicky nestabilní.



V sádrové formě, ve které je pojivem dihydrát vápenatý, pak v autoklávu zůstává voda uvolněná přeměnou dihydrátu síranu vápenatého ve formě a rozpouští v sobě polohydrát až do nasycení.

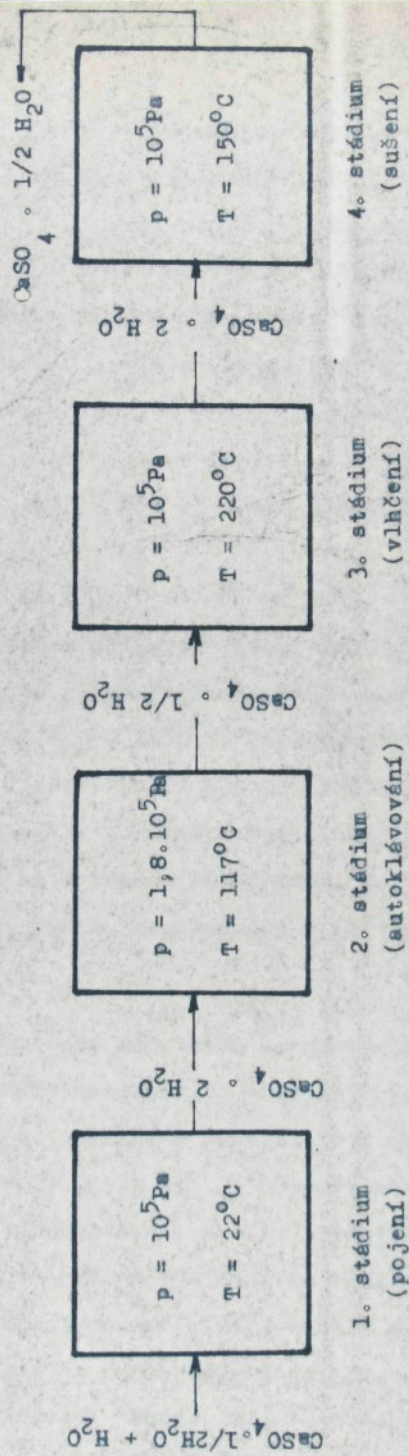
- C) Po dobu 6 - 8 hodin pobytu formy v autoklávu se forma ochlazuje ve vlhké atmosféře a probíhá chemická reakce:



Povrch formy se ochladí rychleji než její vnitřek, proto se vylučují ve vrstvách na povrchu jemné krystaliky dihydrátu síranu vápenatého a ve vnitřku formy hrubé krystaly. Vznikne forma s jemnozrným povrchem a pórovitým vnitřkem, což má za následek zvýšení její prodyšnosti, ta se pohybuje od 50 až do 150 n.j.p.

- D) Pak probíhá sušení při teplotě 150°C a tlaku 0,1 MPa, opět vzniká polohydrát síranu vápenatého.

Schématické označení tohoto procesu je patrné z obrázku 1.



Scheme metody Antioch



Metoda ANTIOCH představuje dvoufázový proces komplexní výroby sádrových forem, kdy se získává jejich vysoká prodyšnost a nízký obsah vody. V první fázi se forma napařuje v autoklávu asi 7 - 9 hodin v syté vodní páře o tlaku 0,1 MPa, jak je schematicky popsáno v bodu A). Ve druhé fázi se forma ponořuje do vody a nechá se 16 hodin v klidu, při čemž proběhne překrystalizace polohydrátu síranu vápenatého na dihydrát. Pak se forma desouší pomalým ohřevem na teplotu 100, 150, 200 až 300°C po dobu 10 - 15 hodin a pak se ihned provádí odlévání.

#### Metoda BENDIX / 44 /

Další metodou celkové výroby sádrových forem je metoda Bendix. Forma se po ztuhnutí nechá 24 hodin odstát na vzduchu za normální teploty ( 20°C ). Za tuže dobu proběhnou některé hydatiční dilatace. Další postup spočívá v tepelném zpracování nejrozsáhlejších cyklů v rozmezí teplot 230 - 400°C po dobu 16 hodin. lišících se zkušenostmi výrobců. Takto tepelně zpracovaná forma se nechá pomalu vychladnout a je také připravena k odlévání.

Studium procesu tepelného zpracování sádrových forem, prováděné na katedře materiálů a strojírenské metalurgie Vysoké školy strojní a textilní v Liberci, vycházelo z metody Bendix. / 20, 21, 22 /. Ukázalo se, že připravované sádrové formy je nutno tepelně zpracovávat, sušit v běžných sušárnách do teploty 200°C a žíhat v komerové peci do teploty 400°C . Dále bylo zjištěno, že každá použitá sádrová směs a z ní vyrobená sádrová forma má vlastní režim tepelného zpracování. Celková doba tepelného zpracování těchto forem se pohybuje v rozmezí od 24

do 72 hodin podle velikosti a členitosti event. podle obsahu rozdělavací vody použité při přípravě formy. Na obrázku 2 je znázorněn režim tepelného zpracování forem z nenapěněné sádrové směsi, tvořené 50 % hmotnostních dílů alabastrové sádry a 50 % hmotnostních dílů stavební sádry. Vhodnost takto navrženého cyklu tepelného zpracování byla sledována na sádrových vzorcích  $\varnothing$  35 x 50 mm a na formách 250 x 250 x 60 mm. Z těchto forem byly získány odlitky, které byly rozměrově vyhodnoceny a byla zhodnocena jakost povrchu.

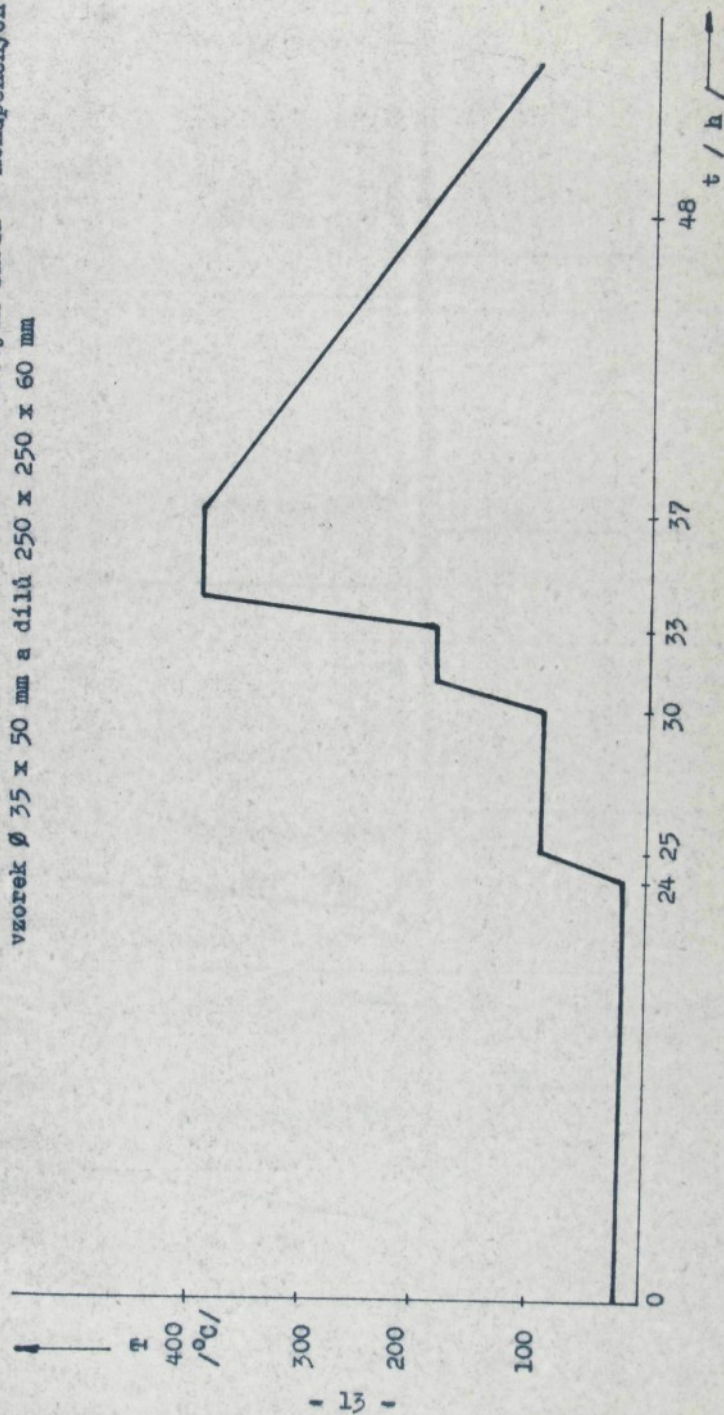
Dále byl proveden návrh režimu tepelného zpracování pro formovací směs Garasin, která je podle domněnek tvořena asi 30 hmotnostními díly křemičitého písku, zbytek tvoří sádra a příměsi, avšak výrobce Dentál, n.p., Jičín složení neuveřejňuje. Dnes již se tato formovací směs nevyrábí. Režim tepelného zpracování forem z Garasínu byl prováděn na vzorcích  $\varnothing$  35 x 50 mm,  $\varnothing$  50 x 50 mm, 22,5 x 22,5 x 170 mm a na formách 250 x 250 x 60 mm. Tepelné zpracování bylo započato 24 hodin po výrobě forem v sušárně o příkonu 3 kW s automatickou regulací. Ve 24 hodinových intervalech byly pak jednotlivé sádrové díly, resp. formy ohřáté na zvolenou teplotu. Žihání na teplotu 600 - 700°C se provádělo v elektrické peci po přemístění dílů ze sušárny maximální teploty 150°C, aby nedošlo k jejich popraskání / 20 /.

Podmínky tepelného zpracování těchto dílů, resp. průběh tepelného zpracování je patrný z obrázku 3. Jednotlivé části tepelného zpracování jsou označovány nejvyšší dosaženou teplotou v peci. Ohřev je prováděn stupňovitě. Takto zvolený režim byl realizován pro konkrétní tvar a velikost formy / 21 /, bližší informace tato literatura neuvádí.

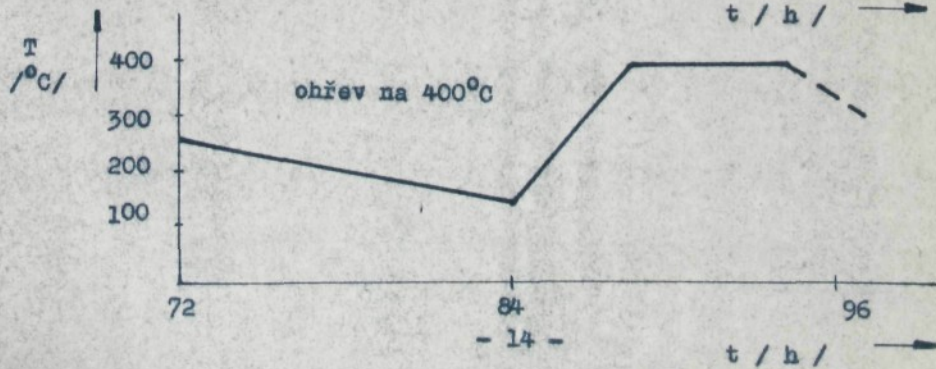
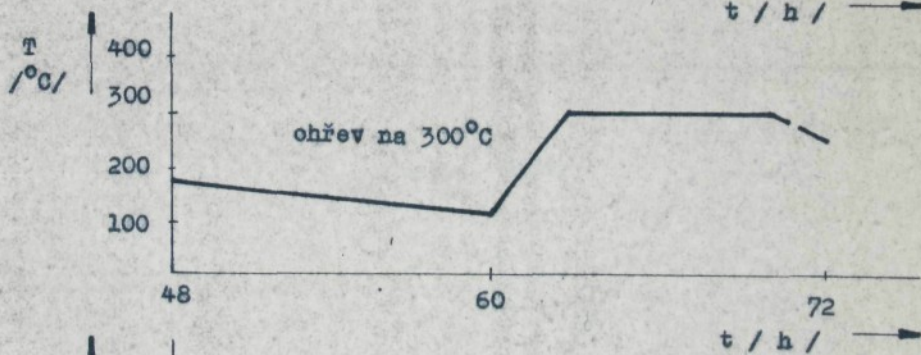
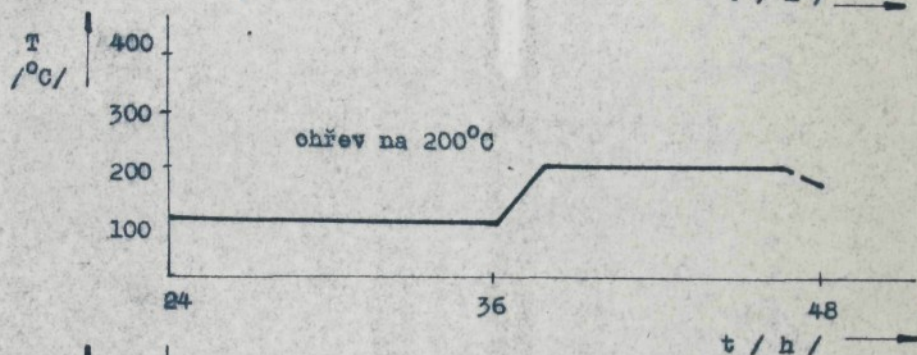
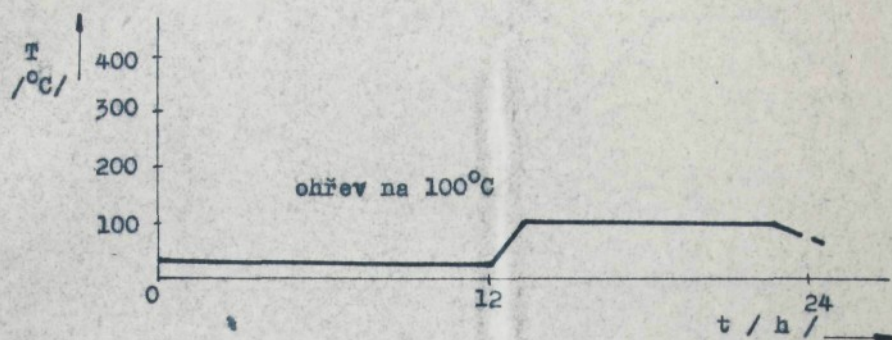
Zvláštní skupinu sádrových forem tvoří t.zv. napěněné formy.



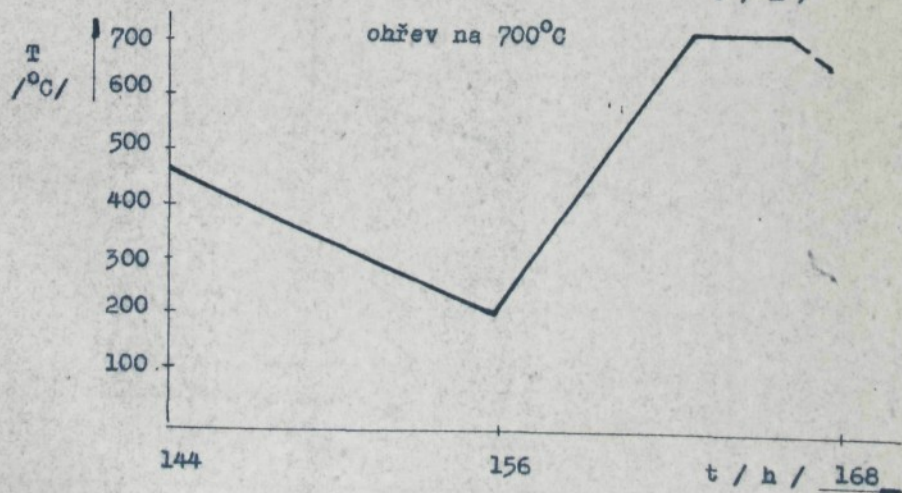
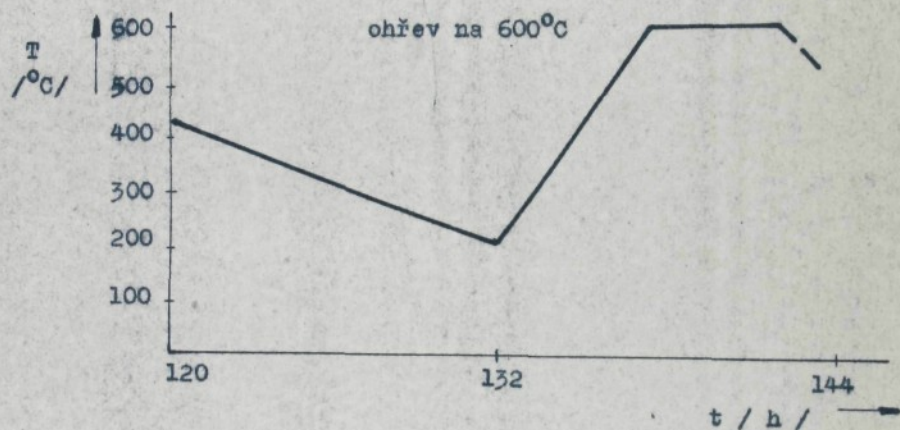
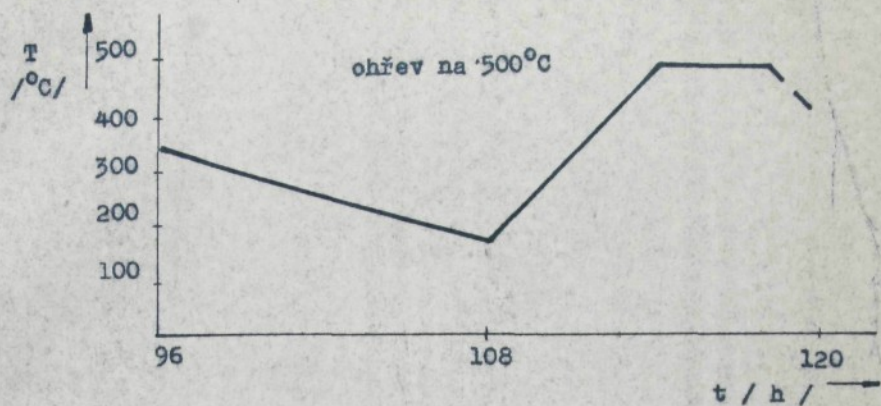
Obr. 2 Režim tepelného zpracování forem ze sádrových směsí - nenapěněných  
vzorek Ø 35 x 50 mm a dílů 250 x 250 x 60 mm



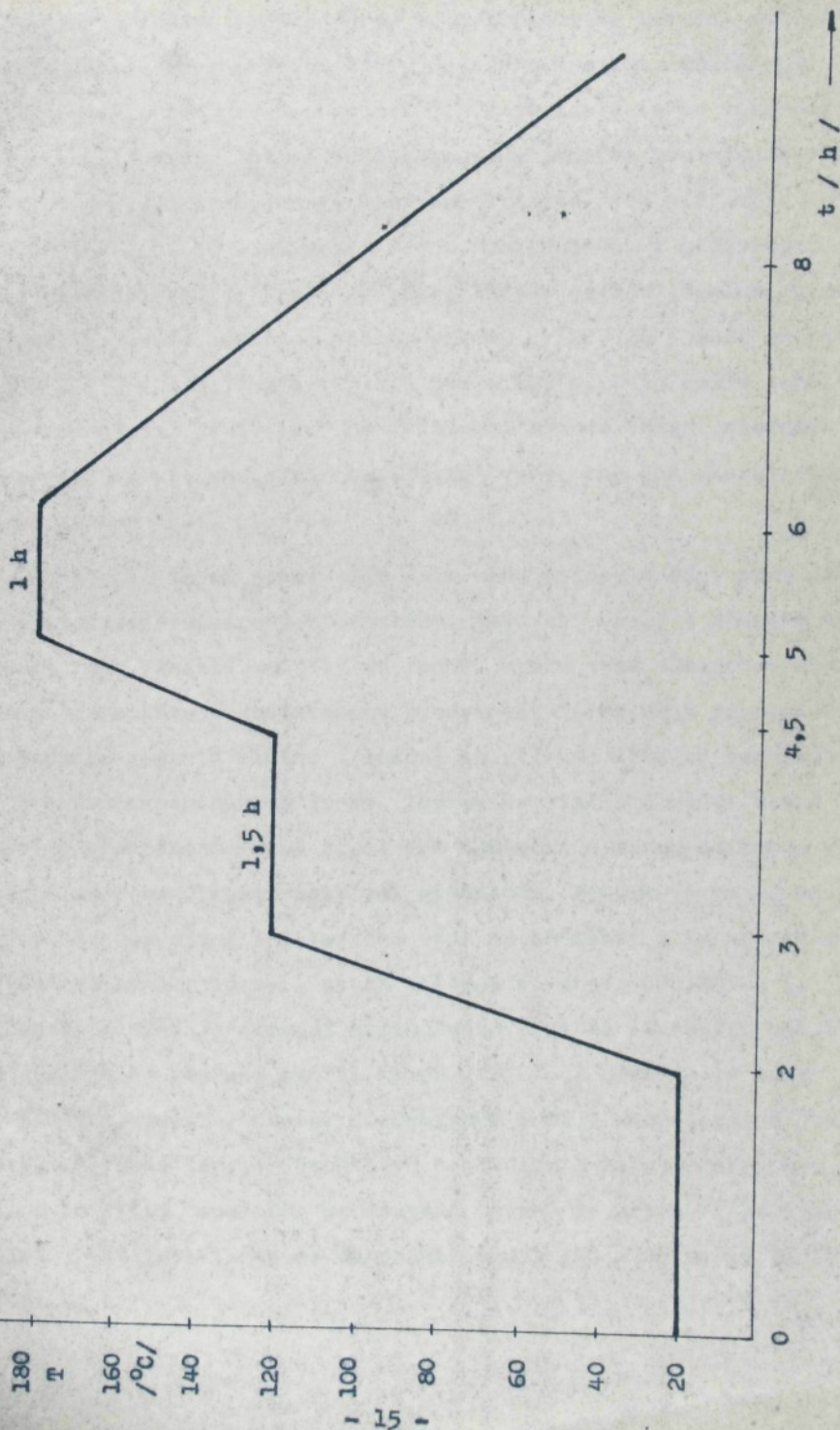
Obr. 3 Režim tepelného zpracování forem 250 x 250 x 60 mm ze sádrové směsi GARASIN







Obr. 4 Režim tepelného zpracování sádrových dílů z napěněných směsí





Podstatou přípravy těchto forem je poznatek, že přísada malého množství povrchově aktivní látky do sádrové směsi způsobí při jejím rozdělování s vodou napěnění. Po ztuhnutí takto vyrobených směsí vzniká hmota, která je prostoupena jemnými bublinkami, čímž se zvyšuje její prodyšnost. Vlastnosti napěněných sádrových forem se výrazně liší od vlastností forem nenapěněných (prodyšnost, malá hmotnost atd.). Proto se tímto liší i jejich tepelné zpracování. Napěněné formy se podle výzkumů / 22, 33 / suší na teplotě  $120^{\circ}\text{C}$  a žijí při teplotě  $180 - 200^{\circ}\text{C}$ . Celý režim tepelného zpracování je závislý na velikosti těchto forem, složení formovací směsi, množství rozdělovací vody, tak jak ukazují výzkumné zprávy VŠST, Liberec / 19, 20, 22, 33 /.

U těchto forem stačí odstranit vodu volnou a část vody vázané z dihydrátu síranu vápenatého, tak, aby došlo k přeměně na polohydrát. Vzniklé kanálky ve formě, které jsou důsledkem napěnění a zajišťují dostatečnou prodyšnost formy, mají za následek, že použitá teplota žihání a sušení se výrazně liší od tepelného zpracování nenapěněných forem. Zbytek krystalické vody, která zůstala v napěněné formě stačí při odlévání z formy uniknout v podobě páry kanálkami vzniklými napěněním. Naopak je možno usuzovat, že zbývající krystalická voda má příznivý vliv na ochlazení schopnost formy (ústní sdělení s. prof. ODSTRČILA). Režim tepelného zpracování napěněných forem ze sádrových směsí nejrůznějšího složení ověřil MIKUŠ / 33 /. Pro sádrovou směs 50 % hmotnostních jednotek alabastrové a 50 % hmotnostních jednotek stavební sádry, respektive pro formy z ní vyrobené, byl stanoven režim tepelného zpracování, který je patrný z obrázku 4. Rozměr použitých forem se pohyboval  $150 \times 150 \times 30$  mm až  $250 \times 250 \times 60$  mm.



Ověřený průběh tepelného zpracování na konkrétních dílech se skládá ze sušení, které se provádí na vzduchu při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  po dobu 2 hodin, a vlastní sušení se provádí na teplotě  $120^{\circ}\text{C}$  po dobu 2,5 hodiny, kdy hmotnostní úbytek činí 40 % původní hmotnosti formy. Žihání se provádí při teplotě  $160^{\circ}\text{C}$  po dobu 1 hodiny. Celkový úbytek hmotnosti napěněné formy se pohybuje od 42 - 45 % původní hmotnosti.

Tyto výzkumy ukázaly, že správně stanovený režim tepelného zpracování nahrazuje technologicky a energeticky náročný proces výroby forem - metodu ANTIOCH, event. BENDIX.

Dostupné zahraniční literatura se zabývá výzkumem a zdokonaľováním převážně metody ANTIOCH. Při této příležitosti byla studována soustava  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  a fázové přeměny síranu vápenatého. Ukázalo se, že ohřev síranu vápenatého nesmí být spojen s chemickou reakcí / 28 /. Dále velký důraz se klade na teplotu, při vysoké teplotě kolem  $960^{\circ}\text{C}$  dochází k rozkladu síranu vápenatého na oxid vápenatý a oxid sirový. Některé přísady v sádře (hlavní složky sádrové směsi) jako na příklad oxid železa, hlína, uhlík atd. snižují teplotu rozkladu podle / 42 /, z čehož plyne, že teplota sádrové formy, při jejím tepelném zpracování by neměla přesáhnout  $700^{\circ}\text{C}$ . Podle ústního sdělení doc. FIALY z VÚT, Brno, který prováděl tepelné zpracování sádrových forem až na teplotu  $800 - 900^{\circ}\text{C}$  a s odlitky získanými z těchto forem má dobré zkušenosti - jsou kvalitní.

Při prostudování dostupné literatury, která se týká výroby sádrových forem a jejich tepelného zpracování, se ukazuje, že neexistuje komplexní rozbor této problematiky s výjimkou metody AN-



TIOCH, která by se zabývala výzkumem síranu vápenatého určeného pro tyto účely.

Závěrem lze konstatovat, že studium této problematiky je zá-  
vislé na podmínkách tepelného zpracování, na použité formovací  
směsi, na množství rozdělovací vody, na velikosti a členitosti  
forem, na použitém zařízení pro tepelné zpracování.

#### Seznam nejdůležitější literatury:

KOLEKTIV: Studium výroby odlitků litých do sádrových forem /Závě-  
rečná výzkumná zpráva úkolu P 15 - 24 - 008 - 21/02/ VŠST - FS,  
Liberec 1973;

KOLEKTIV: Studium technologie odlévání do sádrových forem GARASIN  
/Dílčí výzkumná zpráva úkolu V - 124 - 001, 022/ VŠST - FS,  
Liberec 1978;

KOLEKTIV: Studium technologie a vlastností sádrových formovacích  
směsí /Závěrečná výzkumná zpráva úkolu V - 124 - 001, 022/  
VŠST - FS Liberec 1980;

KOLEKTIV: Technologie a vlastnosti forem ze sádrových směsí /Díl-  
čí výzkumná zpráva úkolu V - 119 - 203(/N - 132)/ VŠST - FS  
Liberec 1983;

LUSNIAK - LECH, L.: Způsob přípravy propustných forem pro výrobu  
přesných odlitků /Sborník referátů z II. Symposia o přesném lití/  
10 - 12. 9. 1975, Písek, s. 28

MIKUŠ, M.: Študium spracovania a vlastností napěněných sádrových  
formovacích směsí, /Díplomová práce/ VŠST - FS Liberec 1980;

ROCHIER, M.: Fouderie 274 Janvier 1969 Les Liauts Olineraux Les Plat-

c) Cíl disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je výzkum t e p e l n é h o z p r a c o v á n í sádrových forem zaměřený k dosažení maximální přesnosti odlitků a dosažení odpovídající drsnosti jejich povrchu.

K vyřešení tohoto hlavního cíle bylo nutno řešit tyto dílčí úkoly:

1. Provést teoretický rozbor všech vlivů při tepelném zpracování sádrových forem na základě aplikace zákonitostí sdílení tepla, difusních pochodů a vlivu velikostních a tvarových činitelů těchto forem.
2. Navrhnout metodiku sledování fyzikálně-chemických procesů probíhajících při tepelném zpracování sádrových forem.
3. Navrhnout a realizovat vhodná měřicí zařízení pro unožnění studia a řešení výše uvedených cílů.
4. Ověřit navrženou metodiku i měřicí zařízení a dosažené výsledky porovnat s výsledky dosaženými na VŠCHT Praha a literárními údaji.
5. Na základě vyvinuté metodiky a zařízení provést studium dějů při tepelném zpracování vybraných sádrových směsí a experimentálně získané výsledky porovnat s vypočítanými hodnotami.
6. Na základě experimentálních výsledků využít LYKOVU teorii.
7. Výsledky experimentů použít při stanovení a optimalizaci režimu tepelného zpracování sádrových forem s cílem jejich využití v průmyslové výrobě.
8. Při konkrétní slévárenské výrobě prokázat výsledky tohoto výzkumu.



Shrnutí všech těchto poznatků a jejich další aplikace při návrhu optimálního režimu tepelného zpracování dané sádrové formy v použitém zařízení by mělo přispět ke zvýšení efektivnosti tohoto procesu z hlediska úspory energie.

Práce se řešila v podmínkách katedry materiálu a strojírenské metalurgie na Vysoké škole strojní a textilní v Liberci.

## 1.0 CHARAKTERISTIKA FOREM ZE SÁDROVÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍ

### 1.1 Fyzikálněchemické vlastnosti sádry / 11, 45, 49 /

Prášková sádra se získává pálením sádrovce  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$  (dihydrát síranu vápenatého), který se mele na moučku. Sádrovec je minerál krystalizující v jednodílné soustavě, nejčastěji v tabulkách, sloupcích, čoučkovitého, zaobleného tvaru. Do teploty asi  $42^\circ\text{C}$  je stálý, při zvýšení teploty postupně ztrácí vodu. Zahřátím na teplotu  $110^\circ\text{C}$  ztrácí sádrovec krystalicky vázanou vodu a postupně přechází na nižší formy až bezvodý síran vápenatý. Při teplotě asi  $1400^\circ\text{C}$  se sádrovec rozkládá na oxid vápenatý a sírový. Teplota rozkladu se snižuje přítomností oxidu křemičitého, železitého až na teplotu  $700^\circ\text{C}$  podle / 42 /.

Množství krystalické vody, které zbývá po zahřátí sádrovce má vliv na vlastnosti vyrobené sádry. Když se zahříváním při teplotě  $110 - 130^\circ\text{C}$  uvolní  $3/2$  krystalické vody zůstane polohydrát síranu vápenatého, který tvoří hlavní složku každé sádry. Při ztrátě vody při teplotě vyšší než je  $200^\circ\text{C}$  začíná vznikat postupně anhydrit, nad  $400^\circ\text{C}$  bezvodý anhydrit čili mrtvá sádra.

Podle způsobu odvodnění můžeme získat dvojí druh polohydrátu. Pálením sádrovce na vzduchu při  $120 - 130^\circ\text{C}$  se získává  $\beta$ -polohydrát, jehož mikrokrytalické částice jsou vločkovité, pórovité a poněkud nepravidelné. Odvodnění sádrovce v autoklávu se při tlaku  $0,13 \text{ MPa}$ , teplotě  $125^\circ\text{C}$  po dobu 7 - 8 hodin se vyrábí  $\alpha$ -polohydrát s dobře vyvinutými hranolovitými krystaly o délce  $0,1 - 1 \text{ mm}$ .

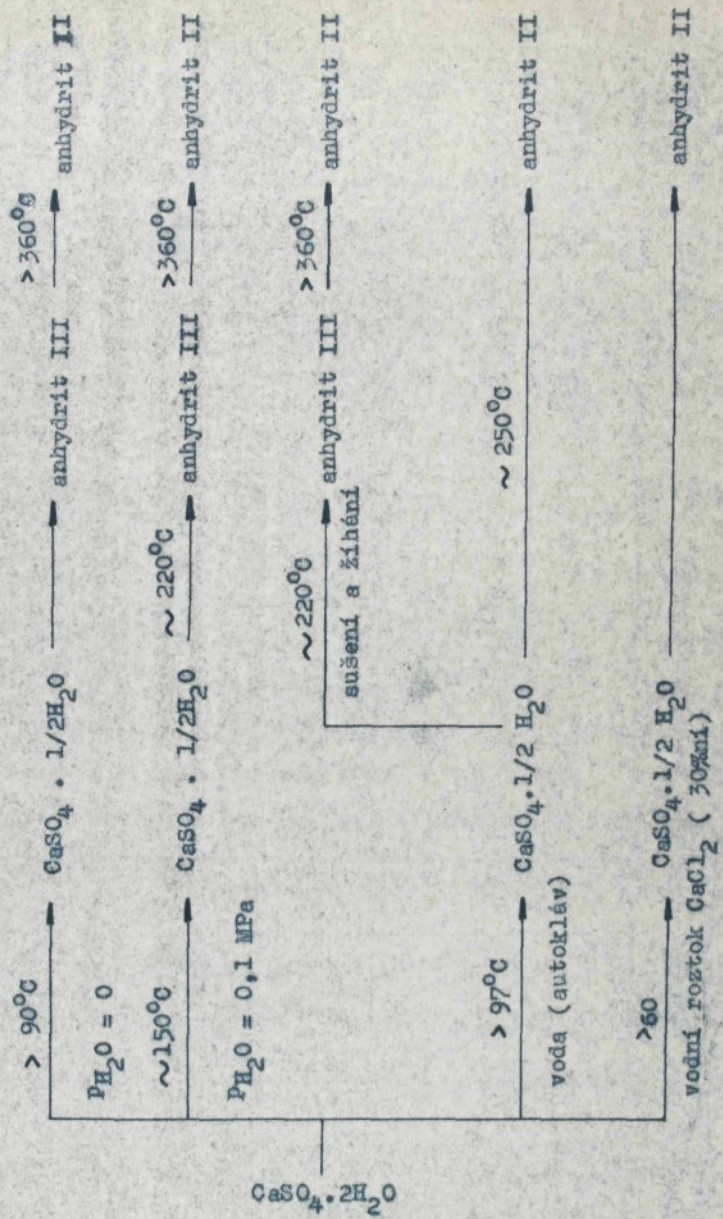


Sled přeměn při zahřívání sádrovce za různých podmínek je na obrázku 1.1 a přehled fází soustavy  $\text{CaSO}_4$  - voda je patrný z tabulky 1.1.

Produkty tepelného rozpadu sádrovce dávají různé formy sádry HARMÁČEK / 11 /.

1. Polohydrát  $\alpha\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$  vzniká částečným odvodněním sádrovce v prostředí přesyceném vodní parou při teplotě  $115 - 125^\circ\text{C}$ . Polohydrát je krystalický, má zřetelně rozeznatelné obrysy krystalků ( při pozorování mikroskopem). Při prohlídce okem se struktura projevuje hedvábným leskem.
2. Polohydrát  $\beta\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$  vzniká odvodněním sádrovce při teplotě  $100^\circ\text{C}$  nebo při teplotách poněkud vyšších. Struktura je vločkovitá, šupinkovitá, rozeklanná. Při pozorování mikroskopem, avšak ani při velkém zvětšení, nejsou rozeznatelné obrysy krystalů. Protože má polohydrát větší povrch krystalu, je energeticky méně stabilní a ve vodě lépe rozpustný.
3. Anhydrit  $\alpha\text{CaSO}_4$  III ( rozpustný anhydrit ) vzniká úplným odvodněním sádrovce nebo polohydrátu ve vakuu při  $100^\circ\text{C}$  nebo při  $110^\circ\text{C}$  za normálního tlaku.
4. Anhydrit  $\beta\text{CaSO}_4$  III vzniká rovněž úplným odvodněním ve vakuu při teplotě blízké  $100^\circ\text{C}$  nebo žháním při teplotě  $140$  až  $300^\circ\text{C}$  za normálního tlaku.
5. Anhydrit  $\text{CaSO}_4$  II vzniká úplným odvodněním sádrovce při teplotě vyšší než  $300^\circ\text{C}$  za normálního tlaku. Při teplotách převyšujících  $800^\circ\text{C}$  se rozkládá na oxid vápenatý

Obr. 1.1 Sled přeměn při zahřívání sádrovce  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  za různých podmínek / 12 /





Tabulka 1.1

Fáze soustavy  $\text{CaSO}_4$  - voda ( podle LEHMANNOVA a jiných autorů ). / 49 /

| Název:                                    | Chemický vzorec:                                                                                                      | Obsah vody %:              | Teplota přeměny /°C/:      | Měrná hmotnost /g.cm <sup>-3</sup> / | Oblast termodynam. stálosti: | Krystal. soustava:         |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Sádrovec (dihydrát síranu vápen.)         | $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                                                                             | 21<br>( teor. 20,9 )       | 95 - 130<br>( 107 - 115 )  | 2,32                                 | do 40°C                      | monoklinická               |
| Polohydrát                                | $\alpha\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$<br>$\beta\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ | 6,2 - 8<br>( teor. 6,21 )  | 150 - 230<br>( 110 - 200 ) | 2,76 (α)<br>2,63 (β)                 | metastabilní                 | pseudoromb.<br>tetragonál. |
| Anhydrit III                              | $\alpha\text{CaSO}_4$<br>$\beta\text{CaSO}_4$                                                                         | 0,02 - 0,05<br>0,60 - 0,90 | 400 - 750                  | 2,59 (α)<br>2,48 (β)                 | metastabilní                 | hexagonála                 |
| Anhydrit II<br>(nerozpuštěný<br>přírodní) | $\delta\text{CaSO}_4$                                                                                                 | -                          | 800                        | 2,98                                 | 40 - 118°C                   | rombická                   |
| Anhydrit I<br>(výskopevnost-<br>ní)       | $\epsilon\text{CaSO}_4$                                                                                               | -                          | 1 450 - tání               |                                      | na 118°C                     | kubická                    |

Poznámka: Polohydrát  $\alpha$  a  $\beta$  a anhydrit III  $\alpha$  a  $\beta$  nejsou odlišné polymorfni modifikace, jde pouze o modifikace odlišné formy. Teploty přeměny v závislosti na teplotě uvádí LEHMANN, jejich praktické hodnoty závisí na metodě a podmínkách stanovení.

a oxid sírový.

6. Anhydrit  $\text{CaSO}_4$  I vzniká žháním sádrovce nebo předchozích produktů při teplotě  $1225 - 1230^\circ\text{C}$  za normálního tlaku.

### 1.1.1 Rozdělení sádry

V praxi rozlišujeme sádro podle mnoha hledisek, na příklad podle stupně pálení sádrovce, podle doby tuhnutí, podle je-mnosti mletí, bělosti, druhu pálení atd. V podstatě sádro rozdělujeme do 4 skupin / 11 /.

- a) sádra rychlotuhnoucí
- b) sádra pomalutuhnoucí
- c) vysokopevnostní sádra
- d) anhydritové pojivo

a) Sádra rychlotuhnoucí - získává se pálením sádrovce při teplotě  $107 - 200^\circ\text{C}$ , jde prakticky o polohydrát síranu vápenatého a určité množství anhydritu, který způsobuje rychlé tuhnutí nerozloženého sádrovce a cizích příměsí.

Dále se dělí na:

1. sádro modelářskou, která obsahuje asi 90% polohydrátu;
2. sádro alabastrovou, která obsahuje 90% polohydrátu 4% anhydritu a 2% dihydrátu;
3. sádro omítkovou, která je tvořena pouze polohydrátem.

b) Sádra pomalutuhnoucí - sádra stavební, je tvořena anhydritem II, který tvoří hlavní složku, dále anhydritem I a 2 - 4%  $\text{CaO}$ . Označuje se také jako sádra hydraulická, vyrábí se pálením sádrovce při teplotě  $800 - 1000^\circ\text{C}$ .

c) Vysokopevnostní sádra je tvořena v podstatě polohydrátem.



d) Anhydritové pojivo - je v podstatě tvořeno anhydritem a obsahuje malé množství přísad, které zlepšují konečné vlastnosti.

### 1.1.2 Vlastnosti sádky pro slévárenské účely / 5, 12, 45 /

Nejdůležitější mechanickou vlastností sádky je pevnost v tlaku, která se pohybuje 60 - 70 MPa / 5 /. Důležitá je závislost hodnoty pevnosti v tlaku na vodním poměru v/a ( množství rozdělovací vody a sádky ). Povrchová pevnost kvalitních sádek dosahuje až 130 MPa podle /12/. Po ztuhnutí narůstá tvrdost rychleji než pevnost, protože povrchové vrstvy sádky rychleji vysychají. Reprodukční schopnost některých druhů sádek dosahuje až 50  $\mu$ m drsnosti povrchu.

Vlastnosti sádky značně klesají podle způsobu výroby a jejího účelu, proto jejich rozmezí je velmi široké. Vlastnosti některých druhů sádky jsou uvedeny v tabulce 1.2

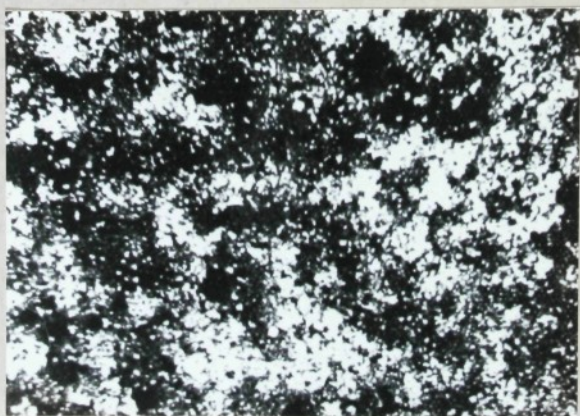
Tabulka 1.2

| Vlastnost                                             | Druh sádky             |                        |                        |
|-------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                                       | Rychletuhnoucí         | Pomalutuhnoucí         | Anhydrit.pojivo        |
| Měrná hmot.<br>/kg.m <sup>-3</sup> /                  | 2,7 . 10 <sup>-3</sup> | 2,9 . 10 <sup>-3</sup> | 2,9 . 10 <sup>-3</sup> |
| Sypká hmot.<br>/kg.m <sup>-3</sup> /                  | 1,1 . 10 <sup>-3</sup> | 1,2 . 10 <sup>-3</sup> | 1,0 . 10 <sup>-3</sup> |
| Velikost<br>částic<br>v mm                            | 0,2                    | 0,2                    | 0,09                   |
| Počet<br>tuhnutí<br>/s/                               | 240 - 480              | ~18000                 | ~15000                 |
| Množství roz-<br>dělovací vody 40 - 80<br>/ hmot. % / |                        | 25 - 35                | 25 - 35                |
| Pevnost<br>v tlaku /MPa/ 130                          |                        | 30                     | 28                     |
| Objemová změna<br>při tuhnutí 1<br>/ obj. % /         |                        | nepatrné<br>smrštění   | nepatrné<br>smrštění   |



100 x

Obr. 1.2  $\alpha$  polohydrát podle ŠTAVY / 49 /



100 x

Obr. 1.3  $\beta$  polohydrát podle ŠTAVY / 49 /





200 x

Obr. 1.4 dihydrát síranu vápenatého podle ŠATAVY / 49 /

### 1.1.3 Tuhnutí a tvrdnutí sádry /12, 45 /

Při výkladu zpevňování sádrových pojiv je nutno nejdříve uvážit poměr rozpustnosti jednotlivých fází systému  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  ve vodě. Hlavní děje, které probíhají při tuhnutí a tvrdnutí sádry jsou:

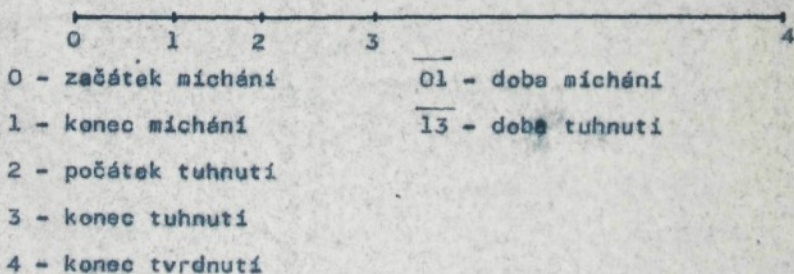
- rozpouštění polohydrátu
- nukleace dihydrátu
- růst krystalů dihydrátu

Tyto děje limitují rychlost hydratace a tím i zpevňování, jež postupuje souběžně s hydratací. Na rozdíl od většiny maltovin se tuhnutí sádry zpomaluje s rostoucí teplotou. Je to způsobeno tím, že se stoupající teplotou silně klesá rozpustnost polohydrátu, zatím co rozpustnost dihydrátu je zhruba stejná.

Tím se snižuje rozdíl rozpustnosti mezi oběma látkami a snižuje se možnost přesycení, které je příčinou vzniku zárodečných nukleí dihydrátu. Nedostatek krystalizačních center je pak příčinou zpomalování <sup>tuhnutí</sup>. Z toho vyplývá, že nad teplotou 48°C je stabilní fází anhydrit II a měl by tedy při tuhnutí vzniket. Nukleace anhydritu II je ale tak pomalá, že k tuhnutí dochází vznikem metastabilního dihydrátu. Tuhnutí je vždy provázeno zvětšením objemu a uvolněním tepla, které se rovná součtu rozpouštěcího a hydratačního tepla. Při zpracování sádky rozeznáváme:

- rychlost míchání
- začátek míchání
- dobu míchání
- začátek tuhnutí
- konec tuhnutí
- dobu tuhnutí
- dobu tvrdnutí
- dobu odlévání sádkové břečky

/ viz obrázek 1.5 /



Za dobu tuhnutí se považuje časový interval mezi koncem mícháním a úplným ztuhnutím. Doba, která uplyne od rozmíchání sádkové břečky do okamžiku, kdy již nelze sádkovou břečku



volně vylít z kelímku, se jmenuje doba lití.

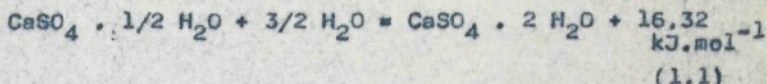
Na rychlost tuhnutí sádry, resp. sádrové břečky ( to je směs práškové sádry a vody ) má vliv řada činitelů:

- vlastní výrobní postup
- míchání sádry a vodou
- poměr mezi vodou a sádrrou - v/s
- teplota sádrové břečky ( kaše )
- některé chemikálie ovlivňující tuhnutí.

Čím je sádra jemnější, tím tuhne rychleji, protože se snadněji rozpouští. To platí pro obě formy polohydrátu. Pórovité a jemnější vločky polohydrátu přijímají vodu více a rozpouštějí se rychleji než celistvé krystaly polohydrátu. Čím více sádrovou kaši mícháme, tím rychleji tuhne. Mícháním se podporuje rozpouštění sádry ve vodě i tím i celkové tuhnutí. Zrychlení tuhnutí způsobené delším mícháním je patrné z tabulky 1.3. Vliv míchání sádry na dobu tuhnutí. ( alabastrová sádra ).

| Doba míchání<br>/s/ | Tuhnutí /min./<br>začátek | Tuhnutí /min./<br>konec | Rozdíl mezi začátkem<br>a koncem tuhnutí |
|---------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------------------|
| 15                  | 14,3                      | 17,6                    | 3,3                                      |
| 30                  | 12,5                      | 15,3                    | 2,8                                      |
| 45                  | 11,5                      | 14,2                    | 2,7                                      |
| 60                  | 11,1                      | 13,9                    | 2,8                                      |
| 75                  | 9,3                       | 11,6                    | 2,3                                      |
| 90                  | 8,0                       | 9,5                     | 1,5                                      |
| 105                 | 5,5                       | 7,2                     | 1,7                                      |

Sédra rozmíchaná s potřebným množstvím vody, které poměrem v/s, na řídkou kaši tuhne v pevnou hmotu. Po rozmíchání sádry s vodou probíhá děj opačný než při pálení. Reakci můžeme vyjádřit rovnicí: 1.1



Jedná se o exotermní proces a sédra při tuhnutí se zahřívá. Pro přeměnu poloanhydátu na dihydrát je teoreticky zapotřebí 18,6 % vody. Ve skutečnosti se jí však přidává mnohem více, aby se jednotlivé částice sádry mohly ve vzničné kaši volně pohybovat. Větší přídavek vody způsobuje, že v řídké kaši je málo krystalizačních center, a proto tuhnutí probíhá déle. Správný poměr vody v sádře v/s udává zkouška konsistence dle ČSN 72 2301. Závislost v rozpustnosti různých forem  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  ve vodě na teplotě je patrná z obrázku 1.6

## 1.2 Sádrové směsi

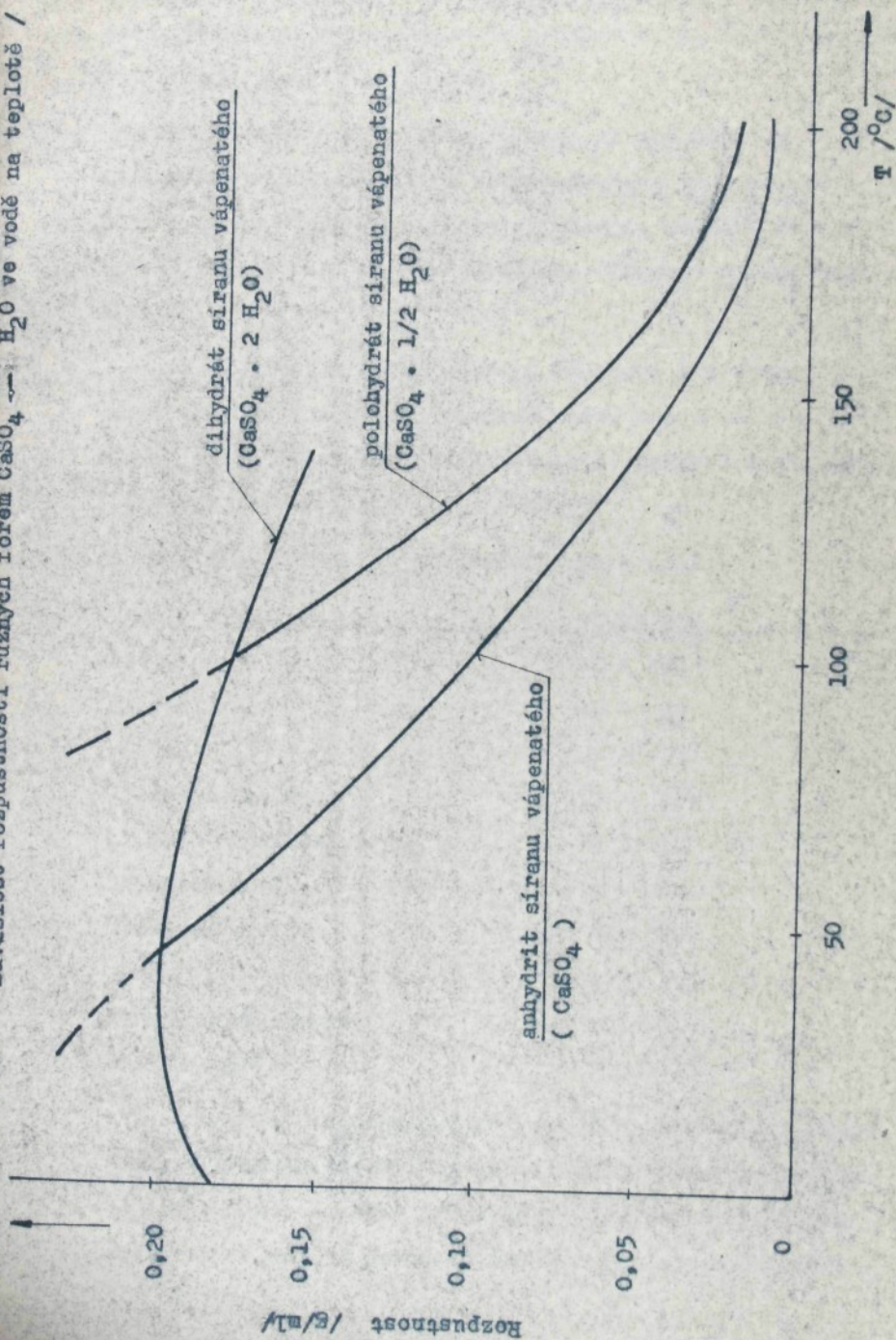
Sádrové směsi na bázi sádry mají dnes významné uplatnění ve slévárenství při výrobě forem určených ke získávání přesných odlitků, nejčastěji ze slitin hliníku, zinku, po případě jiných vhodných kovů. Tímto způsobem odlévání byly vyřešeny mnohé výrobní těžkosti při výrobě drobných odlitků, na příklad centimetrových dílů nejvíce používaných v radio-  
lokační technice.

Vlastností sádrových formovacích směsí určuje nejen jakost sádry, ale i množství dalších formovacích přísad. Sédra tvoří sádrové formovací směsi hydraulické (hydratační)



Obr. 1.5

Závislost rozpustnosti různých forem  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ve vodě na teplotě / 12 /



pojivo. Sádrou se váže směs křemenného písku, který tvoří ostřivo a dalších přísad na příklad slidy, jemně mletého azbestu, mastku a podobně.

Obsah sádry ve formovací směsi se pohybuje od 25 do 65 hmotnostních procent. K vážení dochází tím, že sádra je zčásti dehydratovaným síranem vápenatým, přibírá krystalickou vodu a mění se v krystalický dihydrát síranu vápenatého.

Velmi jemné krystalky sádry vzájemně prorůstají a váží celek v kompaktní hmotu. Složením směsi lze v omezené míře měnit jejich technologické vlastnosti. Sádrové směsi mohou obsahovat tyto přísady podle / 42 /.

Tabulka 1.4 Přehled přísad sádrových směsí

| Druh přísady        | Obsah v % |
|---------------------|-----------|
| sádra               | 30 - 100  |
| azbest              | 40 - 50   |
| mastek              | 19 - 30   |
| křemenná moučka     | 5 - 80    |
| hlína ( hrnčířská ) | 0 - 10    |
| křemenný písek      | 0 - 50    |
| kristobalit         | až 70     |
| vápno               | až 1,5    |
| portlandský cement  | až 5      |
| bromid amonný       | 0,25 - 3  |

Azbest zvyšuje pórovitost, zlepšuje mechanické vlastnosti sádrových forem. Křemenná moučka zmenšuje objemové změny sádrové směsi při tuhnutí. Mastek, vápno a cement též ovlivňují objemové změny podobně jako křemenný



písek. Bromid amonný se při vypalování forem rozkládá na plynné látky, čímž se zvyšuje prodyšnost forem.

Vedle uvedených přísad se uvádí ještě další, méně často používané jako na příklad kyselina boritá (1 - 2 %) vodní sklo alkalické, které zvyšuje pevnost a odolnost forem proti otěru, hlinitan vápenatý (2,5 - 12 %) a oxid zinečnatý, které zpomalují tuhnutí a zvyšují pevnost formy. Směs, která se nejvíce osvědčila podle / 20 / pro odlévání slitin hliníku má následující složení ( hmotnostní podíly ):

65 % alabastrové práškové sádry

28 % křemenné moučky FF

2 % jemně mleté křemeliny

5 % jemně mletého mastku.

Nejčastěji pro přípravu sádrových směsí se používá prášková sádra MG 11 druh II podle TGL 21 843 ( výrobce Gipswerk Stadtfeldendorf - NDR ). Tato sádra se nazývá alabastrová. Dále se používá sádra tuzemského původu, která je známá pod názvem stavební, výrobce SOSD, národní podnik Ostrava, závod Kobeřice u Opavy. Kromě těchto směsí vyrobených z uvedených sáder se používají některé zatmelovací hmoty ( běžně používané v dentální technice ), označované obchodním názvem GARASIN, GLORIA, EXPADENTA atd, jejichž složení a původ výrobce Dental, Jičín neuvádí.

Sádrové směsi je možno podle přípravy a zhotovování sádrové břečky dělit na sádrové směsi nenapěňené a napěňené. Nenapěňené sádrové směsi se připravují přímo smícháním s vodou v příslušném poměru podle časového rozpisu přípravy.

1. Sypání sádrové směsi do vody - doba 15 s.
2. Míchání sádrové směsi s vodou - doba 30 s.
3. Poklepávání nádoby se sádrovou břečkou, čímž se docílí odplyňování - doba 35 s.
4. Homogenizační míchání - 20 s.
5. Odlévání sádrové břečky a výroby forem se provádí ve 110. s. od počátku přípravy.

Napěňné sádrové směsi jsou připravovány dle metody Gypson - Hydroperm se připravují přidáním malého množství povrchově aktivní látky - pěnidla, které způsobují při rozdělávání s vodou její napěnění. Pěnidla jsou látky, které chemickou reakcí uvolňují plyn. Na příklad jako uhličitany a zředěné kyseliny peroxid vodíku s čpavkem, případně se do směsi s organickým pěnidlem speciálními metodami mixování vmíchává vzduch. Pěnidla se přidávají, buď do suché směsi (pokud se jedná o suchá napěňovadla) nebo do sádrové kaše ve formě předem úfipravené pěny. Podle tohoto, jakým způsobem se pěnidla (napěňovadla) přidávají do sádrové kaše a v jaké formě, pak se technologická příprava napěňné sádrové smědi dělí na přípravu jednofázovou a dvoufázovou, což je patrné z tabulky 1.5.

Tabulka 1.5 Přehled napěňovadel sádrové směsi

| Forma napěňovadel | Napěňovadlo        |                          | kaše              |
|-------------------|--------------------|--------------------------|-------------------|
|                   | vody               | přidávané do suché směsi |                   |
| prášek            | jednofáz. příprava | jednofáz. příprava       |                   |
| kapalina          | jednofáz. příprava |                          |                   |
| pěna              |                    |                          | dvoufáz. příprava |



Po ztuhnutí takto vyrobené sádrové směsi je vzniklé hmota prostoupěna jemnými bublinkami a vyznačuje se poměrně vysokou prodyšností, která odpovídá 150 n.j.p.

Jednofázová příprava se nejčastěji používá při výrobě napěněných sádrových forem. Do nádoby s příslušným množstvím vody přidáme určité množství napěňovacího. Do takto připraveného roztoku následuje:

1. Sypání sádrové směsi - doba 15 s.
2. Míchání sádrové směsi - doba 30 s.
3. Napěňování směsi vhodným míchadlem po dobu 110 s.
4. Odlévání napěněné sádrové břečky a výroby forem se provádí ve 155. s.

Dvoufázová metoda - v první fázi se připraví saponátová emulze a její napěnění. Ve druhé fázi se přidává určité množství pěny do sádrové kaše, která se zhomogenizuje. Tím získáme napěněnou sádrovou kaši.

Dvoustupňová metoda dosahuje lepších výsledků v kvalitě napěnění, jako vhodné napěňovací se používá ETOXON EPA, ze kterého se vytváří hustá pěna, která se vmíchává do sádrové kaše.

### 1.3 Formy ze sádrových směsí

Hlavním problémem, který vzniká při výrobě forem ze sádrových směsí je dosažení dostatečné prodyšnosti. Tu lze dosáhnout vhodným složením sádrových směsí a dokonalým dodržáním postupu tepelného zpracování těchto forem. Na závadu je také sklon forem k navlhání. Navlhnutí forem z těchto směsí má za následek odpařování a tím podstatné zhoršení kvality odlitků. Proto se přidávají do sádrových

směsí přísady, které umožňují regulovat dobu tuhnutí, roztežnost při tuhnutí a tvrdnutí, zvyšovat prodyšnost forem.

Od sádrových forem vyžadujeme tyto vlastnosti:

- dostatečnou prodyšnost
- dostatečnou pevnost a oddolnost proti zborcení při liti
- minimální změnu rozměrů
- při ohřevu na vyšší teploty se nesmí tvořit výrazné praskliny na lici formy.

Těchto vlastností lze dosáhnout vhodným složením sádrové směsi a dodržení optimálního režimu tepelného zpracování.

#### 1.3.1 Výroba forem ze sádrových směsí

Formy ze sádrových směsí se vyrábějí obléváním modelu kašovitou břečkou ( to je směs sádrové směsi a vody ). Tato břečka je dosti lehká a dodává lesklý a hladký povrch těmto formám. Zvětšováním objemu sádry při tuhnutí má za následek lepší zaplnění formy a dobré kopírování modelu. Sádrová břečka vytvořená promícháním práškové sádry ve vodě rychle tuhne, kde doba tuhnutí závisí na:

- a) druhu sádry, event. sádrové směsi
- b) množství rozdělovací vody
- c) teplotě rozdělovací vody
- d) jemnosti sádry
- e) předpravě břečky.

Při malém obsahu rozdělovací vody se směs špatně lije, značně houetne, rychle tvrdne a vylučuje větší množství tepla za současného zvětšování objemu. Se vzrůstající teplotou vody se prodlužuje doba tuhnutí směsi.



Proto se musí pro přípravu břečky používat voda teplá  
18°C podle literatury / 20 /.

## 2.0 ZÁKONITOSTI TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ FOREM ZE SÁDROVÝCH SMĚSÍ

Při odlévání tekutého kovu do forem ze sádrových směsí dochází na rozhraní forma - kov k intenzivnímu odpařování vlhkosti, nejčastěji vody v dílech těchto forem, která byla dodána při výrobě sádrové břečky. Jedná se o vodu volnou a vodu vázanou. Voda volná je určena vodním poměrem v/s, voda vázaná tak zvaným dihydrátem, event. polohydrátem síranu vápenatého.

Z tohoto důvodu je nutno formy tepelně zpracovávat (sušit a žíhat). Při sušení se odstraňuje voda volná, žíháním odstraňujeme vodu vázanou - krystalickou. Proces tepelného zpracování forem ze sádrových směsí je důležitou součástí jejich výroby, čímž dosahujeme vhodné prodyšnosti a vhodných vlastností, které jsou spojeny s výrobou kvalitních odlitků.

### 2.1 Vlhkost sádrové formy / 41 /

Vlhkou sádrovou formu z hlediska tepelného zpracování lze si představit jako systém složený pouze ze 2 složek:

1. absolutní suché látky (s nulovým obsahem vlhkosti) - skáletem
2. vody. Tato představa je zjednodušená.

Existence suché látky je však vyjimečná, proto se zavádí v praxi pojem sušina. Tak se označuje látka sušená při teplotě  $105^{\circ}\text{C}$  do konstatní hmotnosti. Obsah vlhkosti v tepelně zpracovávané sádrové formě se nechá vyjádřit různým způsobem, v technické praxi se udává pomocí



podílu vlhkosti  $w$  ( dříve označované jako relativní vlhkost ), což je dáno poměrem hmotnosti vody a hmotnosti vlhké formy.

$$W = \frac{m_w}{m_{poč}} \cdot 100 = \frac{m_{poč}' - m_{kon}}{m_{poč}'} \cdot 100 [\%] \quad ( 2.1 )$$

kde  $m_w$  - hmotnost vody obsažené ve formě  
 $m_{poč}$  - hmotnost nevysušené sádrové formy  
 $m_{kon}$  - hmotnost formy po tepelném zpracování

Pro určení obsahu vody je lépe použít měrné vlhkosti, neboť je vztažena k sušině, která je během celého procesu konstantní. Vztah mezi měrnou vlhkostí  $u$  a hodnotou podílu vlhkosti  $w$  platí:

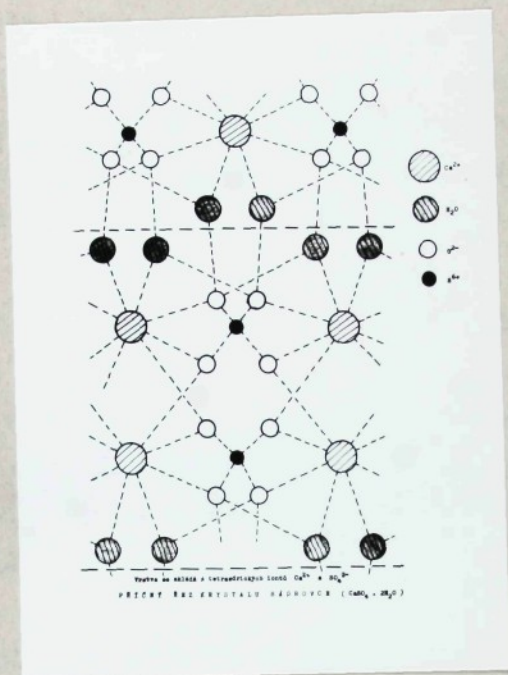
$$u = \frac{w}{100 - w} \cdot 100 [\%] \quad ( 2.2 )$$

### 2.1.1 Vazby vody v sádrové formě

Charakter vazby vody v sádrové formě je závislý na druhu látky, na jejím složení atd. Schematické znázornění vazby vody v dihydrátu síranu vápenatého je znázorněno na obr. 2.1.

Vodu vázanou lze dělit podle vazební energie na:

- vodu vázanou fyzikálně mechanicky ( kapilární )
- vodu vázanou fyzikálně chemicky ( na povrchu částic )
- vodu vázanou chemicky jako součást vnitřní struktury.



Obr. 2.1 příčný řez krystalu sádrovce /3/

Voda vázaná fyzikálně mechanicky - označuje se jako voda plastická a směřovací podle / 41 /. V sádrové formě se tato voda udržuje pouze kapilárními silami, obklopuje pevné částice formy vodním obalem, vyplňuje kapiláry, póry a dutiny a vytváří na povrchu látky vodní hladinu. Zachovává si vlastnosti kapalně vody, její množství závisí na velikosti pórů a dutin. Takto vázaná voda v sádrové formě se označuje jako voda volná.

Voda vázaná fyzikálně chemicky se označuje jako absorpční osmotická. Svými vlastnostmi se liší od vody volné,



Tato voda se chová jako pevná látka pouze dlouhodobým sušením se nechá odstranit / 41 /, označuje se jako voda vázaná.

Voda vázaná chemicky označuje se jako voda krystalická, je vázaná přímo v krystalech tuhé látky. Při běžném sušení ani při teplotě  $105^{\circ}\text{C}$  se neodstraní. Uniká při vyšších teplotách, při žhání, <sup>V</sup> problematice sušení se neuvažuje.

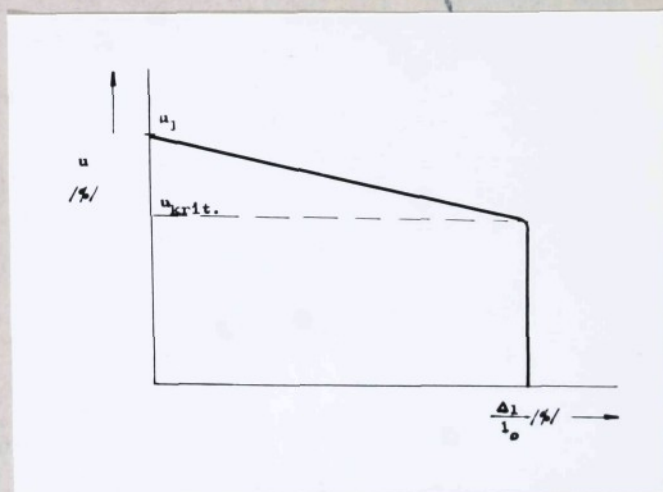
## 2.2 Vliv tepelného zpracování na vlastnosti forem ze sádrových směsí

V důsledku tepelného zpracování dochází nejen ke snižování obsahu vlhkosti ( vody ) takto zpracovávané formy, ale také k jejímu smršťování. To se vysvětluje tím, že během tepelného zpracování, hlavně sušením se odstraňuje voda mechanicky vázaná, tím se zmenšuje vodní obsah částic ( molekul, atomů ) a ty následkem působení molekulárních sil se vzájemně přitahují a vyplňují postupně prázdný prostor po odstranění vodě, což se navenek projevuje zmenšením rozměrů - smrštěním.

Podle dnešních názorů, založených hlavně na rentgenologickém vyšetření tvoří ionty  $\text{Ca}$  a  $\text{SO}_4$  u dihydrátu síranu vápenatého vrstvy, které jsou od sebe odděleny molekulami krystalické vody. Vrstvy vody u řetězců  $\text{CaSO}_4$  souhlasí se směrem štěpitelnosti. Při odstraňování se oddělí voda uložená mezi vrstvami. Zůstanou po ní kanálky, do kterých může voda zase vniknout a vázat se jako u původního dihydrátu. U polohydrátu zůstává mezi ionty  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{SO}_4^{2-}$ .

ještě část krystalické vody, které se dá vypudit jen při vyšší teplotě podle SEDLÁČKA /45 /.

Chování forem ze sádrových směsí ( sádrových forem ) v procesu tepelného zpracování je rozmanité. Proto je při tomto procesu snaha ovlivňovat nepříznivé změny ( na př. vznik trhlin, pokles mechanické pevnosti atd.). Z tohoto důvodu se zavádí pojem citlivost látek, což se vyjadřuje jako jejich náchylnost k těmto změnám. Mezi nejpoužívanější kritéria <sup>patří</sup> citlivost k sušení podle Bigotovy křivky, která vyjadřuje závislost vlhkosti jako funkci změny rozměru k celkovému jejímu rozměru.



Obr. 2.2 Bigotova křivka

Někdy se citlivost sušení udává pomocí součinitele citlivosti, který je dán poměrem intervalu vlhkosti Bigotovy křivky.



Tabulka 2.1

Určující rozměry pro různé tvary geometrických těles / 52 /

| Geometrický útvar  | Rozměry útvaru               | Plocha, $S$ / $m^2$                      | Objem, $V$ / $m^3$                 | Určující rozměr $R = V/S$                              | Charakt. rozměr   |
|--------------------|------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------|
| Kvádř              | $a, b, c$                    | $2(ab + bc + ac)$                        | $abc$                              | $\frac{1}{2(\frac{a}{b} + \frac{a}{c} + \frac{a}{b})}$ | -                 |
| Hranol             | $a, b, c \gg a$              | $\sim 2c(a + b)$                         | $abc$                              | $\sim \frac{1}{2(\frac{a}{b} + \frac{a}{c})}$          | -                 |
| Krychle            | $a, a, a$                    | $6a^2$                                   | $a^3$                              | $\frac{a}{6}$                                          | $\frac{a}{L}$     |
| Válec              | $a = H$<br>$a = b = D$       | $\pi D(\frac{D}{2} + H)$                 | $\frac{\pi D^2}{4} \cdot H$        | $\frac{1}{2(\frac{D}{2} + \frac{H}{D})}$               | $\frac{D}{L}$     |
| Válec              | $a = b = c = H$              | $\frac{3}{2} \pi D^2$                    | $\frac{\pi D^3}{4}$                | $\frac{D}{6}$                                          | $\frac{D}{L}$     |
| Válec              | $a = b = D$<br>$c = H \gg D$ | $\sim \pi DH$                            | $\frac{\pi D^2}{4} \cdot H$        | $\frac{D}{4}$                                          | $\frac{D}{L}$     |
| Trubice            | $D - d, H$                   | $\pi(D + d) \cdot (\frac{D - d}{2} + H)$ | $\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \cdot H$ | $\frac{1}{2(\frac{D}{2} + \frac{H}{D})}$               | $\frac{D - d}{L}$ |
| Trubice            | $H \gg D - d$                | $\pi(D + d) \cdot H$                     | $\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \cdot H$ | $\frac{1}{2(\frac{D}{2} + \frac{H}{D})}$               | $\frac{D - d}{L}$ |
| Trubka tenkostěnná | $d, D, H$                    | $\sim \pi(D + d) \cdot H$                | $\frac{\pi}{4}(D + d) \cdot H d$   | $\frac{1}{2(\frac{D}{2} + \frac{H}{D})}$               | $\frac{dD}{L}$    |
| Koule              | $a = b = c = D$              | $\pi D^2$                                | $\frac{\pi D^3}{6}$                | $\frac{D}{6}$                                          | $\frac{D}{L}$     |
| Deska              | $a, b, da$                   | $\sim 2ab$                               | $abda$                             | $\frac{da}{2}$                                         | $\frac{da}{L}$    |



$$K_c = \frac{u_1 - u_{kr}}{u_{kr}} \quad ( 2.3 )$$

kde  $K_c$  - součinitel citlivosti  
 $u_1$  - počáteční vlhkost formy  
 $u_{kr}$  - kritická vlhkost formy

Bigotova křivka však platí za ideálních podmínek, kdy vlhkost ve formě je v celém objemu konstatní. Ve skutečnosti je však při sušení ve formě gradient vlhkosti, který je následkem její nerovnoměrné rozloženosti, což vede ke vzniku deformace těchto forem.

Deformace, které nastávají v průběhu tepelného zpracování těchto forem, jsou způsobené vzrůstem molekulárních sil. Důsledkem je pak nerovnoměrná změna rozměrů formy po tepelném zpracování. Následkem smrštění může být i vnitřní pnutí, které způsobuje popraskání forem (povrchových vstev). Dalším důležitým faktorem při tepelném zpracování forem je určující rozměr formy  $R = V/S$  ( objem formy/ povrch formy ). ŠUMILIN / 52 / dospěl k názoru, že čím je větší určující rozměr formy  $R$ , tím jsou větší výkyvy sušicího procesu. Určující rozměry pro různé tvary geometrických těles jsou patrné z tabulky 2.1.

Teorie tepelného zpracování, resp. sušení a žihání porovitých těles, což sádrové formy představují, podle LYKOVA / 31 / vychází ze znalosti energie vazby vody v tělese a její závislosti na obsahu vlhkosti, kterou lze určit ze vztahu:



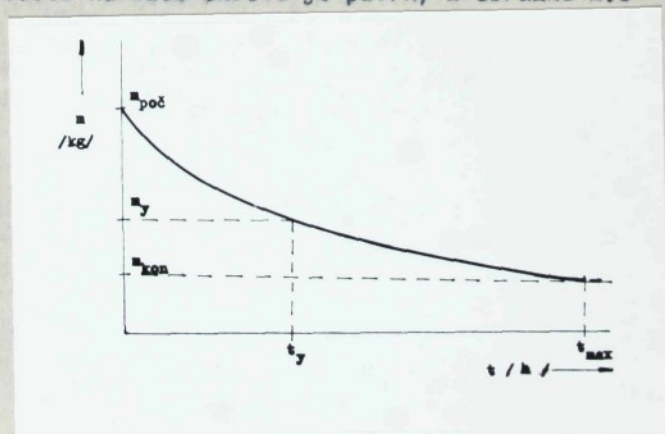
$$w = - m_{\text{poč.}} \cdot \int_w^0 e(u) \cdot du \quad (2.4)$$

kde  $e(u)$  - měrná vazebná energie

$m_{\text{poč.}}$  - hmotnost tělesa před tepelným zpracováním

Energie potřebná k tepelnému zpracování (potřebná k překonání vazby vody v tělese), je závislá na určujících podmínkách (rychlosti sušení, způsobu proudění média).

Vloží-li se sádrová forma o počáteční hmotnosti do sušicího prostředí o určité teplotě, začne se uvolňovat vlhkost z povrchových vrstev formy, což se projeví v určitém časovém okamžiku snížením hmotnosti formy. Po určité době se tato hmotnost ustálí na konečné hodnotě  $m_{\text{kon.}}$  za postupného odstranění vody z vnitřních částí formy. Obecný průběh změny hmotnosti tělesa při jeho ohřevu na teplotu v závislosti na čase ohřevu je patrný z obrázku 2.3



Obr. 2.3 Závislost úbytku hmotnosti na čase

Teorie tepelného zpracování sádrových forem vychází z předpokladu, že rychlost sušení, event. žíhání je definována podle LYKOVA / 29 /:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} \quad (2.5)$$

V průběhu tepelného zpracování sádrových forem je důležitý vliv jejich rozměrů, což představuje součinitel úměrnosti  $\alpha$ . Pomocí tohoto součinitele můžeme vyjádřit rychlost sušení a obdržíme vztah (2.6). Protože řídicím procesem tepelného zpracování je difuze, pak součinitel  $\alpha$  představuje také zároveň rychlostní součinitel difuze.

$$\frac{dm}{dt} = \alpha \cdot \frac{m_y - m_{kon}}{m_{kon}} \quad (2.6)$$

kde  $v$  - rychlost tepelného zpracování díla

$m_x$  - hmotnost sádrového dílu v určitém časovém okamžiku tepelného zpracování

$m_{kon.}$  - konečná hmotnost sádrového dílu

$\alpha$  - součinitel úměrnosti

Řešením vztahu (2.5 a 2.6) obdržíme diferenciální rovnici a po dosazení okrajových podmínek dostáváme vztah:

$$\ln \frac{m_{poč} - m_{kon}}{m_y - m_{kon}} = - \alpha \cdot \frac{t}{m_{kon}} \quad (2.7)$$



kde  $t$  - doba tepelného zpracování

Výpočtem některé neznámé hodnoty ze vztahu ( 2.7 ) získáme obraz o probíhající tepelné zpracování.

## 2.2.1 Pohyb vody tepelně zpracovávanou formou

Tento pohyb závisí na fyzikálních vlastnostech sádrové formy, ale i na vazbě vody v látce. Při sledování pohybu vody v sádrové formě je důležitá její struktura, měrné teplo, tepelná a teplotní vodivost, jakost povrchu, vlhkost, součinitel difuze vody, vliv teplotního a vlhkostního spádu. Dále se projevuje vliv vody, její druh, měrná hmotnost, měrné teplo, viskozita, povrchové napětí, bod varu, tlak par, rovnovážná a hyroskopická vlhkost. Vlastní pohyb vody v kapalně nebo plynné formě je způsoben rozdílem tlaků vyvolaných úbytkem vody v povrchových vrstvách sušené formy a rozdílem teplot na povrchu a uvnitř formy. S úbytkem vody během tepelného zpracování, resp. sušení, ustupuje hladina sušení do vnitřku sušené látky a tím stoupá podíl vody, která se pohybuje sušenou látkou ve formě páry k jejímu povrchu. Při procesu sušení těchto forem je důležitá intenzita toku vody  $I_w$  touto formou / 41 /:

$$I_w = I_m + I_t = -k \cdot \rho_f \cdot \frac{du}{dt} - k \cdot \rho_f \cdot d' \cdot \frac{dT}{dt} \quad ( 2.8 )$$

kde  $I_m$  - intenzita toku vody vlivem hmotnostního spádu

$I_t$  - intenzita toku vody vlivem teplotního spádu

$\rho_f$  - střední měrná hmotnost sádrové formy po tepelném zpracování

k - součinitel vlhkostní vodivosti vlivem vlhkostního spádu

d' - součinitel vlhkostní vodivosti vlivem teplotního spádu

Součinitel vlhkostní vodivosti představuje danou vlhkost formy. Mění se konstanta, neboť závisí na teplotě a na průběhu tepelného zpracování. / 41 /.

### 2.2.2 Odpařování vody z povrchu formy ze sádrové směsi

Toto odpařování je závislé na přestupu tepla do tepelně zpracovávané formy na fyzikálních vlastnostech vzduchu, termodynamických poměrech, převážně v sušicí atmosféře, která je definována teplotou, tlakem, rychlostí a charakterem proudění. Při řešení podmínek tepelného zpracování je třeba klást největší důraz na proces současně výměny tepla a látkový transport mezi sušicí atmosférou a povrchem sušené formy, jejímž důsledkem jsou termodynamické změny vzduchu.

Látkovým transportem rozumíme přenos difundující vlhkosti ( vody ) v podobě par z povrchu sušené, resp. tepelně zpracovávané sádrové formy do sušicí atmosféry. Tento proces popisuje intenzita sušení  $I_s$ , která vyjadřuje odpařené množství vody za jednotku času z plošné jednotky povrchu sádrové formy. Tato intenzita je definována vztahem / 41 /

$$I_s = \beta_p (p_{pm} - p_p) = \beta_x (X_m - X_p)$$

( 2.9 )



- kde  $\beta_p$  - součinitel přenosu transportované vody  
vztahený na rozdíl parciálních tlaků
- $\beta_x$  - součinitel přenosu transportované vody  
vztahený na rozdíl měrných vlhkostí
- $p_p$  - parciální tlak vodní páry v sušící atmosféře
- $p_{pm}$  - parciální tlak vodní páry nad sádrovou for-  
mou při teplotě jejího mokrého povrchu
- $x_m$  - měrná vlhkost vzduchu na povrchu tepelně zpra-  
covávané formy
- $x_v$  - měrná vlhkost vzduchu atmosféry tepelného  
zpracování

Při odpařování vody z tepelně zpracovávané sádrové  
formy je určující veličinou sušící rychlost a vnitřní  
podmínky sušení.

## 2.3 Zákonitosti přenosu tepla při tepelném zpracování forem ze sádrových směsí

Má-li být zvládnutý proces tepelného zpracování sá-  
drových forem, je nutno zvládnout zákonitosti přenosu te-  
pla mezi stýkajícími se prostředím ( to je mezi atmos-  
férou tepelného zpracování a tepelně zpracovávanou for-  
mou ), ale také přenos tepla v samotné formě.

### 2.3.1 Přenos tepla mezi formou a sušící atmosférou

Uvažujeme-li, že při tepelném zpracování sádrových  
forem, atmosféra obklopuje formu a obě tato prostředí se  
liši jiným tepelným obsahem a jinou teplotou. Teplo, kte-  
ré přechází z atmosféry do forma za jednotku času přes  
mezifázový styčný povrch, je definováno vztahem

$$dq = \alpha \cdot S (T_1 - T_2)$$

( 2.10 )

kde  $T_1$  - teplota atmosféry

$T_2$  - teplota povrchu formy

$\alpha$  - součinitel přestupu tepla

$S$  - styčný povrch formy

### 2.3.2 Přenos tepla vedením v sádrové formě

Materiál sádrové formy představuje složitý systém, proto při tepelném zpracování musíme uvažovat tepelné děje při neustálých podmínkách ( nestacionární děje ). Proces nestacionárního sdílení tepla je pro řešení velmi komplikovaný, protože v každém časovém okamžiku se mění teplota nejen časově, ale i prostorově. Problematika nestacionárního sdílení tepla je popsána diferenciální rovnicí:

$$\frac{\partial(\rho c_v T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_z \quad ( 2.11 )$$

kde  $T$  - teplota v určitém časovém okamžiku místa ve formě

$t$  - čas

$x, y, z$  - souřadnice místa formy, jež popisuje teplotní a časovou závislost

$c_v$  - měrné teplo

$\rho$  - měrná hmotnost

$q_z$  - energie vnitřních zdrojů

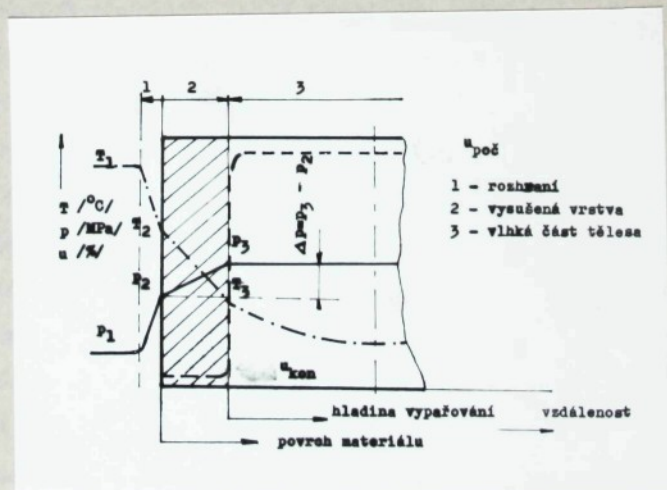


$\lambda$  - součinitel tepelné vodivosti  
 $/W.m^{-1}.K^{-1}/$

Uvedená diferenciální rovnice ( 2.11 ) určuje rozložení teplot v tělese v závislosti na čase, lze z této rovnice stanovit dobu ohřevu tělesa, resp. sádrové formy. Při její integraci získáme čas potřebný k požadované změně teploty. Je nutné znát okrajové podmínky na rozhraní tělesa a okolního prostředí.

## 2.4 Fyzikálně chemický popis tepelného zpracování sádrových forem

V průběhu tepelného zpracování sádrových forem probíhají složité fyzikálně chemické pochody, jejichž základem jsou difuzní děje. V průběhu tohoto procesu se sleduje tlak, teplota a vlhkost tepelně zpracovávané formy. Na obrázku 2.4 je znázorněn průběh tlaku, teploty a vlhkosti v určitém časovém okamžiku tepelného zpracování, resp. sušení v závislosti na tloušťce formy.



Obr. 2.4 Schematické znázornění rozdělení teploty vlhkosti a tlaku v určitém okamžiku tepelného zpracování /40/

Proces tepelného zpracování je podmíněn velikostí parciálního tlaku par vlhkosti ( vody ) v atmosféře tepelného zpracování, resp. sušení a parciálního tlaku vlhkosti na povrchu formy. Tento proces probíhá za předpokladu, že parciální tlak par vlhkosti v sušící atmosféře  $p_1$  je menší než parciální tlak vlhkosti  $p_2$  na povrchu tepelně zpracovávané formy. Rozdíl teplot  $T_1 - T_2$  ovlivňuje rychlost přestupu tepla, neboť je závislý na teplotní vodivosti. Hnací silou průchodu tepla vrstvou sušené formy je rozdíl teplot  $T_2 - T_3$ . Podmínkou pro odstraňování vody z této formy je rozdíl parciálních tlaků  $p_3 - p_2$ . Tento rozdíl je hnací silou difuze vlhkosti z vnitra formy k jejímu povrchu. Podle schopnosti propouštění tepla formou do jejího středu dochází ke zvyšování teploty a tímto směrem postupuje i hladina vypařování. Vzdálenost hladiny vypařování resp. sušení od povrchu formy vzrůstá. Tento vzrůst závisí na intenzitě tepelného zpracování.

Fyzikálně chemický model tepelného zpracování forem, lze charakterizovat jako soustavu, na kterou působí vnější vliv a tím se tato soustava snaží o dosažení původního stavu. Uvažujeme-li tento děj izobarický, pak je mírou této snahy změna termodynamické funkce  $\Delta G$  ( změna Gibbovy energie ), která doprovází uvažovaný děj. Změna Gibbovy energie představuje maximální množství energie, která se při tomto pochodu ze soustavy uvolní a je schopna konat práci. Jak je ze zákonů fyzikálně chemických patrné, samovolně probíhají jen děje, při kterých je změna Gibbovy energie menší než nula (  $\Delta G < 0$  ) nebo Gibbova energie klesá.



#### 2.4.1 Přenos vody při tepelném zpracování sádrových forem

Zpracovává-li se tepelně sádrová forma, která je vložena do atmosféry tepelného zpracování, pak každé toto prostředí obsahuje jiné množství vody. Pohyb vody při tepelném zpracování je dán rozdílnou koncentrací, neboť vody přechází z míst s větší koncentrací do míst s koncentrací nižší. Množství vody, které projde za sekundu styčnou plochou  $S$  sádrové formy do sušicího prostředí je dáno vztahem:

$$q_w = \bar{\beta} \cdot S \cdot (C_1 - C_2) \quad (2.12)$$

- kde  $C_1$  - průměrná koncentrace vody v sádrové formě  
 $C_2$  - průměrná koncentrace vody v sušicí atmosféře  
 $\bar{\beta}$  - součinitel přestupu vody dotykem  
 $S$  - styčná plocha formy

V průběhu zahřívání formy se styčná plocha nemění, avšak hodnota rozdílu koncentrací je závislá na čase, a proto tento děj je označován jako nestacionární. V nejširším slova smyslu difuzi (přenos hmoty vedení) rozumíme pohyb vody, jehož příčinou jsou náhodilé pohyby atomů vody při tepelném zpracování formy. Statistickým souhrnem těchto náhodilých pohybů je pohyb orientovaný nebo-li celkový tok vody podle  $/l/$  směrem k prostoru s menší koncentrací, který trvá až do úplného vyrovnění koncentrací v obou místech. Matematicky difuze se popisuje Fickovými zákony.

## 2.4.2 Termodynamický popis tepelného zpracování sádrových forem

Tepelné zpracování sádrových forem, které se skládá ze sušení a žíhání je z hlediska termodynamiky složitý pochod zahrnující v sobě široký komplex rozmanitých dějů staticky a dynamicky popsaných. Nosnou částí tohoto procesu je sušení, při kterém se odstraňuje největší podíl vlhkosti ( vody ) z formy. Proto se tímto procesem bude podrobněji zabývat.

Statika sušení definuje děj pouze z hlediska počátečních a konečných podmínek sušené formy a definuje děje látkovými a energetickými bilancemi, ze kterých se může určit pouze spotřeba sušicího média / 40 /.

Kinetika sušení definuje rychlost změny vlhkosti za různých podmínek sušení. Důležitou součástí jsou děje spojené s přechodem tepla a sdílením hmoty.

Dynamika sušení definuje časový průběh ( křivku sušení ) který se týká úbytku vody, ale i teplotních polí v procesu sušení v určitém místě formy. Dynamický průběh sušení je spojen se složitými zákony nestacionárního vedení tepla a vlhkosti. Předpokladem úspěšného řešení je znalost číselných hodnot, které charakterizují vnější i vnitřní podmínky sušení.

Vnější podmínky sušení, které se týkají přenosu tepla a hmoty rozpracoval LYKOV / 29 /.

Vnitřní podmínky, které se týkají znalosti sušené látky v našem případě sádrové formy, nejsou dosud rozpracovány.



V praxi se řeší experimentálně, nejčastěji chováním látky v průběhu sušení, což znázorňuje křivka sušení.

Z obr. 2.5 je patrná závislost intenzity sušení vlhkosti a teplota sušení na čase, kdy křivky představují:

- 1 - časový průběh změny hmotnosti ( úbytek vody v sádrové formě )
- 2 - časová závislost změny vlhkosti ( křivka vzniká derivací křivky sušení )
- 3 - teplotní křivka, která zachycuje průběh teplot v závislosti na čase

1. Křivka sušení  $u = f(t)$

2. Křivka rychlosti sušení  $\frac{du}{dt} = f(t)$

3. Teplotní křivka  $T = f(t)$

Body na obrázku 2.5 představují:

- 1 - počáteční stav
- 2 - stav prohrátí
- 3 - kritický stav
- 4 - hygroskopický stav
- 5 - rovnovážný stav

kde  $T_a$  - teplota vzduchu při sušení

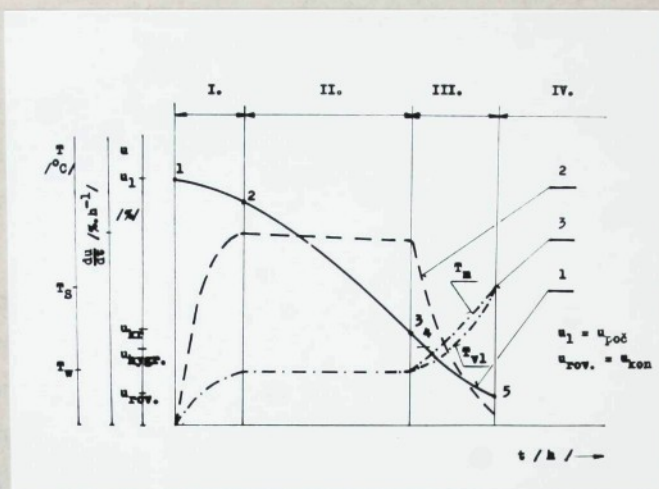
$T_w$  - teplota vlhkého materiálu

$T_m$  - teplota materiálu ( formy )

$T_{vl}$  - teplota vnitřku materiálu ( formy )

Křivkám na obrázku 2.5 odpovídají 4 základní úseky průběhu sušení.

I. Úsek vzrůstající rychlosti sušení představuje nestacionární úsek sušení, se vzrůstem rychlosti sušení z hodnoty odpovídající samovolnému sušení přechází na hodnotu sušicího režimu.



Obr. 2.5 Závislost intenzity sušení vlhkosti a teploty sušení na čase /41/

Úbytek vlhkosti je nepatrný, křivka teploty má vzrůstající charakter. Zahříváním látky teplota vzrůstá. Vzniká teplotní spád ve směru do středulátky a je závislý na rychlosti ohřevu a na vlastnostech látky. Již v tomto úseku sušení dochází k počátečním objemovým změnám sušené látky /41 /.

- II. Úsek konstatní rychlosti sušení, velikost rychlosti sušení je dána tangentou úhlu sklonu křivky sušení. V tomto úseku dochází k odpařování vody volné, kdy povrch látky je tak vlhký, že se chová jako volná hladina kapaliny. / 41 /. Teplota povrchu látky se postupně snižuje do jejího nitra. Postupné úbytky vlhkosti jsou rovnovážné a odpovídají lineárnímu průběhu smrštění, které je ukončeno úplným odpařením vody volné.



K tomu dochází na konci tohoto úseku v t. zv. kritickém bodě, při kritické vlhkosti, která se blíží hygroskopické.

III. Úsek klesající rychlosti sušení je charakteristický pro poslední část stádia sušení. Zde se odpařuje voda vázaná fyzikálně chemicky. Pro křivku sušení je typický její průběh, kdy se asymptoticky blíží k nule. Vlhkost látky klesá až na hodnotu konečnou, která je rovna vlhkosti rovnovážné. Teplota látky se zvyšuje za současného vzniku teplotního spádu směrem do středu sušené látky a blíží se teplotě sušící atmosféry / 41 /.

IV. Úsek rovnovážného stavu následuje po úseku klesající rychlosti sušení, nesouvisí již s vlastním sušením, neboť sušení je již ukončeno. Zde je docíleno vyrovnaní teplot parciálních tlaků a vlhkosti v látce. Jednotlivé délky úseků ( period ) sušení a intenzita vypařování vlhkosti závisí na podmínkách sušícího prostředí / 9 /:

a) teplotě

b) relativní vlhkosti

c) rychlosti jejího šíření a na vlastnostech sušené látky  
( formy ) :

d) teplotě, vlhkosti

Žihání je ta část tepelného zpracování látek ( sádrových forem ), při kterém se z formy uvolňuje voda chemicky vázaná ( voda krystalická ). Tento děj je proti sušení z hlediska odstraňování vlhkosti méně podstatný, avšak při tepelném zpracování sádrových forem je mu nutno přikládat také význam.

### 3.0 VLASTNOSTI VLHKÉHO VZDUCHU V PROCESU SUŠENÍ SÁDROVÝCH FOREM

Při rozboru nejdůležitějších vlivů na tepelné zpracování sádrových forem je nutné se zabývat také atmosférou tepelného zpracování. Jak již bylo dříve řečeno, je sušení nosnou částí tepelného zpracování těchto forem (hlavně z hlediska odstraňování velkého množství vlhkosti), a proto budeme v této kapitole sledovat některé vlastnosti vlhkého vzduchu v procesu sušení.

Při sušení se ze sádrové formy odstraňuje voda volná a z části voda vázaná v dihydrátu a polohydrátu síranu vápenatého / 45 /. Při tomto procesu nastávají změny ve stavu vzduchu, který je tvořen směsí suchého vzduchu a vodní páry. Každá z obou těchto složek je zastupována v této směsi s určitým podílem a tomuto podílu přísluší určitý tlak, zvaný parciální. Suchý vzduch může na sebe pojmout určité množství páry. Bude-li vzduch vodní parou nasycen, pak jí bude odpovídat maximální parciální tlak. Tlak syté vodní páry je označován jako  $p_p$  a závisí pouze na teplotě. Závislost tlaku syté vodní páry na teplotě je patrné z tabulky 3.1

Tabulka 3.1:

|                      |        |        |        |        |        |       |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Teplota vzduchu /°C/ | 0      | 10     | 20     | 30     | 40     | 50    |
| $p_p$ /kPa/          | 0,622  | 1,251  | 2,383  | 4,325  | 7,520  | 12,67 |
| Teplota vzduchu /°C/ | 60     | 70     | 80     | 90     | 100    | 200   |
| $p_p$ /kPa/          | 20,310 | 31,770 | 48,290 | 71,490 | 103,32 | 1585, |

Ochlazením nasyceného vzduchu se část páry sráží a stane se při nižší teplotě přebytečnou ve formě alhy a pára se tak



stává vlhkou.

### 3.1 Fyzikální vlastnosti vzduchu

Relativní vlhkost  $\varphi\%$  vyjadřuje schopnost vzduchu přijímat vodní páru. Tato vlhkost je dána poměrem obsahu vodních par ( v určitém objemu vzduchu za daných podmínek ) k obsahu vodních par při stavu nasycení za stejné teploty. Místo hmotnosti lze uvažovat i poměr měrných hmotností vodní páry nebo parciálních tlaků.

$$\varphi = \frac{p_p}{p_p''} = \frac{m_p}{m_p''} \quad ( 3.1 )$$

kde  $p_p$  - parciální tlak páry  
 $p_p''$  - parciální tlak nasycené vodní páry  
 $m_p$  - měrná hmotnost páry  
 $m_p''$  - měrná hmotnost nasycené vodní páry

Měrná vlhkost vzduchu  $X$  označuje hmotnost par připadající na 1 kg suchého vzduchu:

$$X = \frac{m_p}{m_{sv}} \quad ( 3.2 )$$

kde  $m_p$  - hmotnost páry  
 $m_{sv}$  - hmotnost suchého vzduchu

Obě vlhkosti můžeme vzájemně přepočítat za předpokladu, že je znám tlak nasycení pro danou teplotu. Tento převod je možný za pomoci Mollierova diagramu.

### 3.1.1 Diagram vlhkého vzduchu

Mollierův (psychrometrický) diagram  $i - x$  umožňuje grafické znázornění změn, k nimž v průběhu jevu dochází. Je konstruován nejčastěji pro barometrický tlak vzduchu - 98,1 kPa, změny stavu probíhají za konstatního tlaku. Z diagramu lze vyčíst teplotu rosného bodu  $T_R$  pro daný stav vzduchu, což je teplota, při níž je vzduch o dané vlhkosti vodními parami právě nasycen a pára v něm obsažená se při dalším nepetrném ochlazení sráží v podobě mlhy. Dále z diagramu vyčteme teplotu mokrého teploměru  $T_{mp}$  (jejíž izoterma prochází průsečíkem křivky sytosti s čarou přibližně  $i = \text{konst.}$  jdoucí daným stavem vzduchu).

### 3.1.2 Změny stavu vzduchu v procesu sušení

Sledují-li se změny stavu vlhkého vzduchu uvažuje se, že jejich účast je při stále stejném množství suchého vzduchu. To je 1 kg, při tom množství páry  $x$  kg se mění.

Ohřívání vzduchu - při ohřívání vzduchu se mění měrná vlhkost vzduchu, probíhá tato změna z počátečního stavu 1 do stavu 2, což je patrné z obrázku 3.1

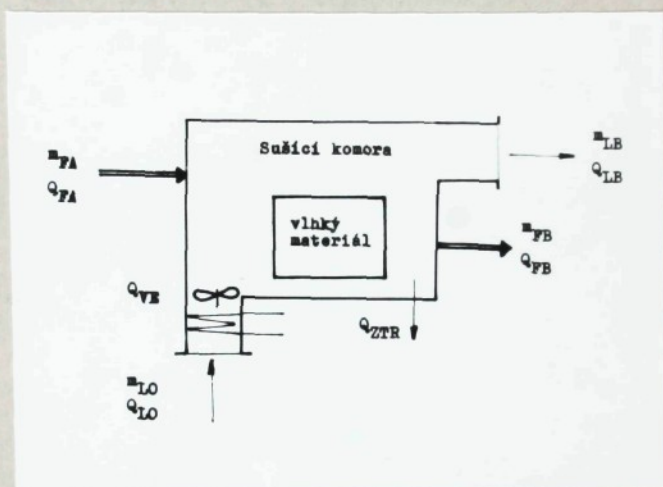
Odpařování vody bez přívodu tepla - je adiabatická změna k níž dochází v případech, kdy potřebné teplo odpařování se odebírá z okolí. Vlhčení vzduchu a výměna tepla mezi vzduchem a vodou ustane tehdy, je-li relativní vlhkost vzduchu 100 %. Pak v diagramu obrázek 3.2, je dán rovnovážný stav vzduchu nad hladinou odpařování průsečíkem izoentalpy.





### 3.2 Princip činnosti vzduchové sušárny

Při sledování činnosti této sušárny je nutné vycházet z podmínky, že  $p_s$  musí být větší než  $p_{H_2O}$  (parciální tlak vodních par na povrchu sušené látky musí být větší než parciální tlak vodních par obsažených v sušící atmosféře). Schematické znázornění sušícího zařízení - vzduchové sušárny je patrné z obrázku 3.3



Obr. 3.3 Schema vzduchové sušárny

- $m_{LA}$  - hmotnost vzduchu vstupujícího do sušárny
- $m_{LB}$  - hmotnost vzduchu vystupujícího ze sušárny
- $m_{FA}$  - hmotnost látky před sušením
- $m_{FB}$  - hmotnost látky po sušení
- $Q_{FA}$  - množství tepla obsažené v látce před sušením
- $Q_{FB}$  - množství tepla obsažené v látce po sušení
- $Q_{LA}$  - množství tepla vzduchu před vstupem do sušárny
- $Q_{BL}$  - množství tepla vzduchu na výstupu ze sušárny
- $Q_{OHŘ}$  - množství tepla přivedené ohřívatelem
- $Q_{VE}$  - množství tepla vzniklého prací ventilátoru



$Q_{ZTR}$  - energetické ztráty vzniklé nedokonalou izolací sušící atmosféry

Celková energetická bilance sušícího zařízení:

$$Q_{LA} + Q_{OHR} + Q_{VE} + Q_{FA} = Q_{LB} + Q_{FB} + Q_{ZTR} \quad (3.3)$$

Množství vody odstraněné z látky sušením lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta m_W = m_{FA} - m_{FB} = m_{LB} - m_{LA}$$

$$\Delta m_W = m_{sv} \cdot (d_B - d_0) = m_{sv} \cdot \Delta d$$

kde  $m_{sv}$  - hmotnost suchého vzduchu

$\Delta d$  - změna tepelného obsahu

Po úpravě rovnice (3.3) lze psát:

$$-Q_{LA} + Q_{LB} = Q_{FA} - Q_{FB} + Q_{VE} + Q_{ZTR}$$

$$Q_{LA} = m_{sv} \cdot j_A; \quad Q_{LB} = m_{sv} \cdot j_B$$

pro jednotková množství tepla lze psát vztah:

$$q_{LB} - q_{LA} = q_{FA} - q_{FB} + q_{VE} - q_{ZTR}$$

$$q_{LB} - q_{LA} = \frac{m_{sv}}{\Delta m_W} \cdot (j_B - j_A) = M_{sv} \cdot (j_B - j_A) \quad (3.4)$$

kde  $j_A$  - entalpie vzduchu na vstupu do sušárny

$j_B$  - entalpie vzduchu na výstupu ze sušárny

$M_{sv}$  - množství suchého vzduchu

Entalpie vzduchu na výstupu ze sušárny je dána vztahem:

$$j_B = j_A + \frac{1}{M_{sv}} \cdot (q_{FA} - q_{FB} - q_{ZTR} + q_{VE})$$

$$j_B = j_A + \frac{1}{M_{sv}} \cdot \Delta q''$$

podle poměru  $\frac{\Delta q''}{M_{sv}}$  lze blíže charakterizovat sušárnu.

$$\frac{\Delta q''}{M_{sv}}$$

= 0 - případ teoretické sušárny

$$q_{FA} \dot{=} q_{FB}, \quad q_{VE} \dot{=} q_{ZTR}$$

> 0 - sušení s přívodem tepla

$$q_{FA} > q_{FB}, \quad q_{VE} \dot{=} q_{ZTR}$$

< 0 - sušení s odvodem tepla

$$q_{FB} > q_{FA}, \quad q_{VE} \dot{=} q_{ZTR}$$

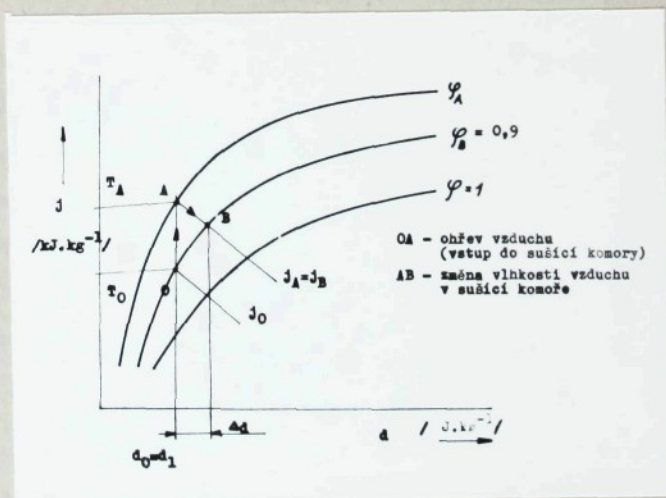
Pro případ teoretické sušárny platí  $j_A = j_B$ ,  $\Delta j = 0$ .

Množství tepla, které je třeba k ohřátí vzduchu:

$$Q_{OHŘ} = m_{sv} \cdot (j_A - j_0), \text{ pak pro jednotkové množství}$$

$$\text{tepla lze psát vztah: } q_{OHŘ} = \frac{Q_{OHŘ}}{m_W} = \frac{j_A - j_0}{\Delta d}$$

Znázornění ohřevu vzduchu a změny vlhkosti vzduchu v sušicí komoře je patrné z obr. 3.4



Obr. 3.4 Znázornění ohřevu vzduchu a změny vlhkosti vzduchu v sušicí komoře teoretické sušárny



#### 4.0 ODLITKY ZÍSKANÉ LITÍM DO FOREM ZE SÁDROVÝCH SMĚSÍ

Výroba odlitků získávaných ze sádrových forem není ve slévárenství neznámá. Je to jeden ze zvláštních způsobů výroby odlitků s nižší teplotou tavení převážně slitin neželzných kovů (Al, Mg, Zn, i některých slitin Cu). Odlitky se vyznačují zejména vysokou hladkostí povrchu, dobrou reprodukcí nejjemnějších detailů a velmi dobrou rozměrovou přesností. Přesnost těchto odlitků je závislá na celé řadě vlivů. Je dána přesností formy a modelového zařízení, jejich technickým provedením, použitou sádrovou směsí atd. Je též závislá na fyzikálních a technologických vlastnostech nejen formy, ale i odlévaného kovu. Z důvodu složitosti je nutno sledovat přesnost odlitků komplexně. Použitá technologie výroby má vliv na vztah mezi rozměry modelového zařízení a konečnými rozměry odlitku.

Geometrická přesnost odlitku se může definovat podle / 37 / jako soubor 3 složek:

- a) rozměrová přesnost včetně úchylek geometrického tvaru dle ČSN 01 4470,
- b) tvarová přesnost, která zahrnuje úchytky skutečného tvaru odlitku vlivem deformací při bržděném smršťování nebo vlivem nerovnoměrného rozložení hmoty odlitku,
- c) jakost povrchu určená drsností povrchu.

Výzkumy ukázaly / 20 /, že dosažená rozměrová přesnost odlitků získávaných ze sádrových forem se pohybuje  $\pm 0,1$  mm na délku 100 mm i u odlitků složitějších tvarů. Získané odlitky se vyznačují také vysokou hladkostí povrchu a dosahuje se drsnost povrchu  $R_a = 0,8 - 1,6 \mu m$ .

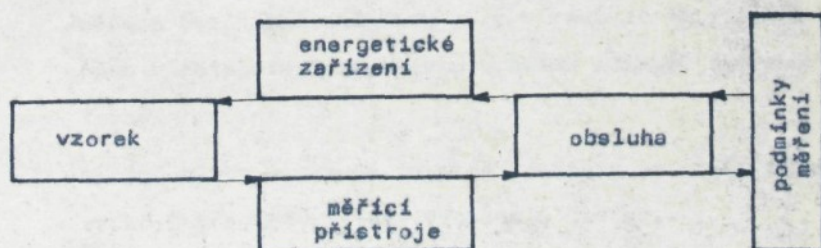
Na tuto přesnost rozměrů a kvalitu povrchu má vedle vhodně volené sádrové směsi významný vliv správně navržený režim tepelného zpracování. Je-li sádrová forma nedostatečně tepelně zpracována, pak získané odlitky jsou nekvalitní, neboť nesplňují požadavky na ně kladené.



## 5.0 EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ FOREM ZE SÁDROVÝCH SMĚSÍ

### 5.1 Návrh metodiky sledování tepelného zpracování sádrových forem v laboratorních podmínkách / 50 /

Při návrhu metodiky a laboratorního zařízení pro sledování procesu tepelného zpracování sádrových forem byla využita termická analýza. Tato metoda umožňuje sledovat úbytky hmotnosti tepelně zpracovaných látek v našem případě sádrových forem v závislosti na čase při různých podmínkách ohřevu. Pod pojmem termické analýzy rozumíme obecně experimentální metody pomocí kterých lze sledovat některé fyzikální vlastnosti zkoumané látky v závislosti na čase nebo na teplotě. Tato metoda zahrnuje měření, při kterých se plynule registruje určitá vlastnost sledované látky při jejím ohřevu. Fyzikální experiment termické analýzy je patrný z obrázku 5.1



Obr 5.1 Blokové schéma základního uspořádání fyzikálního experimentu termické analýzy

Pro realizaci měření na vzorku 1 ( vzorek sádrové formy ) je třeba, aby blok 2 byl tvořen vhodnou sestavou energetického zařízení, které svými výstupy působí na vzorek, jehož odezva je sledována pomocí soustavy měřících zařízení připojených svými vstupy na vzorek. Na správně nastaveném energetickém zařízení a vyhodnocení odezvy přístrojů zabezpečuje blok obsluhy 3. To podle toho jaké jsou požadavky na měření v bloku 4. Tomuto fyzikálnímu experimentu přísluší určitý tok informací.

Na průběh fyzikálního experimentu, resp. experimentálního uspořádání má vliv způsob uložení vzorku a měřících čidel, způsob styku vzorku s jeho okolím atd., což je důležité pro další vyhodnocení experimentu. Způsob, jakým se dostává hodnota sledované fyzikální vlastnosti jako určitý signál na vstup měřícího přístroje je ovlivněn celou řadou faktorů:

1. Sledovaný vzorek - odezva vzorku na změnu teploty jeho okolí je dána jeho velikostí a geometrií, vodivostí, tepelnou kapacitou a dalšími faktory. Okamžitá hodnota měřené fyzikální veličiny je tak závislá na fyzikálních vlastnostech materiálu v našem případě sádrové formě.
2. Měřicí hlava - hlavní tepelná rezistence styčných povrchů ( přechodů ) mezi vzorkem a čidlem.
3. Měřicí zařízení - dopravní zpoždění mezi okamžitou hodnotou měřené veličiny zprostředkované čidlem a výstupním signálem měřícího přístroje, t.j. vliv elektrického zpracování sledovaných veličin pomocí pře-



vedníků. Hodnota registrovaného signálu  $Z_{REG}$  je vzta-  
žená ke skutečné hodnotě hledaného procesu  $Z_{PROC}$  úmě-  
rou. Platí vztah, že  $Z_{REG} \approx Z_{PROC} + \phi (\tau_{(1)} + \tau_{(2)} + \tau_{(3)})$

kde  $\phi$  je rychlost změny ovládaného parametru okolí  
vzorku

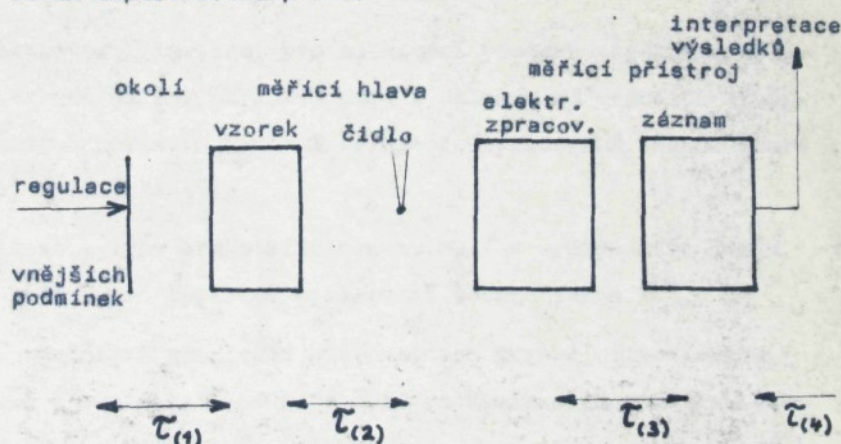
$\tau_{(1)}$  - časová konstanta vlivu vzorku

$\tau_{(2)}$  - časová konstanta vlivu vzorku a čidla

$\tau_{(3)}$  - časová konstanta vlivu záznamu

$\tau_{(4)}$  - čas zpracování výsledků

Postup zpracování výsledků termické analýzy je  
dán způsobem, jakým uchováváme výstupní signál z mě-  
řicího přístroje. Typickou součástí těchto přístrojů  
je zapisovač, který zprostředkovává grafický záznam  
sledované veličiny ( veličin ) na čase nebo teplotě.  
V praxi používáme klasických zapisovačů s přímým ovlá-  
dáním zapisovacího prvku.



Obr. 5.2 Schema dopravního zpoždění a jeho rozložení  
v následujících etapách termické analýzy

Pro sledování teploty se využívá termoelektrických článků. S klesajícím průměrem větví termočlánků se potlačuje i škodlivý vliv odvodu tepla z měřeného prostoru, čímž se snižuje časová konstanta. Časový průběh měření teploty je dán rovnicí 5.1

$$T = \Delta T' [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (5.1)$$

kde  $\Delta T'$  - změna absolutní teploty

$t$  - čas

$\tau$  - časová konstanta čidla, t.j. doba za kterou dosáhne měřený údaj 63,2 % své konečné hodnoty

## 5.2 Návrh měřicího zařízení pro sledování tepelného zpracování sádrových forem

### 5.2.1 Požadavky na měřicí zařízení

Laboratorní zařízení pro sledování procesu tepelného zpracování vzorků sádrových forem musí s ohledem na možnosti využití získaných poznatků v praxi tepelného zpracování těchto forem splňovat tyto požadavky:

1. Velikost a tvar zkušebního vzorku musí v určité míře odrážet poměry při tepelném zpracování těchto forem.
2. Musí umožňovat stanovení hmotnostních úbytků připravených vzorků v závislosti na čase při současném sledování průběhu teplot na povrchu a ve středu vzorku.
3. Musí umožňovat různé podmínky ohřevu vzorků, např. různé rychlosti ohřevu, prodlevy při různých teplotách a pod.



4. Musí zajistit pokud možno co nejjednodušší a přehledný způsob vyhodnocení získaných výsledků.

Celý vývoj metodiky měření je možno rozdělit do dvou etap, zejména ve smyslu údajů získaných na zařízení a jejich porovnání s výsledky měření na klasických termovehách.

#### 5.2.2 Popis měřicího zařízení

Pro návrh termováhy pro termogravimetrická měření vzorků ze sádrových směsí se vycházelo z podmínek katedry materiálu a strojírenské metalurgie Vysoké školy strojní a textilní v Liberci.

U daného zařízení bylo místo principu analytických vah, který je typický pro klasické termováhy, využito pružné vlastnosti ocelového tyčového materiálu o průměru 2 mm a délky 150 mm. Tento materiál byl upevněn jako staticky určitý vetknutý nosník na pohyblivou část masivního stojanu. Prohnutí pružného materiálu je určeno hmotností zavěšeného sádrového vzorku na jeho volném konci. Snímání změny polohy tyčového materiálu (nosníku) bylo realizováno pomocí induktivního vysílače č. 99424, který umožňuje vést střídavý signál do převodníku č. 90124 a stabilizátoru napětí ST 8000.1, usměrněná výstupní veličina byla registrována šestibodovým zapisovačem Mk 16 (NDR). Ke stanovení závislosti vychylky nosníku a její registrace na zapisovači pomocí vychýlení jádra induktivního vysílače byla použita kalibrace pomocí laboratorních závaží. Na tomto základě

byla stanovena kalibrační křivky  $g = f ( mV )$ , která je v příloze 1.

Velikost výchylky a tím i průběh kalibrační křivky je možno měnit změnou hodnoty odporu v převodníku.

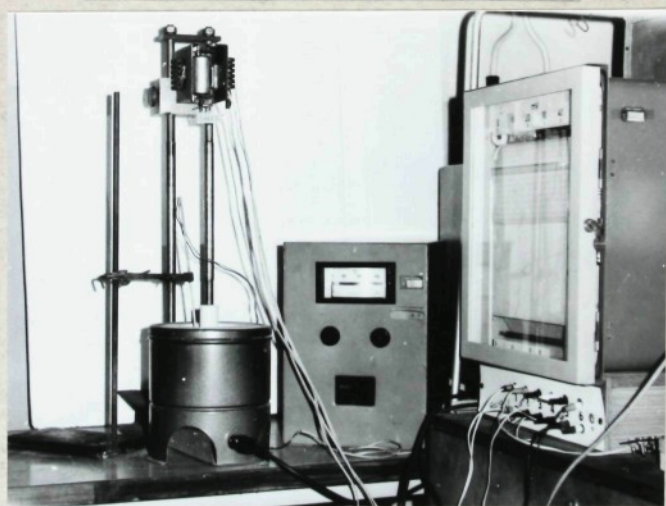
Pro ohřev vzorků byla použita běžná kelímková pec typ K 59, doplněná regulačním zařízením teploty ZEPAFOTEM. Celkové uspořádání tohoto zařízení je na obrázku 5.3 a skupinové schéma na obrázku 5.4.

Hlavní část zařízení tvoří stojan sřládaající se ze dvou U profilů a dvou nosných tyčí, po kterých se pohybuje ve svislém směru nosník, pomocí kterého je možno nastavit správnou polohu jádra indukčního vysílače.

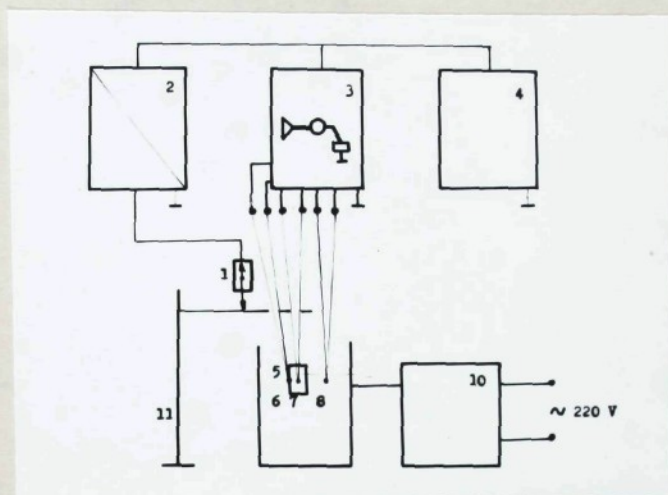
### 5.2.3 Měření teploty

Teplota při tepelném zpracování byla měřena pomocí termoelektrických článků ( termočlánků ) Fe - Ko o  $\varnothing$  0,5 mm a NiCr - Ni  $\varnothing$  0,3 mm. Kalibrační křivky těchto termočlánků jsou v příloze č. 2 a 3. Pro stanovení teploty v peci byl použit termočlánek Fe - Ko a pro měření teploty ve středu a na povrchu vzorku termočlánek NiCr - Ni. Termočlánek Fe - Ko byl chráněn kapilárou  $\varnothing$  3 mm. Zvláštní pozornost byla věnována termočládkům ke snímání teploty vzorku. Po několika úpravách se nejvíce osvědčilo zabudování, které je na obrázku 5.5. Toto zabudování termočládku bylo prováděno pomocí přípravku, který je na obrázku 5.6. Pohled na připravený vzorek k měření je na obrázku 5.7.





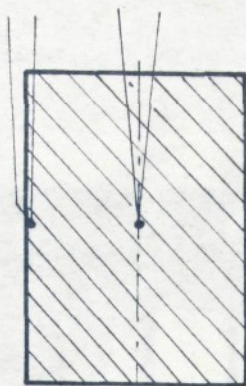
Obr. 5.3 Celkové uspořádání zařízení



- Legenda: 1 - indukční vysílač 99 424  
 2 - převodník 90 124  
 3 - šestibodový zapisovač Mk I6 ( NDR )  
 4 - stabilizátor napětí ST 8000.1  
 5 - zkušební vzorek  
 6 - termočlánek NiCr - Ni  $\varnothing$  0,3 mm  
 7 - termočlánek NiCr - Ni  $\varnothing$  0,3 mm  
 8 - termočlánek Fe - Ko  $\varnothing$  0,5 mm  
 9 - elektrická kelímková pec K 59  
 10 - fotoelektrický regulátor ZEPAFOT  
 11 - stojan

Obr. 5.4 Skupinové schema zařízení





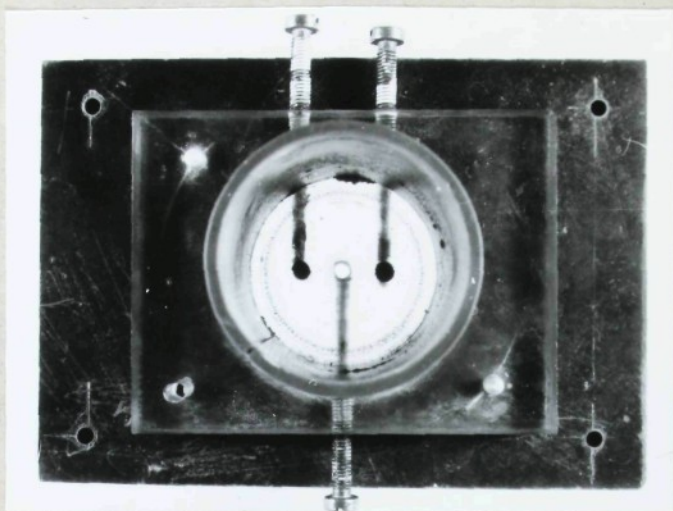
Obr. 5.5 Zabudování termočlánků do vzorku

#### 5.2.4 Postup při termogravimetrickém měření vzorků sádrových forem

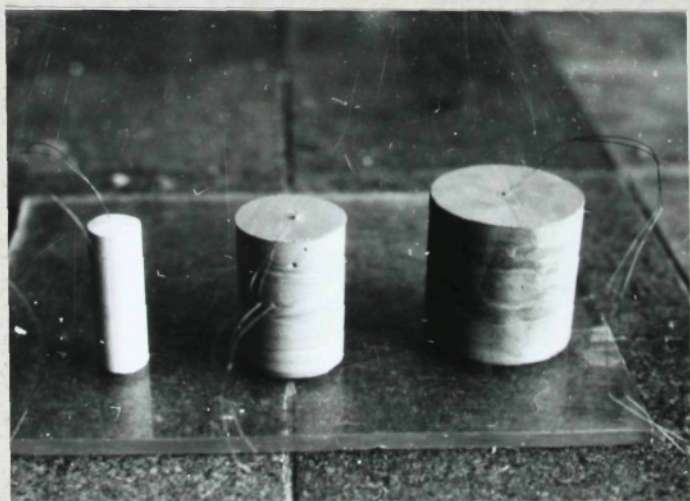
Připravený vzorek odlitý ze sádrové břečky ( příprava vzorku je popsána v kapitole 5.2.5 ) se zabudovanými termočlánky byl před upevněním na zařízení zvážen na předvážkách a pak zavěšen na pružný element zařízení ( termováh ). Nastavením výchozí polohy jádra induktivního vysílače a po zapnutí elektrické pece a uvedení do chodu 6 bodového zapisovače začalo termogravimetrické měření vzorku. V průběhu měření byly registrovány tyto funkční závislosti:

1. Okamžitý úbytek hmotnosti vzorku, jako funkce času.
2. Teplota na povrchu vzorku jako funkce času.
3. Teplota ve středu vzorku jako funkce času.
4. Teplota v peci jako funkce času.

Při měření je nutno dbát na rychlost ohřevu vzorku a na velikost teploty tak, aby nepřekročila  $700^{\circ}\text{C}$ , kdy



Obr. 5.6 Přípravek pro zabudování termočlánků



Obr. 5.7 Připravený vzorek k měření



ze určitých podmínek dochází k rozkladu síranu vápenatého.

Posuv papíru v zapisovači byl seřizen na hodnotu 600 - 1200 mm ze hodinu podle potřeby tak, aby zápis bodů byl dostatečně čitelný a přehledný. Po ukončení měření, kdy úbytek hmotnosti sádrového vzorku byl konstantní, byl vzorek z pece vyjmut a opět zvážen. To z důvodů kontroly, přesnosti měření na daném zařízení. Z naměřených výsledků byla sestavena tabulka a sestrojeny další grafické závislosti:

a) okamžitý poměrný úbytek hmotnosti jako funkce času:

$$\frac{m_x}{m_{\text{poč}}} = f(t)$$

b) okamžitý poměrný zbytek hmotnosti jako funkce teploty:

$$\frac{m_{\text{poč}} - m_x}{m_{\text{poč}}} = f(T)$$

c) teplota v jednotlivých měřených místech vzorku jako funkce času:

$$T = f(t)$$

kde  $m_x$  - úbytek hmotnosti vzorku v daném časovém okamžiku;

$m_{\text{poč}}$  - počáteční hmotnost vzorku

$m_y = m_{\text{poč}} - m_x$  - zbytek hmotnosti vzorku v určitém časovém okamžiku

#### 5.2.5 Příprava vzorků pro termogravimetrická měření

S ohledem na vliv tvarového a velikostního faktoru vzorků sádrových forem při jejich tepelném zpracování by-

ly použity vzorky válcového tvaru nebo tvaru krychle. Pro výrobu vzorků byla použita forma PVC. Na přípravu jednoho vzorku je potřeba 100 - 150 g ( sádrové směsi, sádry ) a určité množství rozdělovací vody, dané zkouškou konsistence dle ČSN 66 5224.

Příprava vzorku ze sádrové směsi nenapěněné se provádí podle následujícího časového rozpisu. Sádrová směs se 15 s syje do připravené pryžové misky s potřebným množstvím rozdělovací vody. Pak následuje míchání po dobu 45 s, 30 s se pryžovou miskou poklepává, čímž se vyklepává vzduch. Pak následuje po dobu 20 s pomalé míchání. Takto připravená směs se lije do formy z PVC, která je upevněna na přípravku tak, aby bylo možno zabudovat termočlánky do středu a na povrch vzorku. Ztuhlý sádrový vzorek se po určité době z formy z PVC vyjímá a tím je připraven pro vlastní termogravimetrické měření.

Příprava vzorků z napěněné sádrové směsi se provádí tak, že se nejdříve vyrobí pěna. Na přípravu pěny se nejčastěji používá 3 % vodní roztok ETOXON EPA. Dále je potřeba příslušná sádrová směs a jí odpovídající množství rozdělovací vody, určené zkouškou konsistence. Postup přípravy napěněné sádrové břečky je následující. Do válcové nádoby objemu asi 2 l se nalije 100 ml vody 20°C teplé a 3ml ETOXONU EPA. Obsah této nádoby se míchá rychlostí 1500 ot/min. pomocí speciální míchačky, která má jako míhací element 2 pryžové kotouče o průměru asi 60 mm. / 22 /. Tím dojde k postupnému napěnění sapomátové emulze. Další postup se provádí tak, že na 100 g sádrové směsi ( sádry ) se používá asi 70 ml



rozdělovací vody ( podle druhu sádrové směsi ), do které se přidá 35 ml připravené pěny. Další postup se provádí podle následujícího časového rozpisu. Sypání sádrové směsi do vody po dobu 15 s, dále následuje 15 s homogenizace a po té probíhá napěňování, které se skládá ze 3 částí ( etap ). První část se provádí po dobu 15 s s výše uvedenou míchačkou, kdy rychlost míchání je 1700 otáček za minutu. Druhá část trvá 30 s a rychlost míchání je 1500 otáček za minutu, třetí etapa trvá 35 s rychlostí 800 - 1000 otáček za minutu.

Takto připravená napěněná sádrová břečka se nalévá do příslušné formy z PVC s připravenými termočlánky ( tak jak bylo uvedeno při přípravě vzorků nenapěněných ). Ztuhlý sádrový vzorek se po určité době z formy vyjímá a tím je připraven k měření.

### 5.3 Přehled termogravimetrických měření vzorků při sledování tepelného zpracování sádrových forem

Na dříve uvedeném zařízení ( termovahách ) byla provedena celá řada měření na vzorcích válcového tvaru  $\varnothing 20 \times 50$  mm,  $\varnothing 35 \times 50$  mm,  $\varnothing 50 \times 50$  mm a  $22,5 \times 22,5 \times 90$  mm za použití nejrozličnějších sáder a sádrových směsí. Do této práce jsou vybrána jen některá měření, prováděná při plynulém ohřevu vzorku v peci. Z hlediska sádrových směsí největší pozornost byla kladena ( z důvodu ceny a dostupnosti na našem trhu ) na:

1. alabastrovou sádru,
2. směs 50 hmotnostních % alabastrové sádry a 50 hmotnostních % stavební sádry, která je dále označována 50 - 50,

3. směs 50 hmotnostních % alabastrová sádry a 50 hmotnostních % stavební sádry - napěněná, označovaná dále 50 - 50 N.

Pro přípravu vzorků byla použita prášková sádra Modellgips MG 11 druh II ( NDR ) označovaná jako sádra alabastrová TGL 21 842. Dále byla použita stavební sádra tuzemského původu, výrobce SOSD, n.p. Ostrava, závod Kobeřice u Opavy, ČSN 722301.

Přehled termogravimetrických měření, registrace funkčních závislostí a jejich příslušné grafické závislosti jsou uvedeny v příloze č. 4 - 40.

### 5.3.1 Vyhodnocení naměřených hodnot

Byla provedena řada měření vzorků  $\varnothing$  20 x 50 mm,  $\varnothing$  35 x 50 mm a  $\varnothing$  50 x 50 mm, dále vzorky tvaru 22,5 x 22,5 x 90 mm z alabastrové sádry, směsi 50 - 50 a směsi 50 - 50 N.

#### 5.3.1.1 Závislost poměrného zbytku hmotnosti vzorku na teplotě

Při plynulém ohřevu vzorku v peci dochází k okamžitému poměrnému úbytku hmotnosti vlivem dehydratace v rozmezí teplot 40 - 450°C měřených ve středu vzorku.

##### 1. Vzorek $\varnothing$ 20 x 50 mm - alabastrová sádra

Při teplotě 40 - 90°C se poměrný zbytek hmotnosti vzorku pohybuje od 0,986 do 0,680, při teplotě 95°C, kdy vzorek ztrácí další vlhkost je poměrný zbytek hmotnosti 0,652 - 0,680. Ke další výrazné změně dochází při teplotě 105°C, kdy poměrný zbytek činí 0,585, od teploty 135°C činí poměrný zbytek hmotnosti 0,574. Při teplotě 210 nedochází ke změně hmotnosti a poměrný zbytek hmotnosti činí 0,560, což trvá až do konce zahřívání vzorku.



2. Vzorek Ø 20 x 50 mm - sádrová směs 50 - 50

Při teplotě 41 - 90°C se poměrný zbytek hmotnosti pohybuje od 0,991 - 0,680, při teplotě prodlevy 95°C je poměrný zbytek hmotnosti 0,594. K poslední výrazné změně hmotnosti dochází při teplotě 110°C, kdy poměrný zbytek hmotnosti činí 0,520. Od této teploty se hmotnost vzorku nemění i při dalším zahřívání vzorku. Úbytek hmotnosti vzorku činí 48% z jeho celkové hmotnosti.

3. Vzorek Ø 20 x 50 mm - sádrová směs 50 - 50 N

Při teplotě 41 - 85°C se poměrný zbytek hmotnosti pohybuje od 0,914 - 0,631. K další výrazné změně hmotnosti vzorku dochází v rozmezí teplot 95 - 115°C, kdy poměrný zbytek hmotnosti vzorku dosahuje 0,544. Při dalším zvýšení teploty je hmotnost vzorku konstantní. Úbytek hmotnosti vzorku činí 45 - 46% jeho původní hmotnosti.

4. Vzorek Ø 35 x 50 mm - alabastrová sádra

Při teplotě 40 - 91°C se poměrný zbytek hmotnosti pohybuje v rozmezí 0,987 - 0,762. K další výrazné změně hmotnosti vzorku dochází při teplotě prodlevy 95°C, kdy tato hodnota se pohybuje od 0,725 - 0,610. K další změně hmotnosti dochází při teplotě 120°C, kdy tato hodnota činí 0,593. K další změně hmotnosti dochází při teplotě 205°C, kdy poměrný zbytek hmotnosti činí 0,582. Při teplotě 370°C je poměrný zbytek hmotnosti vzorku konstantní a dosahuje hodnotu 0,562. Celkový úbytek hmotnosti vzorku činí 44%.

5. Vzorek Ø 35 x 50 mm - sádrová směs 50 - 50

Při teplotě 40 - 85°C se poměrný zbytek hmotnosti vzorku pohybuje od 0,988 do 0,762. Další změně dochází v rozmezí teplot 90 - 95°C, kdy poměrný zbytek hmotnosti se pohybuje od 0,744 - 0,561. Při teplotě prodlevy 125°C činí tato hodnota 0,529.



K poslední změně hmotnosti dochází při teplotě  $350^{\circ}\text{C}$ , kdy poměrný zbytek hmotnosti činí 0,513. Celkový úbytek hmotnosti je 48% z původní hmotnosti vzorku.

6. Vzorek Ø 35 x 50 mm - sádrová směs 50 - 50 N.

Při teplotě  $40 - 90^{\circ}\text{C}$  poměrný zbytek hmotnosti se pohybuje od 0,943 do 0,704. K další dehydrataci dochází při teplotě  $115^{\circ}\text{C}$ , kdy poměrný zbytek hmotnosti je 0,606. K poslední změně hmotnosti vzorku dochází při teplotě  $290^{\circ}\text{C}$ , kdy poměrný zbytek hmotnosti je konstantní a dosahuje hodnotu 0,558. Celkový úbytek hmotnosti vzorku je 44% jeho hmotnosti původní.

7. Vzorek Ø 50 x 50 mm - alabastrová sádra

Při teplotě  $40 - 95^{\circ}\text{C}$  činí poměrný zbytek hmotnosti 0,976 - 0,691. K další výrazné změně této hmotnosti dochází při teplotě  $105 - 115^{\circ}\text{C}$ , kdy poměrný zbytek hmotnosti činí 0,677 - 0,646. Při teplotě  $160^{\circ}\text{C}$  je poměrný úbytek hmotnosti již konstantní a dosahuje hodnotu 0,550. Celkový úbytek hmotnosti vzorku činí 45% jeho původní hmotnosti.

8. Vzorek Ø 50 x 50 mm - sádrová směs 50 - 50

Při teplotě  $40 - 96^{\circ}\text{C}$  poměrný zbytek hmotnosti se pohybuje od 0,982 - 0,635. K další změně hmotnosti dochází při teplotě  $110^{\circ}\text{C}$ , kdy poměrný zbytek hmotnosti činí 0,576. Při teplotě prodlouhy  $127^{\circ}\text{C}$  je poměrný zbytek hmotnosti 0,519. K poslední změně hmotnosti dochází při teplotě  $140^{\circ}\text{C}$ , kdy poměrný zbytek dosahuje hodnotu 0,517. Při dalším ohřevu vzorku je již konstantní, úbytek hmotnosti je 48% celkové hmotnosti vzorku.

9. Vzorek Ø 50 x 50 mm - sádrová směs 50 - 50

Při teplotě  $40 - 85^{\circ}\text{C}$  se poměrný zbytek hmotnosti pohybuje od 0,951 do 0,760. K další výrazné změně hmotnosti vzorku dochází při teplotě  $95^{\circ}\text{C}$ , kdy poměrný úbytek hmotnosti vzorku činí



0,716. Při teplotě prodlévky  $125^{\circ}\text{C}$  je poměrný úbytek hmotnosti 0,645. K poslední změně hmotnosti dochází při teplotě  $195^{\circ}\text{C}$ , kdy poměrný úbytek hmotnosti činí 0,532 a při dalším ohřevu vzorku se již nemění. Úbytek hmotnosti vzorku je 47% původní hmotnosti.

10. Vzorek  $22,5 \times 22,5 \times 90$  mm - alabastrová sádra

Při teplotě  $40 - 97^{\circ}\text{C}$  je poměrný úbytek hmotnosti vzorku 0,997 - 0,770. K další dehydrataci vzorku dochází při teplotě prodlévky  $115^{\circ}\text{C}$ , kdy poměrný zbytek hmotnosti vzorku je 0,712. Při teplotě  $178^{\circ}\text{C}$  dosahuje tato hodnota hmotnosti vzorku 0,539, která je konstantní až do teploty  $215^{\circ}\text{C}$ . Při teplotě  $224^{\circ}\text{C}$  je již poměrný zbytek hmotnosti konstantní a činí 0,534. Celkový úbytek hmotnosti vzorku je 46% jeho celkové hmotnosti.

11. Vzorek  $22,5 \times 22,5 \times 90$  mm - sádrová směs 50 - 50

Při teplotě  $41 - 90^{\circ}\text{C}$  se pohybuje poměrný zbytek hmotnosti od 0,998 - 0,817. Při teplotě prodlévky  $105^{\circ}\text{C}$  činí poměrný úbytek hmotnosti 0,676. K další výrazné změně hmotnosti vzorku dochází při teplotě  $125^{\circ}\text{C}$  a poměrný zbytek hmotnosti činí 0,514 a při teplotě  $211^{\circ}\text{C}$  dosahuje tato hodnota 0,511. Úbytek hmotnosti vzorku činí 48% z původní hmotnosti.

12. Vzorek  $22,5 \times 22,5 \times 90$  mm - sádrová směs 50 - 50 N

Při teplotě  $39 - 90^{\circ}\text{C}$  je poměrný úbytek hmotnosti vzorku 0,955 - 0,762. Při teplotě prodlévky  $95^{\circ}\text{C}$  je poměrný zbytek hmotnosti 0,649. K další změně hmotnosti vzorku vlivem dehydratace dochází při teplotě  $200^{\circ}\text{C}$ , kdy poměrný zbytek hmotnosti je 0,550. Při teplotě  $295^{\circ}\text{C}$  je již poměrný zbytek hmotnosti vzorku konstantní a dosahuje hodnotu 0,537. Celkový úbytek hmotnosti vzorku činí 46% jeho původní hmotnosti.



### 5.3.1.2 Vyhodnocení rozdílu teplot mezi povrchem a středem vzorku v závislosti na čase

Z měření, která byla prováděna, vyplývá, že při plynulém zahřívání vzorků v peci se mění teploty na povrchu a středu vzorku. Při zahřívání vzorků do teploty  $100^{\circ}\text{C}$  se vlivem dehydratace odstraňuje voda volná a rozdíl teplot mezi povrchem a středem vzorku se mění pozvolně. Při vyšších teplotách se odstraňuje voda vázaná a rozdíl těchto teplot se zvyšuje. Na konci tepelného zpracování sádrových vzorků, kdy již je ukončeno odstraňování vody a hmotnost vzorku je konstantní, dochází k postupnému prohřívání i středu vzorku a rozdíl teplot na povrchu a středu vzorku se začíná zmenšovat. Takto probíhá rozdíl teplot u vzorků menších ( $\varnothing 20 \times 50 \text{ mm}$ ,  $\varnothing 35 \times 50 \text{ mm}$ ,  $22,5 \times 22,5 \times 90 \text{ mm}$ ). U vzorků  $\varnothing 50 \times 50 \text{ mm}$  je tento rozdíl teplot největší na konci tepelného zpracování, kdy střed vzorku se prohřívá pomalu. Výše teploty ve středu vzorku se pohybuje od  $216 - 360^{\circ}\text{C}$  a tato teplota již zajišťuje přeměnu polohydrátu na anhydrit. Vzorek při této teplotě nevykazuje změnu hmotnosti.

#### 1. Vzorek $\varnothing 20 \times 50 \text{ mm}$ - alabastrová sádra

Rozdíl teplot mezi povrchem a středem vzorku se od počátku tepelného zpracování zvětšuje, neboť se povrchové vrstvy vzorku prohřívají rychleji než střed vzorku. Od 15. minuty se teplota na povrchu vzorku začíná výrazněji zvyšovat. V 17. minutě dosahuje teplota povrchu vzorku  $120^{\circ}\text{C}$  a středu vzorku  $95^{\circ}\text{C}$ . Největší hodnotu rozdílu teplot vykazuje vzorek ve 22. minutě. Teplota na povrchu vzorku je  $247^{\circ}\text{C}$  a teplota ve středu vzorku dosahuje  $155^{\circ}\text{C}$ . Při dalším zahřívání vzorku rozdíl teplot klesá, neboť se začínají prohřívát i střední části vzorku. Rozdíl



teplot na konci tepelného zpracování, to je ve 31. minutě, dosahuje hodnotu  $29^{\circ}\text{C}$ .

2. Vzorek  $\varnothing 20 \times 50 \text{ mm}$  - sádrová směs 50 - 50

Rozdíl teplot v tomto vzorku se mění následovně. Od počátku tepelného zpracování až do 13. minuty, kdy teplota na povrchu vzorku dosahuje  $95^{\circ}\text{C}$  a střed vzorku  $83^{\circ}\text{C}$ . Od tohoto okamžiku se začíná rozdíl teplot postupně zvyšovat. Největší hodnotu dosahuje ve 21. minutě (teplota na povrchu vzorku je  $205^{\circ}\text{C}$  a v jeho středu  $127^{\circ}\text{C}$ ). Při dalším zahřívání se rozdíly teplot začínají snižovat. Na konci tepelného zpracování, ve 31. minutě, tento rozdíl činí pouze  $16^{\circ}\text{C}$ .

3. Vzorek  $\varnothing 20 \times 50 \text{ mm}$  - sádrová směs 50 - 50 N

Rozdíl teplot v tomto vzorku se mění od počátku tepelného zpracování až do 18. minuty, kdy rozdíl teplot nepřesahuje  $30^{\circ}\text{C}$ . Pak se začíná rozdíl teplot výrazněji zvětšovat a ve 22. minutě dosahuje teplota povrchu vzorku  $398^{\circ}\text{C}$  a střed vzorku  $195^{\circ}\text{C}$ . Pak následuje i při dalším ohřívání vzorku prohřívání jeho středních vrstev a rozdíl teplot mezi povrchem a středem se zmenšuje. Po 30. minutě dochází k vyrovnání teplot vzorku.

4. Vzorek  $\varnothing 35 \times 50 \text{ mm}$  - alabastrová sádra

Rozdíl teplot tohoto vzorku se mění následovně od počátku tepelného zpracování až do 17. minuty, kdy se teplota mezi povrchem a středem vzorku výrazně neliší. Od 18. minuty se teplota povrchu vzorku začíná zvyšovat, ale teplota ve středu vzorku se zvyšuje pozvolna, neboť nedošlo v této části vzorku k jeho prohřátí. Ve 30. minutě vzorek vykazuje největší rozdíl teplot. Povrch vzorku dosáhl teplotu  $422^{\circ}\text{C}$  a střed vzorku  $95^{\circ}\text{C}$ . Při dalším ohřívání vzorku se prohřívá intenzivně i jeho střed a následkem



toho se rozdíl teplot vzorku začíná zmenšovat. Na konci tepelného zpracování, to je v 62. minutě je teplota na povrchu vzorku  $620^{\circ}\text{C}$  a ve středu vzorku  $546^{\circ}\text{C}$ .

5. Vzorek  $\varnothing$  35 x 50 mm - sádrová směs 50 - 50

Rozdíl teploty tomto vzorku se mění od počátku tepelného zpracování vzorku. Do 19. minuty je rozdíl teplot ve vzorku malý (nepřesahuje  $30^{\circ}\text{C}$ ). Od 20. minuty se začíná rozdíl teplot ve vzorku pozvolna zvětšovat, neboť se začínají rychleji prohřívát povrchové vrstvy vzorku. Ve 38. minutě je největší rozdíl teplot. Teplota na povrchu vzorku dosahuje hodnotu  $496^{\circ}\text{C}$  a střed vzorku  $130^{\circ}\text{C}$ . Od 39. minuty, kdy se intenzivněji prohřívají i střední vrstvy vzorku, se rozdíl teplot ve vzorku zmenšuje. Na konci tepelného zpracování, to je v 62. minutě, rozdíl teplot činí  $20^{\circ}\text{C}$ .

6. Vzorek  $\varnothing$  35 x 50 mm - sádrová směs 50 - 50 N

Rozdíl teplot se od počátku tepelného zpracování ve vzorku zvětšuje až do 18. minuty, kdy rozdíl teplot mezi povrchem a středem vzorku nepřesahuje teplotu  $40^{\circ}\text{C}$ . Ve 43. minutě je rozdíl teplot největší. Vzorek dosáhl teplotu svého povrchu  $583^{\circ}\text{C}$  a teplotu ve středu vzorku  $260^{\circ}\text{C}$ . Při dalším zahřívání vzorku se rozdíl teplot ve vzorku zmenšují a na konci tepelného zpracování, to je ve 62. minutě, dosahují  $55^{\circ}\text{C}$ .

7. Vzorek  $\varnothing$  50 x 50 mm - alabastrová sádra

Rozdíl teplot ve vzorku při tepelném zpracování se mění takto - do 36. minuty je rozdíl vzorku malý (nepřesahuje  $65^{\circ}\text{C}$ ). Od 37. minuty se začíná rozdíl teplot ve vzorku zvětšovat. V 61. minutě je největší, kdy povrch vzorku dosáhl teplotu  $600^{\circ}\text{C}$  a střed vzorku  $215^{\circ}\text{C}$ . To je způsobeno velkým průměrem



vzorku, střed vzorku za tuto dobu není ještě dostatečně prohřátý, i když hmotnost vzorku při jeho tepelném zpracování byla již od 51. minuty konstantní.

8. Vzorek  $\varnothing$  50 x 50 mm - sádrová směs 50 - 50

Od počátku tepelného zpracování se rozdíl teplot ve vzorku zvětšuje pozvolna až do 35. minuty. Od 36. minuty se začínají výrazněji prohřívát povrchové vrstvy vzorku a rozdíl teplot se začíná značně zvětšovat až do konce tepelného zpracování, to je do 62. minuty, kdy vzorek dosáhl teploty  $595^{\circ}\text{C}$  na svém povrchu a  $216^{\circ}\text{C}$  ve středu. To je opět způsobeno velkým průměrem vzorku, který neumožňuje snadněji prohřátí středu vzorku.

9. Vzorek  $\varnothing$  50 x 50 mm - sádrová směs 50 - 50 N

Rozdíl teplot během tepelného zpracování je výrazný a mění se následovně - do 25. minuty se mění pozvolna, nepřesahuje  $88^{\circ}\text{C}$ . Pak vlivem intenzivního prohřívání povrchových vrstev vzorku se začíná zvětšovat. V 51. minutě je nejvyšší, povrch vzorku docílí teplotu  $585^{\circ}\text{C}$  a střed  $173^{\circ}\text{C}$ . Pak se začínají prohřívát i střední vrstvy vzorku a rozdíl teplot se postupně začíná zmenšovat. Na konci tepelného zpracování to je v 62. minutě rozdíl teplot dosahuje  $240^{\circ}\text{C}$ .

10. Vzorek 22,5 x 22,5 x 90 mm - alabastrová sádra

Rozdíl teplot se začíná pozvolna zvětšovat až do 19. minuty, kdy se intenzivněji začínají prohřívát povrchové vrstvy vzorku. Ve 39. minutě je rozdíl teplot největší. Teplota na povrchu vzorku je  $479^{\circ}\text{C}$  a teplota středu vzorku  $305^{\circ}\text{C}$ . Pak následuje dalším ohříváním vzorku prohřívání jeho středních částí. V 56. minutě jsou teploty ve vzorku stejné dosahují

hodnotu  $600^{\circ}\text{C}$ .

11. Vzorek  $22,5 \times 22,5 \times 90$  mm - sádrová směs 50 - 50

Rozdíl teplot při tepelném zpracování tohoto vzorku se mění do 19. minuty pozvolna. Po 19. minutě dochází k prohřívání povrchových vrstev vzorku. Ve 38. minutě dosahuje povrch vzorku teplotu  $462^{\circ}\text{C}$  a střed vzorku  $285^{\circ}\text{C}$  a rozdíl teplot ve vzorku je největší. Pak následuje v důsledku dalšího prohřívání vnitřních vrstev vzorku zmenšování rozdílů teplot. V 56. minutě dosahují tyto teploty  $600^{\circ}\text{C}$ , čímž jsou rozdíly teplot vyrovnány.

12. Vzorek  $22,5 \times 22,5 \times 90$  mm - sádrová směs 50 - 50 N

Rozdíl teplot na povrchu a ve středu vzorku vzrůstá do 19. minuty pozvolna. Od 20 minuty se intenzivněji prohřívají povrchové vrstvy vzorku a rozdíl teplot ve vzorku se zvětšuje výrazněji. Ve 33. minutě je největší, kdy vzorek na povrchu dosahuje teploty  $486^{\circ}\text{C}$  a střed vzorku  $265^{\circ}\text{C}$ . Při dalším prohřívání vzorku se rozdíl teplot začíná zmenšovat. Ve 48. minutě dochází k vyrovnání teplot na povrchu a ve středu vzorku, kdy tyto teploty činí  $600^{\circ}\text{C}$ .

5.3.2 Shrnutí výsledků a jejich praktické využití v technické praxi

Ze všech získaných výsledků, které byly při sledování tepelného zpracování vzorků pomocí termální analýzy dosaženy, vyplývá, že u vzorků z nenapěněné sádrové směsi (alabastrová sádra, sádrová směs 50 - 50) probíhá proces dehydratace volné a vázané vody, podle podmínek a velikosti vzorku. V příloze č. 41 je znázorněna závislost redukované tloušťky vzorku na



čase tepelného zpracování, kdy vzorek nemění již svou hmotnost. Celkový poměrný úbytek hmotnosti u vzorků ze směsí nenapěněných se pohybuje od 44 do 48% původní hmotnosti vzorku. Poměrný úbytek hmotnosti vzorků z napěněných směsí dosahuje hodnoty od 44 až do 46% jejich původní hmotnosti.

U napěněných vzorků dochází v důsledku větší pórovitosti ke snadnějšímu odpařování vody, což má vliv i na kratší dobu tohoto zpracování. Doba tepelného zpracování u vzorků z nenapěněných sádrových směsí je závislá na vodním poměru v/s. Vzorky průměru 20 x 50 mm dosahují konstantní hmotnosti již v 18. až 23. minutě od počátku tepelného zpracování. U vzorků průměru 35 x 50 mm dochází k poslednímu úbytku hmotnosti ve 45. až 46. minutě. U vzorků průměru 50 x 50 mm je úbytek hmotnosti konstantní ve 47. až 51. minutě. U vzorků 22,5 x 22,5 x 90 mm poslední úbytek hmotnosti vzorku se projevuje ve 25. až 31. minutě.

U vzorků ze směsí napěněných dochází při tepelném zpracování k dosažení konstantní hmotnosti dříve než tomu bylo u příslušných vzorků ze směsí nenapěněných.

Rozdíl teplot na povrchu a ve středu vzorků je závislý na tvaru a velikosti vzorku. Vzorky menších rozměrů se prohřívají dříve než vzorky rozměrů větších. Vzorky menších průměrů dosahují i menších rozdílů teplot na jejich povrchu a středu. Vzorky velkých rozměrů dosahují i větších rozdílů teplot.

V technologickém procesu by bylo nejvýhodnější z ekonomického hlediska vyrábět formy a jádra z napěněných sádrových směsí, avšak celková výroba těchto forem je náročnější než výroba forem nenapěněných. Uplatnění napěněných forem je hlavně při výrobě některých dílů ventilátorů, které mají formy nedě-

lené. Sádrové směsi nenapěněné mají velké uplatnění při výrobě dílů používaných v radiotechnice, kde je nutné zachovávat malou změnu rozměrů.

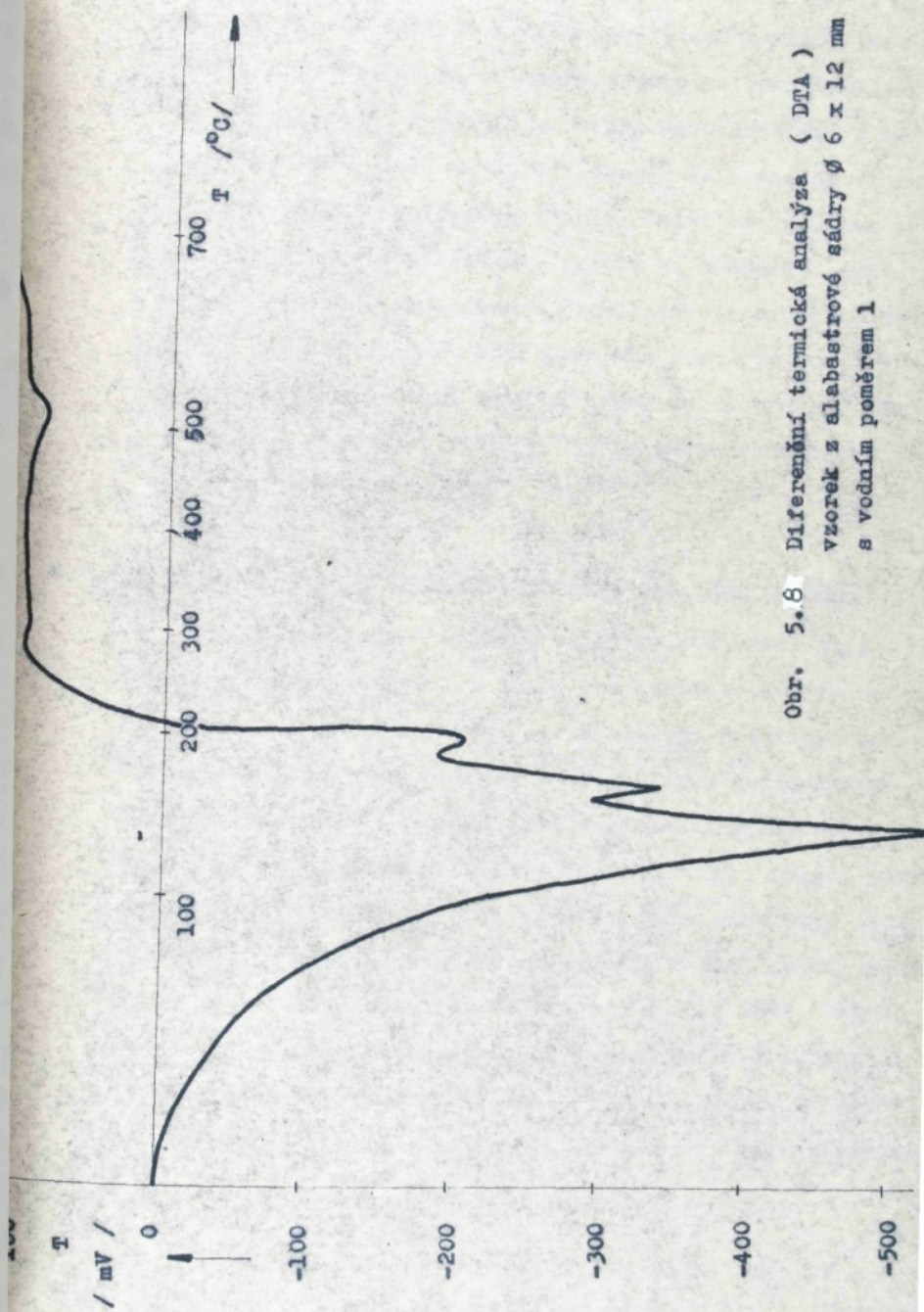
Pokud hodnotíme mechanické vlastnosti sádrových směsí napěněných a nenapěněných, pak lze konstatovat, že u napěněných směsí je větší pórovitost a tyto směsi dosahují menší hodnoty pevnosti v tlaku a ohybu ve srovnání s nenapěněnými.

### 5.3.3 Termogravimetrická měření vzorků ze sádrových směsí prováděná ve spolupráci s VŠCHT Praha

Ve spolupráci s VŠCHT Praha bylo provedeno několik měření vzorků  $\varnothing 6 \times 12$  mm, které bylo prováděno na katedře silikátů. Získané výsledky byly porovnány s výsledky dosaženými na našem experimentálním zařízení.

V této spolupráci byly analyzovány vzorky z alabastrové sádry a sádrové směsi GARASIN. Do této práce je zahrnuto měření alabastrové sádry, ostatní měření jsou uvedena v práci /36/. Z měření DTA vzorků vyplývá, že dehydratace vzorků probíhá od teploty  $40^{\circ}\text{C}$  do teploty  $240^{\circ}\text{C}$  ve třech výrazných a od sebe oddělených stupních a méně výrazném stupni při teplotě 300 až  $460^{\circ}\text{C}$ . První stupeň je největší, kdy dochází k úbytku hmotnosti 35,4% z celkové navážky, je ukončen při teplotě 150 -  $155^{\circ}\text{C}$ . Druhý stupeň má úbytek hmotnosti 5,1% z celkové navážky a je ukončen při teplotě  $190^{\circ}\text{C}$ . Třetí stupeň má úbytek 2,4% z celkové navážky a je ukončen při teplotě  $240^{\circ}\text{C}$ . Na křivce DTA je v oblasti 300 -  $460^{\circ}\text{C}$  nevýrazný exoeffekt, který svědčí o uvolňování posledního zbytku vázané vody. Zobrazení křivka DTA pro alabastrovou sádru je uvedeno na obr. 5.8.





Obr. 5.8 Diferenční termická analýza ( DTA )  
vzorek z alabastrové sádky  $\varnothing 6 \times 12$  mm  
s vodním poměrem 1

Zařízení používané na VŠCHT je podrobně popsáno / 36 /. Hlavní část je tvořena analytickou vahou typu MEOPTA A 3. Nad ní je umístěna speciálně upravená laboratorní pírka. V pecním prostoru jsou umístěny 3 termočlánky Pt-Rh - Pt. Na 1 termočlánek se nasazuje vzorek čímž je měřena teplota ve vzorku. Další termočlánek je umístěn v pecním prostoru a slouží ke sledování teploty v peci. Poslední termočlánek slouží jako srovnávací pro DTA. Řídící a registrační jednotka obsahuje zdroj proudu pro celé zařízení. Celé zařízení je opatřeno 2 zapisovači. 1 zapisovač sleduje úbytek hmotnosti, druhý je určen pro záznam DTA.

#### 5.4 Porovnání získaných výsledků měřených na VŠST a VŠCHT

Rozbor získaných výsledků a jejich porovnání je podrobně provedeno v práci / 36 /. Lze konstatovat, že hodnoty získané na našem zařízení se přibližují hodnotám naměřeným na VŠCHT, Praha, hlavně pokud se týká počáteční dehydratace vzorku. Měření se liší v rozmezí teplot 230 - 450°C. Měření získané na VŠCHT, Praha ukazuje, že při teplotě okolo 300 - 460°C dochází k nevýraznému exoeffektu, který svědčí o poslední dehydrataci vzorku, avšak úbytek hmotnosti není příliš výrazný. Měření získaná na VŠST, Liberec tento úbytek zaznamenává asi jako 2 procentní. Naproti tomu naše měření nezaznamenala výrazný úbytek hmotnosti při teplotě kolem 230°C, kdy vzniká anhydrit síranu vápenatého  $\text{CaSO}_4$ .



## 5.5 Zhodnocení navrženého postupu termogravimetrického měření vzorků sádrových forem při jejich tepelném zpracování

Měření na termovahách, které vyrábějí zahraniční společnosti, jsou velmi přesná na termovahách se provádějí termogravimetrická měření i měření diferenční termické analýzy. Pro měření na těchto přístrojích se používají vzorky velmi malé, nejčastěji malé navážky. Zařízení, které bylo pro sledování tepelného zpracování sádrových forem zkonstruováno na KMM a věřeno lze hodnotit takto:

- a) Na zařízení je možno provádět měření nejrozličnějších tvarů od nejmenších průměrů až do průměru 50 - 60 mm a výšky vzorku 90 mm s dostatečnou citlivostí. Reproductivnost měření je velmi dobrá, odchylky nepřesahují 10 %.
- b) Při ohřevu vzorků lze mimo hmotnosti snímat i teplotu uvnitř vzorku i na jeho povrchu.
- c) Na zařízení je možno sledovat vliv různých parametrů na proces tepelného zpracování, tak, jak se chovají při tepelném zpracování konkrétních sádrových forem ( na př. tvar a velikost vzorku, rychlost ohřevu, teplotu, dobu prodlevy teploty atd. ).

Měření, která lze na daném zařízení provést, umožňují komplexní sledování chování vzorku během tepelného zpracování a napomáhají při volbě optimálního režimu tepelného zpracování konkrétních forem ze sádrových směsí.

## 5.6 Sledování vlivu tvarového a velikostního činitele sádrových forem při jejich tepelném zpracování

V podmínkách nestacionárního procesu, jako je i proces tepelného zpracování sádrových forem, je intenzita přestupu vody z ohřívané formy do sušící event. žhací atmosféry závislá také na součiniteli difuze vody, okolní atmosféře a času trvání difuze atd. Na přenos vody mezi formou a okolní atmosférou má vliv tvar a velikost formy.

Pomocí dříve uvedeného termogravimetrického měření vzorků byly získány také hodnoty okamžitých úbytků hmotnosti  $m_x$  v určitém časovém okamžiku, které byly dosazeny do vztahu  $m_y = m_{\text{poč.}} - m_x$ . Hodnoty  $m_y$  byly dále dosazeny do vztahu (2.7) a byly získány hodnoty součinitele úměrnosti resp. součinitele difuze, pro teplotu ve středě vzorku a teplotu v peci. Získané hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 49. Tyto hodnoty byly porovnány se získanými hodnotami součinitele úměrnosti  $\alpha$  při tepelném zpracování standardních vzorků  $\varnothing 50 \times 50$  mm z alabastrové sádry, které jsou uvedeny v tabulce č. 5.1

Tabulka č. 5.1 Průměrné hodnoty  $\alpha_s$  u vzorků z alabastrové sádry  $\varnothing 50 \times 50$  mm, vztažené na teplotu v peci

| Teplota<br>v peci /°C/             | 20   | 50   | 100  | 200  | 300  | 400  |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $-\alpha_s$ /g.min <sup>-1</sup> / | 0,03 | 0,18 | 0,61 | 3,26 | 4,20 | 6,15 |

Hodnoty uvedené v tabulce byly vypočítány též pomocí vztahu



( 2.7 ).

Teorie tepelného zpracování, resp. sušení sádrových forem podle LYKOVA / 30 / vychází z řešení vztahu ( 2.7 ):

$$lu \cdot \frac{m_{pod} - m_{kon}}{m_y - m_{kon}} = - \alpha \cdot \frac{t}{m_{kon}}$$

Pro obecné vyjádření sušicího procesu může být předpokládáno, že absolutní úbytek hmotnosti, resp. absolutní úbytek vody je přímo úměrný ploše povrchu sušeného dílu. Proto lze vyjádřit vztah:

$$\alpha = \alpha_j \cdot S \quad ( 5.2 )$$

kde  $\alpha_j$  - součinitel úměrnosti vztažený na jednotkový povrch dílu

S - styčná plocha

Hmotnost sádrové formy ( dílu ) m je možno vyjádřit jako součin objemu dílu a měrné hmotnosti. Pro konečnou hmotnost formy lze psát vztah:

$$m_{kon} = \rho_{kon} \cdot V \quad ( 5.3 )$$

kde V - objem dílu

$\rho_{kon}$  - měrná hmotnost dílu po sušení, resp. tepelném zpracování

Dosazením vztahu ( 5.3 ) do rovnice ( 2.7 ) získáme:

$$\ln \frac{m_{\text{poč}} - m_{\text{kon}}}{m_y - m_{\text{kon}}} = - \alpha \cdot \frac{S}{V} \cdot \frac{t}{\rho_{\text{kon}}} \quad (5.4)$$

kde  $S/V$  - charakterizuje tvar sušeného dílu, resp.  
 $R = V/S$ , což představuje redukovanou  
 tloušťku formy

Platnost zákonitosti určené vztahem ( 5.4 ) byla potvrzena sledováním procesu tepelného zpracování vzorku z alabastrové sádky s různým poměrem  $S/V$  (  $1/R$  ). S daným množstvím rozdělovací vody  $v/s = 0,7$ . Rozměry použitých vzorků byly odvozeny od válcovitého tvaru  $\varnothing 50$  mm s proměnou délkou. Zkoušky byly provedeny pro teplotu  $20^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ . Relativní vlhkost vzduchu se pohybovala **60 - 65** %. Při tomto experimentu byla sledována počáteční hmotnost vzorků (  $m_{\text{poč.}}$  ), okamžitá hmotnost vzorku  $m_x$  v určitém časovém okamžiku a měrná hmotnost vzorku. Získané hodnoty byly porovnány s vypočítanými hodnotami okamžitých hmotností vzorků  $m_y$  podle vztahu ( 5.4 ).

Získané hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 50 - 52 a grafické závislosti jsou uvedeny v příloze 53 - 56.

Sušení vzorků při teplotě  $200^{\circ}\text{C}$  bylo prováděno v sušárně STE - 26 s regulací teploty do  $200^{\circ}\text{C}$  a pohybem vnitřní atmosféry pomocí ventilátoru. Sušené vzorky byly kladeny během sušení na síťové pletivo tak, aby byly



podélně obtékány pohybující se sušící atmosférou.

### 5.6.1 Návrh nomogramu pro tepelné zpracování forem ze sádrových formovacích směsí nenapěněných

Protože použití sádrových forem napěněných je méně časté, bylo přistoupeno k návrhu nomogramu tepelného zpracování forem ze sádrových směsí nenapěněných.

Vzhledem k tomu, že dosavadní pokusy potvrdily prakticky použitelnou platnost uvažované teorie tepelného zpracování, bylo přistoupeno k řešení nomogramu pro snadné a urychlené stanovení času tepelného zpracování forem obecného tvaru a velikosti. Za základ pro konstrukci byla vzata závislost:

$$\ln \frac{m_{\text{poč}} - m_{\text{kon}}}{m_y - m_{\text{kon}}} = - \frac{\alpha \cdot S \cdot t}{V \cdot \rho_{\text{kon}}} = - \frac{\alpha_j \cdot t}{R \cdot \rho_{\text{kon}}}$$

Pro zobrazení byl zvolen souřadnicový nomogram, kde v první části je použito semilogaritmických stupnic. V další části jsou stupnicennelineární. Obrazem všech funkcí dílčích závislostí jsou jednoduché přímky procházející počátkem souřadného systému. Pro zvýšení přesnosti odečítání byly měněny moduly vynášených lineárních stupnic (přímky se proto zmenšily na lomené čáry). Nomogram byl nakreslen pro rozsahy následujících hodnot:

| Velikost                                                           | rozsah hodnot                                    |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| $t$                                                                | 0,1 - 20 / h /                                   |
| $-\alpha_j$                                                        | 0,1 - 10 / g.h <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup> / |
| $S/V$                                                              | 0 - 3 / cm <sup>-1</sup> /                       |
| $\ln \frac{m_{\text{poč}} - m_{\text{kon}}}{m_y - m_{\text{kon}}}$ | 0 - 6                                            |

R

$$5 - 0,4 / \text{cm/}$$

Protože vztah  $\frac{m_{\text{poč}} - m_{\text{kon}}}{m_y - m_{\text{kon}}}$  znamená reletivní obsah

vlhkosti vzhledem k maximálnímu obsahu vody v sádrové formě, lze stupnici  $\ln \frac{m_{\text{poč}} - m_{\text{kon}}}{m_y - m_{\text{kon}}}$  též snadno převést na % obsahu vody (vlhkosti) vzhledem k maximálnímu obsahu odstranitelných látek během tepelného zpracování. Jako odstranitelná látka je uvažována voda.

V této podobě je nomogram uveden v příloze č. 58. Stanovení hodnoty veličiny  $\alpha_j$  bylo řešeno vyhodnocením pokusů tepelného zpracování sádrových dílů - standardních vzorků ( $S = 193,8 \text{ cm}^2$ ) pro podmínky sušení v zařízení suška STE - 26 a speciální žihací peci (bez výměny a nuceného pohybu atmosféry). Závislost hodnoty  $\alpha_j = f(T)$  je uvedena v příloze č. 57. Tabulka naměřených hodnot  $\alpha_j$  se nachází též v příloze č. 57.

Při návrhu nomogramu tepelného zpracování sádrových forem bylo uvažováno zařízení pro sušení STE - 26 a žihací pec TSE - PEK 1, pro které byly zjištěny hodnoty  $\alpha_j$  experimentálně. Teorie, která byla při návrhu nomogramu uplatněna platí obecně.

#### 5.6.1.1

#### Příklady odečítání z nomogramu

1. Pro vysoušený díl sádrové formy s poměrem  $R = 1$ ,

$\rho_{\text{kon}} = 0,9, \alpha_j = 2,0$  (odpovídá tepelnému zpracování při vysoké teplotě  $400^\circ\text{C}$ ) za podmínek bez pohybu sušící atmosféry, je nutno stanovit časy pro tepelné zpracování resp. vysoušení 50%, 95%, 99%, 99,5% a 99,8% vody. Z nomogramu je možno odečíst ty-



to hodnoty:

| % vysušené vody | čas sušení | / hod./ |
|-----------------|------------|---------|
| 50              | 0,3        |         |
| 95              | 1,3        |         |
| 99              | 2,0        |         |
| 99,5            | 2,5        |         |
| 99,8            | 3,0        |         |

2. Máme stanovit průběh sušení, který probíhal stupňovitě:

4 hod. při teplotě  $50^{\circ}\text{C}$

4 hod. při teplotě  $100^{\circ}\text{C}$  .

16 hod. při teplotě  $200^{\circ}\text{C}$ .

Podle dříve zjištěných podkladů pro sušení v sušce ST 26 jsou hodnoty  $\alpha_j$  pro danou teplotu sušení 0,04, 0,15 a  $1,02 \text{ g. hod.}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Velikost dílu slévárenské formy byla  $200 \times 200 \times 40 \text{ mm}$ . Použitá sádrová směs měla po dokonalém vysušení měrnou hmotnost  $\rho_{\text{kon.}} = 0,9 \text{ g. cm}^{-3}$ . Z nomogramu lze odečísti:

- po vysušení na teplotu  $50^{\circ}\text{C}$  za dobu 4 hodin bude vysušeno méně než 50 % vody, kterou sádrový díl před sušením obsahoval. Při sušení na  $100^{\circ}\text{C}$  by stejné procento vody se vysušilo asi za 1,5 hod
- Po následujícím dalším setrvání na teplotě  $100^{\circ}\text{C}$  po dobu 4 hodin dojde k vysušení asi 55 % množství vody ( z nomogramu odečítáme celkovou dobu, t.j. 5,5 hodiny ). Stejně procento vysušení by bylo možno dosáhnout při teplotě  $200^{\circ}\text{C}$

za dobu asi 1 hodiny.

- c) Po následujícím sušení 16 hodin na teplotě  $200^{\circ}\text{C}$ ,  
t.j. celkem při době sušení  $16 + 1$  je procento vysu-  
šení vyšší než 99,8 %.

Hodnocený způsob sušení dále pokračuje žiháním při teplo-  
tě  $400^{\circ}\text{C}$  po dobu 4 hodin.

Z uvedených příkladů je zřejmé, že použití nomo-  
gramu je výhodné k účelům hodnocení a navrhování suši-  
cích procesů při tepelném zpracování sádrových dílů.

#### 5.6.2. Shrnutí výsledků sledování vlivu tvarového a velikost- ního činitele sádrových forem ~~se~~

Při sledování vlivu tvarového a velikostního čini-  
tele sádrových forem byla vzata za základ teorie sušení  
podle LYKOVA a pomocí ní určen součinitel úměrnosti .  
Výpočet součinitele úměrnosti byl proveden z naměřených  
temogravimetrických výsledků okamžitých hmotností vzor-  
ků, vztažený pro teplotu středu vzorku a pro teplotu v  
pecí, což vyjadřuje příslušný index ( viz příloha č. 49 ).

Součinitel úměrnosti ~~se~~ pro jednotlivé vzorky je ná-  
sledující:

|                     |        |                              |
|---------------------|--------|------------------------------|
| Ø 20 x 50 mm        | - 0,05 | - 2,60 g . min <sup>-1</sup> |
| Ø 35 x 50 mm        | - 0,06 | - 4,40 g . min <sup>-1</sup> |
| Ø 50 x 50 mm        | - 0,11 | - 8,45 g . min <sup>-1</sup> |
| 22,5 x 22,5 x 90 mm | - 0,10 | - 7,70 g . min <sup>-1</sup> |

Hodnoty součinitele ~~se~~ pro napěněné sádrové směsi jsou  
u jednotlivých vzorků následující:

|              |        |                              |
|--------------|--------|------------------------------|
| Ø 20 x 50 mm | - 0,12 | - 0,71 g . min <sup>-1</sup> |
|--------------|--------|------------------------------|



$\varnothing 35 \times 50 \text{ mm} \quad - \quad 0,24 \quad - \quad 1,81 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$   
 $\varnothing 50 \times 50 \text{ mm} \quad - \quad 0,29 \quad - \quad 5,00 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$   
 $22,5 \times 22,5 \times 90 \text{ mm} \quad - \quad 0,12 \quad - \quad 3,03 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$

Maximální hodnota součinitele  $\alpha$  odpovídá nejvyšší teplotě  $400^{\circ}\text{C}$ , s klesající teplotou je nižší i hodnota součinitele  $\alpha$ . U napěněných sádrových forem jsou hodnoty  $\alpha$  pro jednotlivé teploty nižší, což je pravděpodobně způsobeno strukturou sádrové formy vytvořenou napěňováním.

Při sledování součinitele  $\alpha$  vztaženého na teplotu v peci jsou hodnoty podstatně nižší, pohybují se od  $0,04 - 3,26 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$  u vzorků forem nenapěněných. U vzorků forem napěněných se tyto hodnoty pohybují od  $0,06$  do  $2,05 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ . Takto vypočítané hodnoty jsou porovnatelné s výsledky součinitele úměrnosti  $\alpha$  získanými při tepelném zpracování vzorků  $\varnothing 50 \times 50 \text{ mm}$  z alabastrové sádry, které se pohybují od  $0,03$  do  $6,15 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Z vypočítaných hodnot součinitele  $\alpha$  vyplývá, že na velikost jeho hodnoty má vliv také tvarový a velikostní faktor. Čím je větší vzorek, tím mu odpovídá vyšší hodnota součinitele  $\alpha$  při dané teplotě. Platnost získaných výsledků tohoto součinitele byla potvrzena při sušení vzorků  $\varnothing 50 \text{ mm}$  o různé délce při teplotě  $20$  a  $200^{\circ}\text{C}$ . Teplota  $200^{\circ}\text{C}$  byla volena úmyslně, neboť tato teplota podle dříve získaných poznatků / 20 /, odděluje sušení sádrových forem od jejich žhání. Pro vlastní výpočet byly použity hodnoty součinitele úměrnosti  $\alpha$  s dle tabulky 5.1.

Pro teplotu  $20^{\circ}\text{C}$  je  $0,3 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$  a pro  $200^{\circ}\text{C}$   $3,26 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ , z těchto hodnot byl určen součinitel  $\alpha_j$ , se kterým dále bylo počítáno při určování okamžitých hmotností vzorků výpočtem  $m_y$  podle vztahu ( 2.7 ). Tyto hodnoty byly porovnány s hodnotami  $m_y$  získanými odvážením vzorků. Ze získaných výsledků je patrné, že pro teplotu  $20^{\circ}\text{C}$  rozdíly hmotností získané výpočtem a vážením nepřesahují 5 % a pro teplotu  $200^{\circ}\text{C}$  rozdíl získaných hodnot nepřesahuje 8 %.

Závěrem lze říci, že použitá teorie sušení je správně uplatněna při návrhu monogramu tepelného zpracování, resp. sušení.



## 6.0 VÝPOČTOVÉ A EXPERIMENTÁLNÍ METODY PŘI SLEDOVÁNÍ TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ SÁDROVÝCH FOREM

### 6.1 Aplikace fyzikálně chemických výpočtů pro reakce probíhající v sádrové formě při jejím tepelném zpracování

Při řešení fyzikálně chemického procesu tepelného zpracování forem ze sádrových směsí byly použity termodynamické hodnoty soustavy  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ . Tato soustava tvoří nejrozumnější sloučeniny, lišící se obsahem vnitřní energie, / 49 / které vznikají při teplotách 20 - 600°C. Bylo identifikováno celkem 6 pevných fází, které jsou uvedeny v tabulce 6.1

Tabulka 6.1

| Součenina                                         | $C_p / \text{J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}$ | $\Delta H_{298}^0 / \text{J.mol}^{-1}$ | $S_{298}^0 / \text{J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}$ |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|
| $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$         | $91,44 + 0,318 T$                      | -2007151,92                            | 194,27                                       |
| $\alpha\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ | $70,96 + 0,163 T$                      | -1560922,77                            | 139,62                                       |
| $\beta\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$  | $48,06 + 0,255 T$                      | -1558829,37                            | 134,39                                       |
| $\alpha\text{CaSO}_4$ III                         | $59,03 + 0,138 T$                      | -1407225,34                            | 108,43                                       |
| $\beta\text{CaSO}_4$ III                          | $59,03 + 0,138 T$                      | -1404880,74                            | 108,43                                       |
| $\text{CaSO}_4$ II                                | $59,03 + 0,138 T$                      | -1418194,76                            | 106,76                                       |
| $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$                    | $31,19 + 0,008 T$                      | -241984,47                             | 188,95                                       |
| $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$                    | 75,44                                  | -286029,61                             | 70,34                                        |

Řešení fyzikálně chemického procesu tepelného zpracování sádrových forem bylo zaměřeno na chování dihydrátu síranu vápenatého při jeho ohřevu. Sledování jeho přeměn bylo doloženo fyzikálně chemickým výpočtem. Základem tohoto výpočtu je sledování závislosti změny termodynamické funkce  $\Delta G$  ( změna Gibbsovy energie ) na teplotě, která doprovází

uvažovaný děj. Jak již bylo uvedeno, samovolně probíhají jen děje, při kterých je  $\Delta G < 0$  nebo Gibbsova energie klesá.

Teplotní závislost funkce ( $\Delta G^0/T$ ) je možno vyjádřit parciální derivací /10/:

$$\left[ \frac{\partial(\frac{\Delta G^0}{T})}{\partial T} \right]_P = \frac{T \cdot \left( -\frac{\partial \Delta G^0}{\partial T} \right) - \Delta G^0}{T^2} \quad (6.1)$$

Teplotní závislost reakčního tepla je dána Kirchhoffovou rovnicí:

$$\Delta H_T^0 = \int \Delta C_p \cdot dT + I_H \quad (6.2)$$

kde  $I_H$  - integrační konstanta, kterou můžeme určit v závislosti na známé hodnotě  $\Delta H^0$  při jedné teplotě na příklad  $T = 298 \text{ K}$ .

Pak lze psát: 
$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \int \Delta C_p \cdot dT$$

Pak rovnice 6.1 nabývá tvaru:

$$\frac{\Delta G^0}{T} = -\int \frac{1}{T^2} \left[ \int \Delta C_p \cdot dT + I_H \right] \cdot dT + I_G \quad (6.3)$$

Tento integrál lze vyhodnotit jsou-li známé kapacity tepelné zúčastněných látek a údaje nutné pro určení integračních konstant  $I_H$  a  $I_G$ .



kde  $I_G$  - integrační konstanta, kterou můžeme určit, známe-li  $G^\circ$  při jedné teplotě, na př. 298 K

Molární tepla jsou udána nejčastěji empirickými rovnicemi tvaru:  $C_p = a + bT + cT^{-2}$ , takže funkci  $\Delta H^\circ(T)$  lze rozvinout v řadu:

$$\Delta H^\circ(T) = \int (\Delta a + \Delta bT + \Delta cT^{-2}) \cdot dT + I_H = \Delta aT + \Delta bT^2/2 + \Delta cT^{-1} + I_H$$

dosazením do rovnice 6.3 obdržíme vztah 6.4.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta G_T^\circ}{T} &= - \int \frac{1}{T^2} \left[ \Delta aT + \frac{1}{2} \Delta bT^2 - \frac{1}{2} \Delta cT^{-1} + I_H \right] \cdot dT + \\ &+ I_G = -\Delta a \cdot \ln T - \frac{1}{2} \Delta bT - \frac{1}{2} \Delta cT^{-1} + \\ &+ \frac{I_H}{T} + I_G \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta G_T^\circ &= I_H - \Delta a \cdot T \ln T - \frac{1}{2} \Delta b \cdot T^2 - \frac{1}{2} \Delta c \cdot T^{-1} + \\ &+ I_G \cdot T \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$\begin{aligned} I_H &= \Delta H_{298}^\circ - \Delta a \cdot 298 - \Delta b \cdot \frac{298^2}{2} + \\ &+ \Delta c \cdot \frac{1}{298} \end{aligned}$$

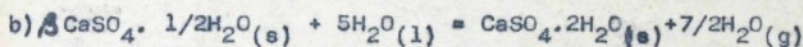
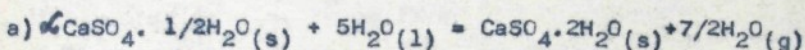
$$\begin{aligned} I_G &= \frac{\Delta G_{298}^\circ}{298} + \Delta a \cdot \ln 298 + \frac{1}{2} \Delta b \cdot 298 + \\ &+ \frac{1}{2} \Delta c \cdot \frac{1}{298^2} - \frac{I_H}{298} \end{aligned}$$

Pro další výpočty budeme uvažovat alabastrovou sádku, jejíž hlavní složku tvoří polohydrát a sádku stavební, která je převážně tvořena anhydritem II tak, jak bylo dříve uvedeno.

#### 6.1.1 Aplikace výpočtu pro alabastrovou sádku

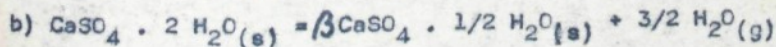
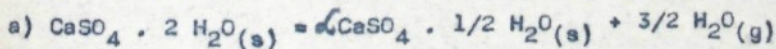
Dle zkoušky konsistence je pro rozdělení sádkové břečky potřeba více vody, což odpovídá  $5 \text{ H}_2\text{O}$ . Pro jednoduché formy polohydrátu, který je hlavní složkou této sádky lze psát rovnice:

I. Rozdělení sádkové břečky a její tuhnutí při výrobě sádkové formy.



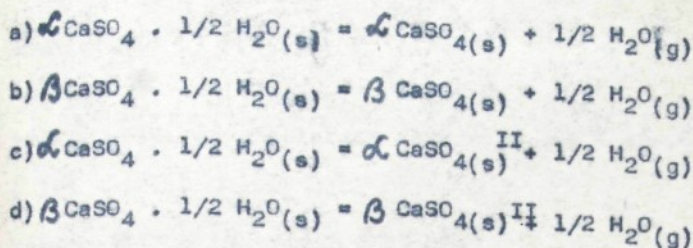
Pro slévarenskou technologii je takto vyrobená forma nepoužitelná, neboť voda v ní obsažená se při nalití roz-taveného kovu do formy začne intenzivně odpařovat, což se projeví na kvalitě získaných odlitků. Z tohoto důvodu je nutno tyto formy tepelně zpracovávat, sušit a žíhat tak, jak již bylo uvedeno. Při ohřevu těchto forem probíhají tyto reakce:

II. Částečně se uvolňuje voda vázaná, z dihydrátu síranu vápenatého vzniká polohydrát:



III. Uvolňuje se zbylá voda vázaná a polohydrát síranu vápenatého se mění na anhydrit:





Vypočítané termodynamické hodnoty pomocí vztahů 6.1 - 6.4 pro uvedené chemické rovnice jsou v příloze č. 42 a grafické znázornění je v příloze 45 - 46.

Teplotní intervaly, při kterých reakce začínají probíhat jsou následující:

$$\text{Rovnice I a) } \Delta G_{371}^0 = 56,79 \text{ J}$$

$$\Delta G_{371,5}^0 = -109,32 \text{ J}$$

Reakce začíná probíhat v teplotním intervalu 371 - 371,5 K ( 98 - 98,5°C ).

$$\text{Rovnice I b) } \Delta G_{369}^0 = 68,42 \text{ J}$$

$$\Delta G_{369,5}^0 = -95,50 \text{ J}$$

Reakce začíná probíhat v teplotním intervalu 369 - 369,5 K ( 96 - 96,5°C ).

$$\text{Rovnice II a) } \Delta G_{379,5}^0 = 49,42 \text{ J}$$

$$\Delta G_{380}^0 = -57,80 \text{ J}$$

Reakce začíná probíhat v teplotním intervalu 379,5 - 380 K ( 106,5 - 107°C )

$$\text{Rovnice II b) } \Delta G_{382}^0 = 94,65 \text{ J}$$

$$\Delta G_{382,5}^0 = -15,39 \text{ J}$$

Reakce začíná probíhat v teplotním intervalu 382 - 382,5 K ( 109 - 109,5°C ).

$$\text{Rovnice III a) } \Delta G_{454}^0 = 14,63 \text{ J}$$

$$\Delta G_{454,5}^0 = -20,64 \text{ J}$$

Reakce probíhá v teplotním intervalu 454 - 454,5 K  
( 181 - 181,5°C ).

$$\text{Rovnice III b) } \Delta G_{491}^0 = 29,00 \text{ J}$$

$$\Delta G_{491,5}^0 = - 0,976 \text{ J}$$

Reakce probíhá v teplotním intervalu 491 - 491,5 K  
( 218 - 218,5°C )

$$\text{Rovnice III c) } \Delta G_{307}^0 = 25,20 \text{ J}$$

$$\Delta G_{307,5}^0 = - 10,06 \text{ J}$$

Reakce probíhá při teplotě 307 - 307,5 K  
( 34 - 34,5°C )

$$\text{Rovnice III d) } \Delta G_{293,5}^0 = 23,545 \text{ J}$$

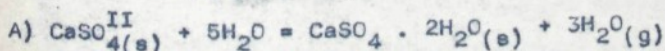
$$\Delta G_{294}^0 = - 9,928 \text{ J}$$

Reakce začíná probíhat v teplotním intervalu 293,5 - 294 K  
( 20,5 - 21°C )

#### 6.1.2 Aplikace výpočtu pro stavební sádku

Dle zkoušky konsistence pro výrobu sádkové břečky je zapotřebí více vody, což odpovídá 5 H<sub>2</sub>O. Pro výpočet budeme uvažovat opět pouze hlavní složku, která pro stavební sádku je anhydrit II, lze psát rovnice:

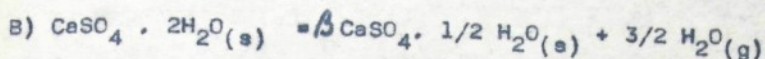
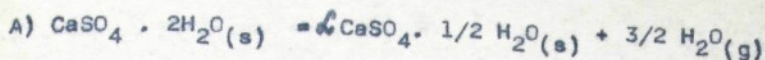
I. Rozdělávání sádkové břečky a její tuhnutí při výrobě sádkové formy:



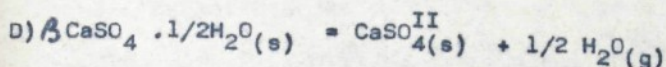
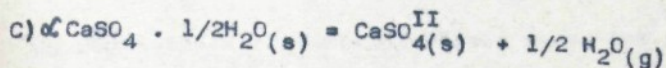
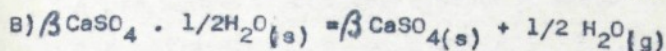
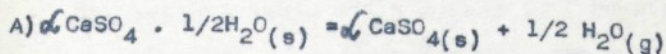
Při tepelném zpracování sádkových forem se uvolňuje voda volná a voda vázaná, což znázorňují následující rovnice:

II. Uvolňuje se částečně vázaná voda a dihydrát síranu vápenatého se mění na polohydrát.





III. Uvolňuje-li se zbylá vázaná voda, pak polohydrát se mění na anhydrit.



Jak je patrné, rovnice od II A) do III D) jsou stejné jako rovnice II a) - III d). Vypočítané termodynamické hodnoty rovnic I A) - III D) jsou uvedeny v příloze č. 43 a grafické znázornění je v příloze č. 47 a č. 48.

Teplotní interval pro rovnici I A) odpovídá teplotě 388 - 388,5 K, což je tedy 115 - 115,5°C.

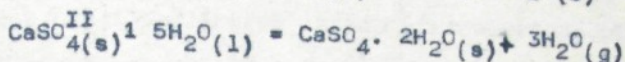
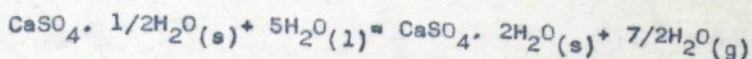
$$\Delta G^0_{388} = 94,35 \text{ J}$$

$$\Delta G^0_{388,5} = - 32,92 \text{ J}$$

### 5.1.3 Zhodnocení výpočtů

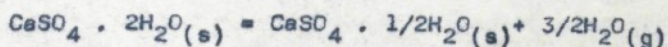
Výpočty byly prováděny pro hlavní složku alabastrové sádky -  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s})$  a stavební sádky -  $\text{CaSO}_4^{\text{II}}(\text{s})$ , neboť tyto složky mají největší vliv na chování sádky. V procesu tuhnutí a tepelného zpracování sádkových forem probíhají děje, které jsou popsány chemickými rovnicemi. Pro tyto rovnice byly vypočítány hodnoty teplotní závislosti  $\Delta G_T^0$ . Tyto hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 44.

1. Uvolňuje-li se voda volná:



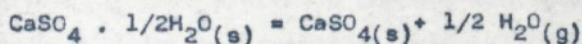
Tento děj začíná intenzivně probíhat pro polohydrát při teplotě 369 - 371,5 K, což je ( 96 - 98,5°C ) a pro anhydrit při teplotě 388 - 388,5 K, to je 115 - 115,5°C.

2. Uvolňuje-li se částečně vázaná voda, pak dihydrát se mění na polohydrát:



Tato rovnice je splněna a děj začne probíhat v teplotním intervalu 379,5 - 382,5 K, ( 106 - 109,5°C ). podle toho, zdali bude vznikat více polohydrátu C nebo B .

3. Uvolňuje-li se voda vázaná, pak polohydrát se mění na anhydrit:



Rovnice je splněna a děj začne probíhat v teplotním intervalu 454 - 491,5 K ( 181 - 218,5°C ), kdy vzniká anhydrit III. Z grafické závislosti je zřejmé, že pochod při kterém vzniká anhydrit II  $\text{CaSO}_4^{\text{II}}(\text{s})$  by měl teoreticky probíhat již za teploty 294 K ( 21°C ), tento pochod při této teplotě probíhá velmi pomalu, a proto se nejdříve uvolňuje voda volná, kdy se mění dihydrát při teplotě 370 K ( 97°C ) na polohydrát. Při teplotách ještě vyšších nad 455 K ( 182°C ) se začíná vypařovat zbylá voda vázaná



a vzniká anhydrit  $\text{CaSO}_4(\text{s})$ .

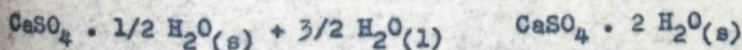
Všechny tyto výpočítané hodnoty jsou teoretické, závisí pouze na použitých termodynamických datech síranu vápenatého. V praxi však získané hodnoty teploty přeměny jsou závislé na kvalitě používané sádry, na podmínkách přípravy forem. Při praktickém procesu tepelného zpracování nejsou děje přesně ohraničeny, ale vzájemně se prolínají.

Ve spolupráci s Vysokou školou chemickotechnologickou v Praze byla provedena analýza alabastrové sádry. Bylo zjištěno, že překrystalizace dihydrátu síranu vápenatého na polohydrát probíhá od teploty  $40^\circ\text{C}$ . Tato přeměna je ukončena v rozmezí teplot  $125 - 150^\circ\text{C}$ . Při teplotách  $190 - 240^\circ\text{C}$  se mění polohydrát síranu vápenatého na anhydrit. Dále při této analýze byla zjištěna přeměna při teplotě  $570^\circ\text{C}$ , kdy probíhá přeměna křemene, který alabastrová sádra obsahuje. Tato analýza potvrdila získané výpočty a teploty přeměn jednotlivých fází síranu vápenatého, které budou využity při návrhu optimálního režimu tepelného zpracování sádrových forem.

Z důvodu dobré zpracovatelnosti sádrové suspenze je pro její přípravu třeba více vody. To znázorňuje chemická rovnice:



Z hlediska ryze chemického vzniká z polohydrátu síranu vápenatého dihydrát :



příprava sádrové suspenze podle této rovnice nezaručuje dobrou a technologicky nutnou tekutost sádrové směsi.

Dále bylo podle stechiometrických výpočtů zjištěno, že dihydrát síranu vápenatého váže 18,6 % krystalické  $\text{H}_2\text{O}$  a polohydrát 6,67% kryst.  $\text{H}_2\text{O}$ . Tyto hodnoty byly ověřeny prakticky chemickou analýzou prováděnou na VŠCHT v Praze na katedře silikátů.



Výsledkem těchto výpočtů a analýzy je znázornění existencí jednotlivých forem síranu vápenatého při tuhnutí a tepelném zpracování. Toto znázornění je uvedeno v příloze č. 59 a mělo by rozšířit teoretické poznatky o síranu vápenatém při jeho uplatnění při výrobě sádrových forem.

## 6.2 Experimentální stanovení fází soustavy $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$

V návaznosti na rozbor fází soustavy  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  provedený v kapitole 1.1 a pro potřeby posouzení výsledků výpočtů provedených v kapitole 6.1 byly zkoumány možnosti provedení fázové analýzy této soustavy pro některé vybrané sádrové směsi.

Po konzultaci a projednání možností provedení fázové analýzy byly ve Výzkumném ústavu stavebních hmot v Brně provedeny tyto analýzy /73/:

1. Rentgenová analýza
2. Infračervená spektroskopie
3. Elektronová mikroskopie

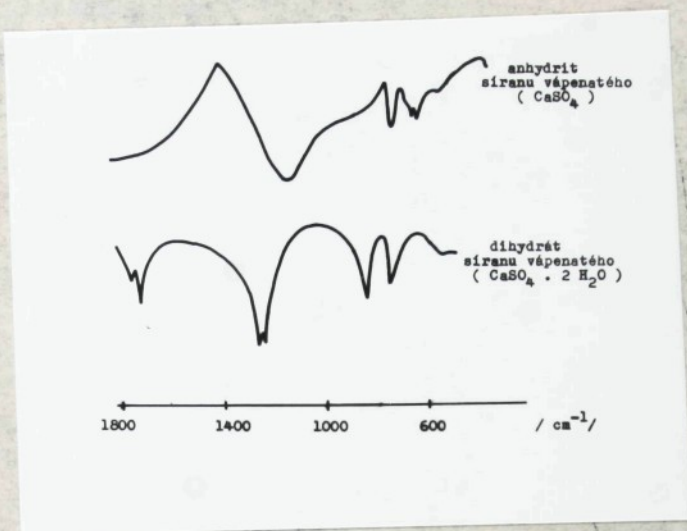
Rentgenová analýza je vhodná k určování anhydritu síranu vápenatého a dalších minerálů obsahujících krystalicky vázanou vodu. Důležité hodnoty rentgenové analýzy síranu vápenatého jsou uvedeny v publikaci /74/.

Ve VÚSH byl proveden rentgenografický rozbor na automatickém difraktografu PHILIPS APD 15.

Infračervená spektroskopie se používá k identifikaci dihydrátu síranu vápenatého od jeho polohydrátu. Na obr. 6.1 jsou uvedena spektra anhydritu a dihydrátu síranu vápenatého /74/.

V tabulce 6.2 jsou uvedeny hodnoty infračervených spektrálních čar některých forem síranu vápenatého /74/.





Obr. 6.1 Charakteristické průběhy spektrálních  
čar síranu vápenatého

Tabulka 6.2

|                            |     |     |                          |
|----------------------------|-----|-----|--------------------------|
| Dihydrát síranu vápenatého | 605 | 673 | / $\text{cm}^{-1}$ /     |
| Anhydrit síranu vápenatého | 597 | 616 | 676 / $\text{cm}^{-1}$ / |

Tato metoda je vhodná pro kvalitativní a polokvantitativní analýzu. Infračervená spektrální analýza byla na VÚSH provedena na infračerveném spektroskopu fy PERKIN - Elmer, model Infra-cord 337, s rozsahem  $f = (4000 - 400) \text{ cm}^{-1}$ , to je odpovídající vlnová délka (  $2,5 - 25 \mu\text{m}$  ). Měření vzorky byly vylisovány z homogenizované směsi s KBr ve vakuu v podobě "tablet". Jako srovnávací vzorek byla použita "tableta" z čistého KBr.

Elektronová mikroskopie pomocí rastrovacího mikroskopu umožňuje sledovat krystalickou strukturu produktů ( forem ) síranu vápenatého při hydrataci a dehydrataci.

Stereoelektrogramy vzorků byly ve VÚSH provedeny na elektronovém mikroskopu Cambridge Stereoscar 2A.

### 6.2.1 Druhy hodnocených sádrových směsí

K rozboru bylo použito 12 vzorků ze tří druhů sádrových směsí a různě tepelně ovlivněných, jejich přehled je uveden v tabulce 6.3

Tabulka 6.3

| Číslo vzorku | Označení ve VÚSH | Druh vzorku:                             |
|--------------|------------------|------------------------------------------|
| 1.           | 366              | 50 - 50 sádrová směs ( prášek )          |
| 2.           | 367              | 50 - 50 sádrová směs po ztuhnutí         |
| 3.           | 368              | 50 - 50 sádrová směs po TZ na 400°C      |
| 4.           | 369              | 50 - 50 sádrová směs po odlití Al sl.    |
| 5.           | 358              | Gloria speciál ( prášek )                |
| 6.           | 359              | Gloria speciál po ztuhnutí               |
| 7.           | 360              | Gloria speciál po TZ na 400°C            |
| 8.           | 361              | Gloria speciál po odlití Al slitiny      |
| 9.           | 362              | Anglická sádra ( prášek )                |
| 10.          | 363              | Anglická sádrová směs ( prášek )         |
| 11.          | 364              | Anglická sádrová směs po TZ na 120°C     |
| 12.          | 365              | Anglická sádrová směs po odlití Al slit. |

### 6.2.2 Výsledky rozborů sledovaných sádrových směsí

Výsledky rozboru sádrových směsí prováděné třemi uvedenými metodami umožňují kvalitativně a částečně i kvantitativní stanovení hlavních fází síranu vápenatého v soustavě nebo případně i jiných minerálů.

Na základě zprávy / 73 / lze složení jednotlivých druhů sádrových směsí vyjádřit takto:



### Sádrová směs 50 - 50

Sádrová směs 50 - 50  
( prášek )

Sádrová směs 50 - 50  
po ztuhnutí

Sádrová směs 50 - 50  
po TZ na 400°C

Sádrová směs 50 - 50  
po TZ a po odlití

#### Obsahuje:

velké množství  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ,  
malé množství křemene  
malé množství anhydritu ( $\text{CaSO}_4$ )  
nepatrné množství muskovitu  
velké množství  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$   
nepatrné množství  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$   
nepatrné množství muskovitu  
velké množství  $\text{CaSO}_4^{\text{II}}$   
malé množství  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$   
nepatrné množství muskovitu  
velké množství  $\text{CaSO}_4^{\text{II}}$   
malé množství  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$   
nepatrné množství muskovitu

Spektrogramy jednotlivých vzorků jsou uvedeny v příloze  
č. 80 a krystalická struktura sádrové směsi 50 - 50 po ztuhnutí  
je v příloze 81 a vnitřní struktura sádrové směsi 50 - 50  
po odlití slitiny hliníku je uvedena v příloze č. 82.

### Gloria speciál

Gloria speciál  
( prášek )

Gloria speciál po  
ztuhnutí

Gloria speciál po  
TZ na 400°C

Gloria speciál po  
TZ a odlití

velké množství křemene  
malé množství  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$   
malé množství  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$   
malé množství  $\text{CaSO}_4^{\text{III}}$   
velké množství křemene  
menší množství  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$

velké množství křemene  
 $\text{CaSO}_4^{\text{II}}$

Spektrogramy vzorků Gloria speciál jsou uvedeny v příloze č. 83. Krystalická struktura sádrové směsi Gloria speciál po ztuhnutí je uvedena v příloze č. 84 a po odlití v příloze č. 85.

#### Anglická sádra, sádrová směs

|                                                                     | Obsahuje:                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Anglická sádra<br>( prášek )                                        | velké množství $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$<br>nepatrné množství $\text{CaSO}_4^{\text{III}}$                    |
| Anglická sádrová směs<br>( prášek )                                 | velké množství $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$<br>nepatrné množství $\text{CaSO}_4^{\text{III}}$<br>$\text{CaCO}_3$ |
| Anglická sádrová směs<br>po ztuhnutí a TZ<br>na $120^\circ\text{C}$ | velké množství $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$<br>nepatrné množství                                                   |
| Anglická sádrová směs<br>po TZ a odlití                             | $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ , $\text{CaSO}_4^{\text{III}}$ , $\text{CaCO}_3$                                    |

Spektrogramy jednotlivých vzorků anglické sádry a sádrové směsi jsou uvedeny v příloze č. 86. Krystalická stavba anglické sádrové směsi po odlití slitiny hliníku je uvedena v příloze č. 87 a 88.

#### 6.2.3 Zhodnocení výsledků rozboru sádrových směsí

Podle jednotlivých výsledků fázové analýzy soustavy  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  sádrových směsí je patrné, že směsi domácí proveniencce jsou tvořeny polohydrátem síranu vápenatého, který po ztuhnutí s  $\text{H}_2\text{O}$  vytváří dihydrát, který při teplotách nad  $120^\circ\text{C}$  se mění na polohydrát a dále na anhydrit. Sádrová směs Gloria speciál je vedle polohydrátu síranu vápenatého tvořena velkým množstvím křemene. Naproti tomu anglická směs v práškové podobě je tvořena polohydrátem síranu vápenatého a s vodou vzniká



dihydrát síranu vápenatého, u něhož nebyly zjištěny podstatné přeměny ani po tepelném zpracování na teplotu 120°C, ani po ohřevu teplem odlitku z hliníkové slitiny.

Specifikou použití tohoto druhu sádrové směsi ( u nás v n. p. METAZ Týnec nad Sázavou ) je výroba napěněných forem, které jsou určeny pro výrobu velmi členitých a tenkostěnných odlitků ze slitin hliníku. Tyto formy se vyznačují velkým objemem ve srovnání s objemem odlitků a dále nižšími hodnotami tepelně fyzikálních vlastností /23/.

Uvedené skutečnosti jsou hlavním důvodem pro celkově malé tepelné ovlivnění sádrové směsi a tím i poměrné stability dihydrátu síranu vápenatého.

Velmi podobné poznatky a zkušenosti byly získány při ověřování napěněných forem ze směsi 50 - 50, které byly tepelně zpracovány ohřevem na teplotu do 200°C /22/. U sádrových směsí obsahujících značný podíl křemenného ostřiva ( Gloria speciál ) nezajišťuje napěnění potřebnou kvalitu formy. Tepelné zpracování ne- napěněných forem musí být proto prováděno ohřevem na teploty vyšší tj. do 400°C, což je spojeno s průběhem fázových přeměn soustavy  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ .

## 7.0 NÁVRH A OVĚŘENÍ REŽIMU TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ SÁDROVÝCH FOREM A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH ODLITKŮ

Výsledkem výzkumu tepelného zpracování sádrových forem bylo navržení tohoto režimu pro dané sádrové formy a jeho ověření pomocí získaných odlitků. Na základě poznatků teoretické oblasti, ale především z výsledků termogravimetrického měření, uvedených v kapitole 5 byl pro konkrétní sádrové formy navržen režim tepelného zpracování. Při ověření těchto režimů tepelného zpracování sádrových forem se postupovalo ve třech oblastech, kdy byly zhotoveny tři tvarově různé typy odlitků a jím odpovídající množství sádrových forem. Tvarové a velikostní parametry odlitků byly zvoleny v mezích, které lze očekávat od technologie přesného lití sádrových forem.

### 7.1 Výroba a tepelné zpracování sádrových forem pro zhotovení odlitků tvaru desky s proměnnou tloušťkou

Byly navrženy tvary zkušebních odlitků s různou místní tloušťkou stěny. Tvarové řešení odlitků bylo provedeno tak, aby při zaformování bez dutin, vytvořených jádrem, mohl být studován případný vliv brzděného smrštění. K tomuto účelu byly navrženy tvary odlitků, které jsou uvedeny v příloze č. 60, kde v tabulce jsou rozměry modelů tvarově podobných. Celkem byly vyrobeny 4 modely s základními rozměry odpovídající požadavkům kladeným na odlitky získané litím do sádrových forem. Pomocí těchto modelů byly zhotoveny spodní části forem deskovitého tvaru. Pro příslušné modely byly zhotoveny odlitky A - D. Jednotlivým modelům odpovídají tyto velikosti dílů sádrové formy a příslušné hodnoty R, které jsou uvedeny v následující tabulce:

A - forma 170 x 116 x 30 mm      R = 1.04 cm



- B - forma 86 x 56 x 15 mm     $R = 0,52 \text{ cm}$   
 C - forma 43 x 30 x 8 mm     $R = 0,27 \text{ cm}$   
 D - forma 170 x 116 x 30 mm     $R = 1,00 \text{ cm}$

Byla též sledována výše uvedená redukováná tloušťka formy ( určující rozměr )  $R = V/S$  ( objem formy/povrch formy ). Pro výrobu těchto forem byla použita sádrová směs tvořená z 50 % hmotnostního podílu alabastrové sádry MG 11 druh II podle TGL 21843, a 50% hmotnostního podílu stavební sádry. Tato směs je označována 50- 50. Pro přípravu sádrové saspense bylo použito na 1000 g směsi 720 ml vody 18° C teplé. Dále byly z této směsi vyrobeny i formy napěněné, kdy na 1000 g sádrové směsi je třeba 700 ml vody a 35 ml atoxonové pěny. Příprava napěněné sádrové saspense byla provedena podle dříve uvedeného postupu v kapitole 1.2. Formy byly vyrobeny obléváním modelu kašovitou saspensí v příslušném formovacím rámečku, který byl zhotoven z plechu tloušťky 1 mm. Byl položen na skleněnou formovací desku a utěsněn modelovací hmotou. Po ztuhnutí sádrové saspense, které trvalo 20-25 min. ( podle druhu sádrové směsi ), byly formy vyjmuty z rámečku a odděleny od modelu. Tím byly formy připraveny k tepelnému zpracování.

Sestavené sádrové formy jsou rozděleny horizontální rovinou na vrchní a spodní část, v které je dutina pro zhotovení odlitku. Vtokový kanál byl opatřen pomocným dílem formy ( vyhrazovákem ) výšky 100 mm pro formy menší 50 mm. Průměr svíslého tokového kanálu se pohyboval od 15 do 20 mm. Při odlévání byla použita slitina hliníku 424331 dle ČSN 424331. Odlévání slitiny trvalo 5 - 7 s podle velikosti odlitku. Teploty forem pro odlévání se pohybovaly od 120 - 160°C.

### 7.1.1 Režim tepelného zpracování sádrových forem

Na základě dosud získaných poznatků byl navržen režim tepelného zpracování, který splňuje podmínku tepelného zpracování celé skupiny sádrových forem současně. Při návrhu se vycházelo z hlavní části sušení, které bylo prováděno v sušicím zařízení STE - 26 s výměnnou atmosférou, probíhalo do teploty  $200^{\circ}\text{C}$ , kdy se ze sádrové formy odstraňuje převážně voda volná. Další část tepelného zpracování - žihání byla prováděna v žihací komorové peci TS - PEK - 1 při teplotě prodlevy  $400^{\circ}\text{C}$ . Podle získaných poznatků o chování vzorku sádrových forem při jejich tepelném zpracování byla doba sušení a žihání sledována experimentálně. Režim sušení těchto forem probíhá nejčastěji při teplotě prodlevy v peci  $200^{\circ}\text{C}$ , respektive v sušicím zařízení. Doba se pohybovala od 2 do 4 hodin podle velikosti formy, resp. redukované tloušťky formy. Žihání těchto forem probíhalo po dobu 2 - 5 hodin při teplotě v peci  $400^{\circ}\text{C}$ , kdy při této teplotě je ukončeno uvolňování vody vázané, tak jak bylo zjištěno gravimetrickou metodou.

V příloze č. 61 je patrná doba potřebné prodlevy na teplotě  $200^{\circ}\text{C}$  pro formy nenapěňené a  $120^{\circ}\text{C}$  pro formy napěňené. Doba prodlevy teploty pro jednotlivé části tepelného zpracování obou druhů forem byla zjištěna experimentálně pomocí redukované tloušťky formy R. Ze získaných časů sušení a žihání příslušných forem byla sestrojena závislost doby tepelného zpracování na určujícím rozměru formy R. Doba t je délka prodlevy teploty v peci  $400^{\circ}\text{C}$  pro sádrové formy nenapěňené a  $200^{\circ}\text{C}$  pro formy vyrobené z napěňené sádrové směsi. Délka doby sušení pro jednotlivé druhy formovací směsi odpovídá též tomuto diagramu.

V příloze č. 60 jsou uvedeny rozměry získaných odlitků z nenapěňených forem a příloha č. 61 obsahuje rozměry odlitků



z forem napěněných. Z uvedených modelů ( příloha č. 60 ) byly nejvíce zhotovovány odlitky podle modelu A,D. pro které jsou velikosti obou dílů forem 170 x 116 x 30 mm. Grafické znázornění jejich režimu tepelného zpracování, jak pro formy nenapěněné, tak napěněné je uvedeno v příloze č. 63. Pro tepelné zpracování nenapěněných forem se nejvíce uplatnil režim, který se skládá ze sušení při teplotě prodlevy 200°C po dobu 4 hodin a žihání probíhalo při teplotě prodlevy 400°C po dobu 4 hodin. Tepelné zpracování forem napěněných se skládalo ze sušení při teplotě prodlevy 120°C po dobu 4 hodin a ze žihání při teplotě 200°C po dobu 4 hodin. Uvedené teploty odpovídají teplotám v použitém zařízení. Doba sušení a žihání, je závislá na druhu zařízení, ale také na velikosti forem a dalších vlivech. Doba je uvedena v příloze č. 61.

U obou druhů sádrových forem byla sledována jejich struktura po tepelném zpracování. U forem nenapěněných tato struktura odpovídá teplotě 400°C a u forem napěněných odpovídá 200°C. Při sledování struktury byl použit řádkovací elektronový mikroskop ( SEM ) TESLA B 300. Získané obrázky struktur pro oba druhy forem jsou uvedeny v příloze č. 72 - 75. Ze struktury 15000 x násobného zvětšení jsou patrné jehlice  $\text{CaSO}_4$  u obou typů forem, ( což odpovídá struktuře vysušené sádrové formy ). Také pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu byly získány snímky povrchů odlitků zhotovených, jak ve formách napěněných, tak i nenapěněných, pro různé zvětšení, které jsou uvedeny v příloze č. 76 - 79. Z přílohy č. 71 jsou patrné snímky povrchu odlitků, vyrobených z obou druhů forem, které byly získány na optickém metalografickém mikroskopu NEOPHOT 2. V příloze č. 66 je zobrazena mikrostruktura použité hliníkové slitiny materiál 424331.

### 7.1.2 Rozměrová a tvarová přesnost získaných odlitků a drsnost jejich povrchu

Odlitky vyrobené pomocí sádkových forem se vyznačují vysokou hladkovostí povrchu velmi dobrou reprodukovatelností i nejjemnějších detailů a vyhovující rozměrovou přesností. Mírou vhodnosti navrženého tepelného zpracování bylo sledování rozměrů u daných odlitků zhotovených z těchto forem. Pro příslušné modely byly zjištěny rozměry odlitků, které jsou uvedeny v příloze č. 60. Získané hodnoty vyrobených odlitků byly porovnány s příslušnými rozměry modelu ( jmenovité rozměry a byla sestrojena grafická závislost  $\delta = f(a, b, c)$ , to je závislost rozměrů odlitků, které jsou rovnoběžné s dělicí rovinou formy. Poměrná změna rozměru odlitků je dána vztahem:

$$\delta = \frac{\text{jmenovitý rozměr} - \text{naměřený rozměr}}{\text{jmenovitý rozměr}} \cdot 100 \text{ \% } /$$

Získaná grafická závislost je uvedena v příloze č. 64. Z hlediska rozměrové přesnosti bylo zjištěno, že přesnější odlitky jsou z forem nenažehnaných, u kterých byla zjištěna poměrná změna rozměrů 3 % a u forem nažehnaných 7 % .

Nedílnou součástí pro-měření rozměrů odlitků bylo i zhodnocení dosažené drsnosti jejich povrchu. Drsnost 6 vybraných odlitků byla měřena na přístroji HOMMEL TESTER. Měřením drsnosti povrchu byly zjištěny hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce 7.1. Odlitky označené I jsou získané ve formách nenažehnaných a odlitky označené II ve formách nažehnaných, oba druhy odlitků jsou získány pomocí modelu A. Na těchto odlitcích byla zvolena tři náhodná místa, na kterých byla drsnost povrchu měřena.



Tabulka 7.1 Drsnost povrchu odlitků

| Odlitek | Re/ $\mu$ m/ | Rt/ $\mu$ m/ | odlitek | Re/ $\mu$ m/ | Rt/ $\mu$ m/ |
|---------|--------------|--------------|---------|--------------|--------------|
|         | 2,0          | 11           |         | 1,4          | 8            |
| I       | 2,2          | 13           | II      | 1,5          | 8            |
|         | 1,4          | 8            |         | 1,6          | 9            |

Z naměřených hodnot drsnosti povrchu odlitků vyplývá, že kvalitnější drsnost povrchu vykazují odlitky získané ve formách napěněných, u kterých Re se pohybuje od 1,4 do 1,6  $\mu$ m. U odlitků z forem nenapěněných tato hodnota dosahuje až 2,2  $\mu$ m.

Pro orientaci jsou v příloze č. 64 uvedeny hodnoty pevnosti v tlaku v závislosti na teplotě vzorků  $\varnothing$  35 x 50 a  $\varnothing$  50 x 50 mm ze sádrové směsi 50 - 50 nenapěněné. Jak je ze závislosti patrné s rostoucí teplotou pevnost v tlaku klesá.

## 7.2 Výroba a tepelné zpracování forem pro zhotovení odlitků používaných v moderní radiotechnice

Tato kapitole je zaměřena na zhotovení forem, jader a odlitků z těchto forem vyrobených, které mají uplatnění v radiotechnice. Formy, jádra a odlitky byly vyrobeny v poloprovozních podmínkách VÚR TESLA, k.p. Pardubice.

Formy a jádra byly zhotoveny z dříve uvedené sádrové směsi 50 - 50 nenapěněné a ze speciální zatmelovací hmoty GLORIA + Speciál. Tuto hmotu vyrábí SPOFA - Dentál, Praha dle ČSN 665424. Výrobce neuvádí její složení, pouze její tepelné zpracování. Doporučuje sušení po dobu 2 - 5 hodin při teplotě 120°C a žihání při teplotě 650 - 700°C po dobu 1 hodiny.

Schematické znázornění formy a odlitku je uvedeno v příloze č. 67 a tvar jádra je patrný z přílohy č. 68.

Z hlediska funkčního má význam sledovat jen některé rozměry těchto odlitků. Jsou to především ty rozměry, co vymezují funkční plochy odlitku. Rozměry odlitků jsou spojeny s příslušnými rozměry formy a jádra. V tabulce příloha č. 68 jsou uvedeny nejdůležitější rozměry odlitku ( též jádra a formy ).

#### 7.2.1 Příprava forem jader a jejich tepelné zpracování

Bylo zhotoveno několik forem a jím odpovídajících jader v poloprovozních podmínkách ÚVR TESLA, k.p. Pardubice určených pro výrobu velmi přesných odlitků pro moderní elektrotechniku. Pro účely sledování režimu tepelného zpracování byly vyrobeny 2 druhy forem z hlediska použité sádrové směsi. Tvar dílu formy je uveden v příloze č. 67 a redukovaná tloušťka formy  $R = 1,23$  cm. Použitá sádrová směs 50 - 50 pro výrobu forem má následující složení:

- 1050 g alabastrová sádra
- 1050 g šedá stavební sádra
- 1650 ml vody
- 20 g minerálního vlákna,

dále byla použita směs o složení:

- 660 g GLORIA SPECIÁL
- 540 g HARGIPS
- 800 g regenerátu
- 40 g minerálního vlákna .
- 1400 ml vody

Proti popraskání forem a jader během jejich tepelného zpracování byly do směsi přidány kousky minerálního vlákna ( Lubrikované minerální vlákno PN 727314 výrobce Izolace, Praha ).



Též byly vyrobeny dva druhy jader o následujícím složení - směs

50 - 50:

50 g alabastrové sádra

50 g stavební sádra

74 ml vody

1 g minerálního vlákna

a dále směs

200 g GLORIA SPECIÁL

85 ml vody

2 g minerálního vlákna.

Příprava sádrové suspence pro výrobu jader byla prováděna podle ČSN 722301 a příprava sádrových forem probíhala podle rozpisu uvedeného v kapitole 1.2.

V této práci jsou uvedeny tři formy a z nich zhotovené tři odlitky. Sádrová forma označení 1 byla vyrobená ze sádrové směsi 50-50 i z této směsi bylo zhotoveno její jádro. Formy označené 2,3, které byly vyrobeny ze sádrové směsi GLORIA SPECIÁL, stejně jako jejich jádra. Velký důraz byl kladen na režim tepelného zpracování uvedených forem. Formy byly tepelně zpracovány po jejich sestavení. Pro všechny formy byl stanoven režim tepelného zpracování, který byl realizován v ÚVR TESLA, k.p. Pardubice, je uveden v příloze č. 69. Pro tepelné zpracování byla použita speciálně upravená komorová pec s částečnou regulací výměny atmosféry. Formy byly tepelně zpracovány v tomto zařízení najednou. Odlevání bylo provedeno při teplotě formy asi 150°C. Při této teplotě též formy byly vyjmuty ze zařízení. Pro výrobu odlitků byla použita slitina hliníku 424331. Lití probíhalo 10 - 12 s,

vtoková soustava byla opatřena pomocným dílem formy. Získané odlitky jsou uvedeny na obrázcích příloze č. 70. Kvalita odlitků je velmi dobrá, drsnost povrchu funkčních ploch odlitku se pohybuje v rozmezí hodnot  $R_a = 0,8 - 1,0 \text{ } \mu\text{m}$ . Odlitky rozměrů nepřesahují 1% jmenovitého rozměru.

### 7.3 Zhodnocení režimu tepelného zpracování sádrových forem a získaných odlitků

Každý zvolený režim tepelného zpracování lze hodnotit z několika hledisek, podle toho do jaké míry splňuje požadavky na něj kladené. Optimální režim musí splňovat tyto požadavky:

1. Dosažení maximální kvality odlitků a jeho užitečných vlastností, především přesnosti rozměrů a jakosti povrchu a homogenity.

Pro sádrovou formu to znamená dosažení maximální rozměrové stálosti a minimálního sklonu ke vzniku prasklin na lici formy.

2. Minimální výrobní náklady, především na potřebné zařízení a energii.

Laboratorní a poloprovozní ověřování výroby zkušebních odlitků i vybraného odlitku vodiče vln do forem do výše uvedených forem ze sádrových směsí, jež byly tepelně zpracovány navrženým postupem prokázalo, že získané odlitky dosahují požadované přesnosti a jakosti povrchu i homogenitu materiálu, při odlévání do forem nenapěněných ze směsi 50 - 50 případně směsi Gloria speciál.

Napěněné sádrové směsi tyto požadavky splnily v potřebném rozsahu pouze pro vnější tvary a plochy odlitku, nikoliv pro dutiny těchto speciálních odlitků.

Z hlediska požadovaných výrobních nákladů na tepelné zpracování forem umožňuje optimalizaci tohoto režimu pro konkrétní



velikost a tvar formy či jádra, spotřebovat takové množství energie, které je právě potřebné k uskutečnění fázových přeměn v konkrétní formě ze sádrové směsi. V tomto lze spatřovat možnosti úspory energie oproti režimu tepelného zpracování, který k odlišnostem ve velikosti a tvaru forem a jader nepřihlíží.

Rozdělení tepelného zpracování sádrových dílů nenapěněných na proces sušení tj. do teploty  $200^{\circ}\text{C}$  v peci ( sušce ) a žihání na teplotu do  $400^{\circ}\text{C}$ , lze považovat za optimální.

V časových rozvrzích tepelného zpracování je vhodné využít režimů, které nepřesahují délku prodlev příslušné teploty v sušce a peci 24 hodin.

Podstatné snížení spotřeby energie je při tepelném zpracování napěněných směsí. V tomto případě pro sušení je vhodná teplota  $120^{\circ}\text{C}$  a teplota žihání dosahuje  $200^{\circ}\text{C}$ .

Výsledky, kterých bylo v předložené práci dosaženo, přinášejí do technologie výroby sádrových forem informace, které zvyšují prvek provozních jistot, potřebných pro kvalitativní i kvantitativní rozhodování a úvědomělé řízení procesu tepelného zpracování.

Pod pojmem kvalitativních faktorů rozumíme takové, u kterých byl nalezen směr ve kterém daný parametr působí; tedy urychluje, či zpomaluje tento proces.

Pod pojmem kvantitativních faktorů nebo kvantitativně poznaných parametrů zahrnují takové výsledky, na základě kterých je možno vypočítat základní parametry, jako např. čas, teplotu, množství vyměňovaných vzdušín a příp. dalších.

Obecně charakterizováno je tepelné zpracování sádrových forem proces, který (kdyby se to vůbec podařilo) by byl popsán polyvariantní funkcí, jejíž parametry jsou vzájemně složitě vázány a jejich závislosti známe pouze kvalitativně. (To ještě bez nároku na celý jejich definiční rozsah.)

Protože takto prozatím postupovat nelze (a není to ani v technické praxi obvyklé), nabízí se použití způsobu, ve kterém bude exaktní výpočtová cesta kombinovaná s logickými kvalitativními doplňky. Tak např. jako charakteristiku rozměrů a tvarů formy, která je v určitém souboru hodnot pro určité typy rozdílů, jsem navrhla podle obvyklých vzorců počítat s redukovanou tloušťkou formy, s tím, že výsledek bude upraven podle kvalitativních úvah. Stejně tak by ovšem bylo možné tloušťku formy charakterizovat z konečného souboru různých hodnot hodnotou mini-



mální a maximální. To znamená, vypočteme čas pro tepelné zpracování prvního a posledního místa ve formě. Je zřejmé, že pro dimensování celého procesu je důležitější extrém maximální. Protože efekt tepelného zpracování nejtenšího místa bude růst (mokrý hmota uvolnila vodu) uplatní se v úvaze i extrém minimální tloušťky formy.

S takovýmito úvahami, příp. i výhradami, je nutno přijímat i další výpočtové výsledky. Můžeme je rozdělit celkem do tří oblastí :

1. Výsledky termogravimetrického měření sádrových vzorků různých tvarů a velikostí získané na navrženém a ověřeném zařízení byly použity jako podklad pro návrh režimu tepelného zpracování sádrových forem. Termogravimetrická metoda charakterizuje přeměny síranu vápenatého, který tvoří základ sádrové směsi. Do jisté míry tato metoda nemůže však popsat chování většího množství tepelně zpracovávaných sádrových dílů určitých tvarů a velikostí. O výsledku v tomto příp. rozhoduje energetická kapacita daného zařízení, nasycenost sušícího nebo žhacího prostředí vodou, která přichází ze zahřívání sádrového dílu. Do určité míry i vlastnosti proudění v zaplněném prostoru (to je zařízení pro tepelné zpracování). Důležitým poznatkem v této experimentální oblasti je získání přehledu o hmotnosti tepelně zpracovávaných sádrových dílů během celého procesu. Konečná hmotnost těchto dílů činí 52 - 56% z počáteční hmotnosti u forem nenapěněných a 54 - 56% z počáteční hmotnosti u forem z napěněných sádrových směsí. Dále také však získáváme přehled o chování sádrových forem během celého tepelného zpracování, které je závislé na použité sádrové směsi, množství rozdělovací vody, velikosti a tvaru sádrového

dílů ( tj. redukované tloušťky formy R ). Též na použitém zařízení pro tepelné zpracování a jeho zaplněném pracovním prostoru určitým množstvím sádrových forem. Všechny experimenty prováděné na základě hmotnostních úbytků vzorků sádrových forem potvrdily LYKOVU teorii sušení. Tento poznatek byl využit při návrhu nomogramu pro stanovení procesu sušení sádrových dílů obecných velikostí a různých tvarových charakteristik. Tvarová charakteristika těchto dílů je určována hodnotou relativní tloušťky R. Je však možno konstatovat, že nomogram je sestrojen pro určitý druh zařízení, avšak není zahrnuta úvaha o tepelném zpracování většího množství dílů najednou.

2. Bylo sledováno chování soustavy  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  pomocí vypočtů změny Gibbovy energie na teplotě a dále byly sledovány kvalitativní a částečně kvantitativní poměry v této spustavě při hydrataci a dehydrataci. Všechny uvedené poznatky byly využity při stanovení tepelného zpracování forem ze sádrových směsí. Tyto rozborů dokazují, že lze účelně pro výrobu sádrových forem použít sádry různé jakosti s přihlédnutím požadavků technologickým a ekonomickým.

Ukazuje se, že sádry dostupné na našem trhu nesplňují zcela požadavky kladené na jejich použití při výrobě slévárenských forem a jader. Dentální sádrové směsi ( např. Gloria speciál ), určené především k výrobě drobnějších odlitků v dentální technice, nejsou zcela optimální pro výrobu hmotnějších odlitků.

V tomto směru se jako nejvýhodnější jeví směsi připravované ze speciálních výchozích složek, jako například dovážená anglická sádrová směs používaná v n.p. METEZ Týnec nad Sázavou.

3. Všechny provedené experimentální pokusy a teoretické úvahy byly zaměřeny ke stanovení optimálního režimu tepelného zpracování forem ze sádrových směsí. Bylo ověřeno tepelné zpracování



sádrových forem z nenapěněných směsí, kde v podstatě složení sádrové směsi nemá vliv na výši teploty prodlevy v peci  $200^{\circ}\text{C}$  u forem nenapěněných a  $120^{\circ}\text{C}$  u forem z napěněných směsí. Velká důležitost musí být kladena na výměnu atmosféry, která odstraňuje vlhkost ze sádrové formy do okolí. Tento proces vede k částečnému odstranění vázané vody a je označován jako sušení. Druhá část tepelného zpracování - žihání, probíhá při teplotě prodlevy v peci  $400^{\circ}\text{C}$  u forem nenapěněných a  $200^{\circ}\text{C}$  u forem z napěněných směsí. Při teplotě  $400^{\circ}\text{C}$  je ukončeno odstraňování vázané vody v síranu vápenatém, což představuje ukončení procesu tepelného zpracování. Pro úspěšné odlévání kovů do těchto forem je tato teplota dostačující.

Roznesí mezi sušením a žiháním musí být s konečnou platností řešena smluvně. Uvedená hranice  $200^{\circ}\text{C}$  pro formy nenapěněné je v tomto smyslu reálná. Pro určení doby tepelného zpracování nelze vyslovit obecná kritéria, neboť tento proces je závislý na kvalitě sádrové směsi, množství rozdělovací vody a dílech určených k tepelnému zpracování. Tuto otázku je nutno podrobně řešit v souvislosti s použitým zařízením a velikostí sádrových dílů. Doba prodlevy na konečné teplotě žihání v peci  $400^{\circ}\text{C}$  pro formy nenapěněné a  $200^{\circ}\text{C}$  pro formy z napěněných sádrových směsí nebyla odvozena z hlediska hmotnostních a tvarových charakteristik sádrových dílů, ale byla zjištěna experimentálně pomocí kvality získaných odlitků.

Velmi přínosné by bylo pro tepelné zpracování sádrových dílů zařízení s výměnnou atmosférou až do teploty  $400^{\circ}\text{C}$ .

4. Při zhotovení odlitků byla použita upravená technologie tepelného zpracování sádrových forem vycházející z výše uvedených poznatků a splňující požadavky kladené na odlitky získané odlé-

váním do sádrových forem. U odlitků byla dosažena vysoká jakost povrchu funkčních ploch a vysoká rozměrová a tvarová přesnost.

Všechny dosažené výsledky a poznatky obsažené v této práci doplňují a rozšiřují poznatky o sádrových slévárenských formách.



## 9.0 ZÁVĚR

Předložená práce se zabývá tepelným zpracováním forem ze sádrových směsí používaných při výrobě přesných odlitků, podle bodů uvedených v úvodu.

Rešeršní část je zaměřena na oblast sádrových formovacích směsí, které jsou popisovány soustavou  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  a z ní vyplývající fáze síranu vápenatého. Popisuje vliv soustavy na vlastnosti směsí a fyzikálně chemické procesy v ní probíhající při výrobě, zpracování a tuhnutí sádrové směsi. Ve slévárenské praxi jsou tyto děje složité a souvisí ještě s dalšími podmínkami (např. okolní atmosférou, použitým zařízením a sádrovou směsí). Z tohoto důvodu je nutné při tepelném zpracování sádrovou formovací směs posuzovat jako systém, ve kterém navzájem probíhá celá řada procesů. Proto celková analýza tepelného zpracování sádrových forem musí zahrnout ještě další ohledy - termodynamické a fyzikálně chemické.

Celá rešeršní část práce přispívá k rozboru této problematiky a uvádí základní podmínky pro vlastní experimenty.

Experimentální část práce je zaměřena na vlastní výzkum tepelného zpracování sádrových forem. Její hlavní výsledky je možné shrnout do těchto bodů:

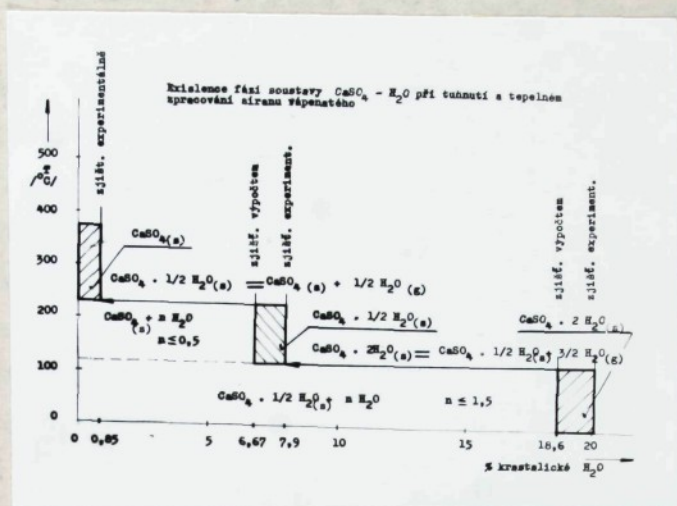
1. Bylo navrženo a odzkoušeno experimentální zařízení, které modeluje tepelné zpracování sádrových forem ve slévárenské výrobě. Jsou uvedeny výsledky měření jednotlivých skupin sádrových vzorků tvaru válců  $\varnothing 20 - 50$  mm, délky 50 mm a tvaru hranolu  $22,5 \times 22,5 \times 90$  mm z alabastrové sádry (TGL 21 841), sádrové směsi tvořené 50 hmotnostními procenty alabastrové sádry a

50 hmotnostními procenty stavební sádry (ČSN 722301), dále sádrové směsi napěněné. To přináší př<sup>ě</sup>stavu o průběhu a chování soustavy  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  během tepelného zpracování s ohledem na velikostní a tvarový faktor formy a její vnitřní strukturu.

2. Byla provedena termická analýza vybraných sádrových směsí ( ve spolupráci s VŠCHT Praha ), ze které vyplynuly teploty přeměn jednotlivých fází síranu vápenatého, které slouží jako podklad pro ověření termodynamických výpočtů a pro návrh režimu tepelného zpracování forem.
3. Byla provedena fázová analýza vybraných sádrových směsí ( ve spolupráci s VÚSH Brno), která umožňuje získat kvalitativní a částečně kvantitativní př<sup>ě</sup>stavu o fázovém složení těchto směsí. Z ní lze usuzovat na vhodnost směsí pro výrobu sádrových slévárenských forem. Ze srovnání zkoumaných přírodních materiálů zahraničních a domácích vyplývá, že některé fyzikální vlastnosti materiálů zahraničních nejsou dosahovány u materiálů tuzemských.
4. V návaznosti na prováděné experimenty byly provedeny termodynamické výpočty fázových přeměn soustavy  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  a byly stanoveny teploty přeměn jednotlivých fází síranu vápenatého. Výsledky výpočtů a výše uvedených experimentů vykazují shodu. Souhrnnou představu získanou jak pomocí experimentů, tak pomocí výpočtů o soustavě  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  podává následující obrázek.

Tato grafická interpretace může přispět k rozšíření poznatků o síranu vápenatém, jeho chování při tepelném zpracování a možnostech využití k výrobě slévárenských sádrových forem.





5. Na základě všech poznatků byl zhodnocen stávající režim tepelného zpracování a navržen optimální, který je možno shrnout do těchto bodů:

- Hmotnost tepelně zpracovávaných forem z nenapěněných směsí se pohybuje od 52 - 56% původní hmotnosti a u napěněných forem od 54 - 56% původní hmotnosti.
- Režim tepelného zpracování sádrových forem je vhodné rozdělit na sušení a žihání. Jako konvenční teplota mezi těmito etapami je  $200^\circ\text{C}$  u forem nenapěněných a  $120^\circ\text{C}$  u forem z napěněných sádrových směsí.
- Rychlost ohřevu a ochlazování obou typů forem by neměla přesáhnout  $0,05 \text{ K.s}^{-1}$ , nejvhodnější je použít rychlosti  $0,025 - 0,033 \text{ K.s}^{-1}$ .
- Ochlazování forem z maximální teploty je nutno provést řízeným způsobem v peci. Při tom je nutno dodržet vhodnou teplotu při vyjímání sádrových dílů ze žihacího zařízení. Samovolným ochlazováním v atmosféře nelze připustit překročení

ochlazovací rychlosti určenou v předchozím bodě. V tomto, smyslu maximální teplota při vyjímání byla stanovena hodnota 150°C.

Uvedené výsledky a dosažené poznatky této práce dávají možnost uplatnění a rozšíření technologie lití do sádrových forem. V současné době je tato technologie v našich podmínkách málo rozšířená. Lití se používá pouze v malém rozsahu pro výrobu speciálních odlitků ( např. v n.p. Metaz Týnec nad Sázavou ), při výrobě dmychadel, oběžných kol ventilátorů, ale také v elektrotechnice i při výrobě dalších předmětů. Rozšíření této technologie je možné a účelné. Všeobecné uplatnění je zatím ovlivněno dovozem surovin, pro slévarenské účely převážně z kapitalistických států.

V práci bylo dokázáno fázovým rozbořem, že vyšší úrovní zpracování domácích surovin, by bylo možno účelně zhodnocovat zdroje k náročnějšímu praktickému uplatnění. Tato skutečnost se může ještě dokumentovat např. i porovnáním cen příslušných materiálů:

| Sádrová směs, sádra                                              | Velkoobchodní cena 1 kg<br>v Kčs pro rok 1985 |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Šedá stavební - výrobce SOSD závod<br>ČSN 722301 Kobeřice (ČSSR) | 1,00                                          |
| Alabastrová sádra - MG 11 druh II<br>TGL 21 842 (NDR)            | 1,70                                          |
| Gloria speciál (licenční sádrová směs)<br>výrobce Dentál Jičín   | 9,00                                          |
| Anglická sádra (dovoz Anglie)<br>přepočítáno na Kčs              | 5,40                                          |

Z přehledu vyplývá, že je nutné zkvalitňování u nás dostupných sáder na sádrové směsi s potřebnými užitnými vlastnostmi pro



slévárenské účely. K tomu přispívají i teoretické a praktické poznatky obsažené v této práci.

Závěrem lze konstatovat, že uplatnění sádrových forem je možno hodnotit ve strojírenské výrobě jako velmi výhodné pro výrobu speciálních odlitků s různou tloušťkou stěn ze slitin hliníku, cínu, olova, zinku a mědi. Dále se tyto formy uplatňují při výrobě uměleckých předmětů (prstýnků, náušnic atd.) a dentálních výrobků ze slitin stříbra a zlata u nichž je požadovaná vysoká přesnost rozměrů a jakost povrchu.

# 10.0 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- / 1/ ALTNER, V. : Technologie sušení v keramice. Průmyslové vydavatelství, Praha 1951.
- / 2/ BABUŠKA, I., PRÁGER, M., VITÁSEK, E. : Numerické řešení diferenciálních rovnic. SNTL Praha 1964.
- / 3/ BARADANJANC, V.K. : Gipsevaja osnastka dlja točnogo litja. Moskva 1963.
- / 4/ BARTA, R. : Základní výzkum silikátů. SNTL Praha 1957.
- / 5/ BITTNER, J., VACEK, M. : Pružné otiskovací hmoty ve stomatologické fixní protetice. AVIGENUM Praha 1974.
- / 6/ BLAŽEK, A. : Termická analýza. SNTL Praha 1972.
- / 7/ BOLEY, B.A., WEINER, J.H. : Theory of Thermal Stresses 1960. Ruský překlad: Teorija temperaturnych napraženij. Moskva 1964.
- / 8/ FEDOROV, I.M. : Teorija a rasčet procesu suški vo vznešen-nom sostojanii. Moskva 1955.
- / 9/ GINSBERG, D.B., DELIKIŠKIN, S.N., CHODOROV, E.Ja., ČIŽKOV-SKIJ, A.F. : Pece a sušárny v silikátovém průmyslu. Průmyslové vydavatelství Praha 1952.
- / 10/ HÁLA, E. : Úvod do chemické termodynamiky. ACADEMIA Praha 1973.
- / 11/ HARMÁČEK, J. : Stavební hmoty I. SNTL Praha 1954.
- / 12/ HLAVÁČ, J. : Základy technologie silikátů. SNTL Praha 1981.
- / 13/ CHYLSKÝ, J. : Vlhký vzduch. SNTL Praha 1963.
- / 14/ JENČÍK, J. : Měření teplot v chemii. Sborník prací DT ČVTS Pardubice 1976, s. 7.
- / 15/ KALČÍK, J., SÝKORA, K. : Technická termodynamika. ACADEMIA, Praha 1973.
- / 16/ KALOUSEK, J., HOLUBEC, Z., KALOUSKOVÁ, G. : Fyzikální chemie metalurgických procesů. Skripta VŠST - FS, Liberec 1982.
- / 17/ KAZANSKIJ, V.M. : Svjaz meždu skorestju suški i temperaturej tela pri termografičeskich issledovanijach. IFŽ, Akademiya nauk, Moskva 1973, 24, no. 2, s. 302.
- / 18/ KLEČKOVÁ, M. : Nestacionární teplotní pole a napjatost ve strojních součástech. SNTL, Praha 1981.
- / 19/ KNEULE, F. : Das Trocknen. Frankfurt a M. 1959.
- / 20/ KOLEKTIV : Studium výroby odlitků litých do sádrových forem. Závěrečná výzkumná zpráva úkolu P 15-124-008-21/02. Liberec, VŠST - FS 1973.
- / 21/ KOLEKTIV : Studium technologie odlévání do sádrových forem GARASIN. Dílčí výzkumná zpráva úkolu V-124-001,022. Liberec, VŠST - FS 1978.
- / 22/ KOLEKTIV : Studium technologie a vlastností sádrových formovacích směsí. Závěrečná výzkumná zpráva úkolu V-124-001,022. Liberec, VŠST - FS 1980.



- /44/ RUSÍN, K. : Dispersní formovací materiály, Skripta VUT Brno, SNTL, Praha 1981.
- /45/ SEDLÁČEK, J. : Nekové materiály ve stomatologii. Státní zdrav. nakl., Praha 1960.
- /46/ SEMENOV, K.N., GROSU, F.P., BALOGA, M.K. : Konvektivnej teploobmen pri koronnom razrjade v vozduchu. Sborník : Teplo i massoperanos. Moskva 1968, s. 711.
- /47/ SMOLSKIJ, V.M. : Vnešnij teplo i massobmen v procese konvektivnoj suški. Izd. Beloruskogo politichničeskogo instituta 1957.
- /48/ STEIDL, H., NEUŽIL, L., POŘT, I., VLČEK, J. : Úvod do proudění tekutin a sdílení tepla. ACADEMIA, Praha 1975.
- /49/ ŠATAVA, V. : Úvod do fyzikální chemie silikátů. SNTL, Praha 1963.
- /50/ ŠESTÁK, J. : Měření termofyzikálních vlastností pevných látek. Termická analýza, ACADEMIA, Praha 1982.
- /51/ ŠORIN, S.N. : Sdílení tepla. SNTL, Praha 1968.
- /52/ ŠUMILIN, A.A. : Suška i obžig v promyšlennosti strojitelnoj keramiki. Goistrojizdat, 1962.
- /53/ ŠTELZIGOVÁ, V. : Rozbor termodynamických podmínek při ohřevu forem ze sádrových směsí. Diplomová práce, Liberec VSST - FS 1984.
- /54/ TESAŘÍK, I. : Proudění tekutin pórovitým prostředím. SNTL, Praha 1961.
- /55/ TICHÝ, O. : Pálení jemné keramiky. SNTL, Praha 1982
- /56/ TUNCIKIN, I.N. : Diffuzija i slušajnyje processy. Nauka, Novosibirsk 1970.
- /57/ TUREK, M. a kol. : Elektrotechnická keramika. SNTL, Praha 1964.
- /58/ TURIČIN, A.M. : Elektrické měření neelektrických veličin. SNTL, Praha 1958.
- /59/ VACEK, M. : Stomatologické materiály. AVICENUM, Praha 1980.
- /60/ VACEK, M., BITTNER, J., KOMRSKA, J., ZÁHLAVOVÁ, E. : Stomatologické materiály. AVICENUM, Praha 1981.
- /61/ VALCHÁŘ, J. : Termokinematika pohybu vlhkosti v materiálu při jeho sušení. Strojírnoství č. 6, 1972 s. 34.
- /62/ VALCHÁŘ, J. : Sušení v chemickém průmyslu. SNTL, Praha 1967.
- /63/ VALCHÁŘ, J. : Základy sušení. SNTL, Praha 1966.
- /64/ VEJNÍK, A.I. : Termodynamika litejnoj formy. Mašinostrojennije, Moskva 1968.
- /65/ VETIŠKA, A. a kol. : Teoretické základy slévárenské technologie. SNTL, Praha 1974.
- /66/ VOJTÍŠEK, J. : Studium procesu tepelného zpracování forem ze sádrových směsí. Diplomová práce. Liberec, VSST - FS 1981.
- /67/ ČSN 66 5224
- /68/ ČSN 72 2301

- /69/ HENNING, O., LACH, V.: Chemie ve stavebnictví SNTL  
Praha 1983
- /70/ ČSN 720102
- /71/ ČSN 720103
- /72/ ČSN 720104
- /73/ PERNICA, M., PEKÁREK, J.: Rozbor sádrových směsí a forem  
Zpráva HS č. 88/EPÚ - 85 VÚSH Brno 1985
- /74/ LANGBEIN, R., PETER, H., SCHWAHN, H. J.: Karbonat - und  
Sulfatgesteine VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindus-  
trie, Leipzig 1982
- /75/ PETZOLD, A.: Anorganisch - nichtmetallische Werkstoffe  
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig  
1982



## P o d ě k o v á n í

Děkuji vedení Vysoké školy strojní a textilní v Liberci nositelky Řádu práce, jejímu rektorovi s. Akademiku Jovanu Čirličovi, Hrdinovi socialistické práce a děkanovi Fakulty strojního inženýrství s. Prof. RNDr. Bohuslavu Strážovi, CSc za vytvoření podmínek pro řešení této práce.

Dále děkuji svému školiteli s. Doc. Ing. Zdeňku Holubcovi, CSc za odborné vedení při řešení úkolu. Děkuji svým spolupracovníkům vedeným s. Doc. Ing. Janem Alaxinem, CSc a to Doc. Ing. Miroslavu Kořínkovi, CSc, Ing. Jiřimu Horynovi, CSc Ing. Petru Loudovi, Ivoně Gubášové, Evě Pokorné a Haně Kerdové, Jaroslavu Vorlovi.

Také mi pomohli ss. Doc. Ing. Jaroslav Tněj, CSc a Ing. František Beran z VŠST, Ing. Miloslav Jirout a Ing. Jaroslav Navrátil z VÚR k.p. Tesla Pardubice, Ing. Milan Pernica z VÚSH Brno, RNDr. Antonín Blažek, DrSc z VŠCHT Praha.

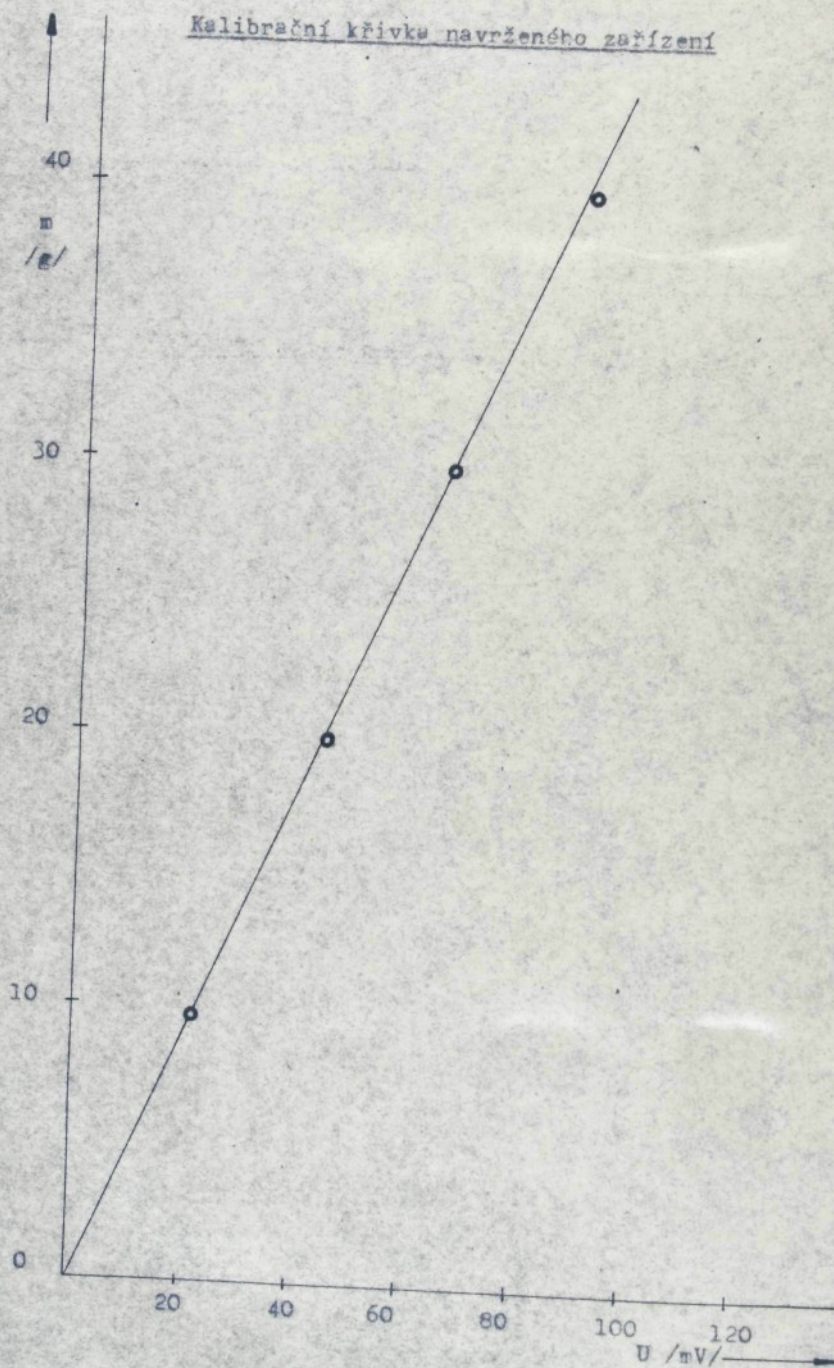
Své mamince děkuji za přepsání textu. Můj dík patří též Evě Mlejnkové a Ireně Pichové, studentkám VŠST.

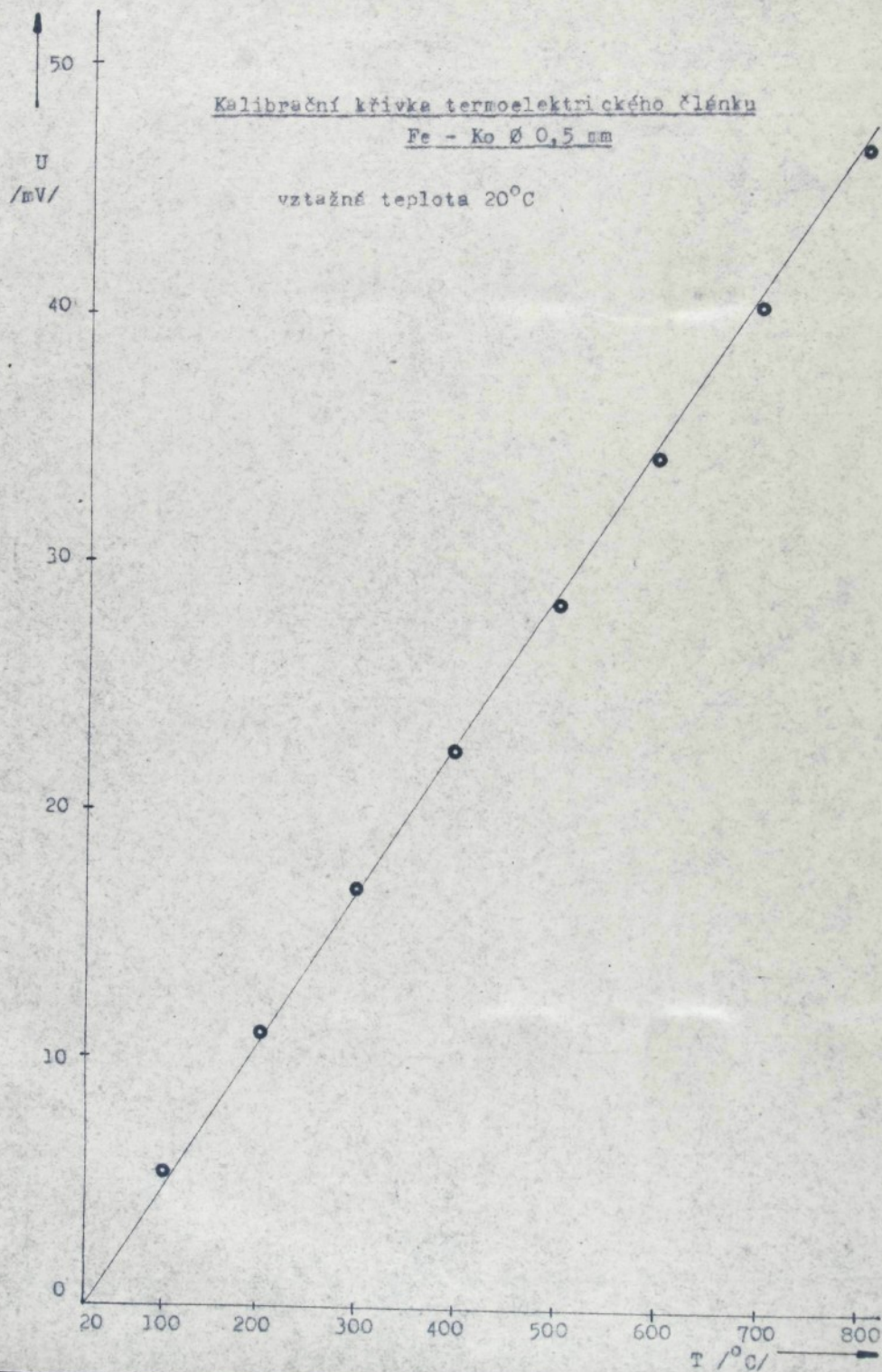
V Liberci, červenec 1985

U 187

+ PŘÍLOHA



Kalibrační křivka navrženého zařízení



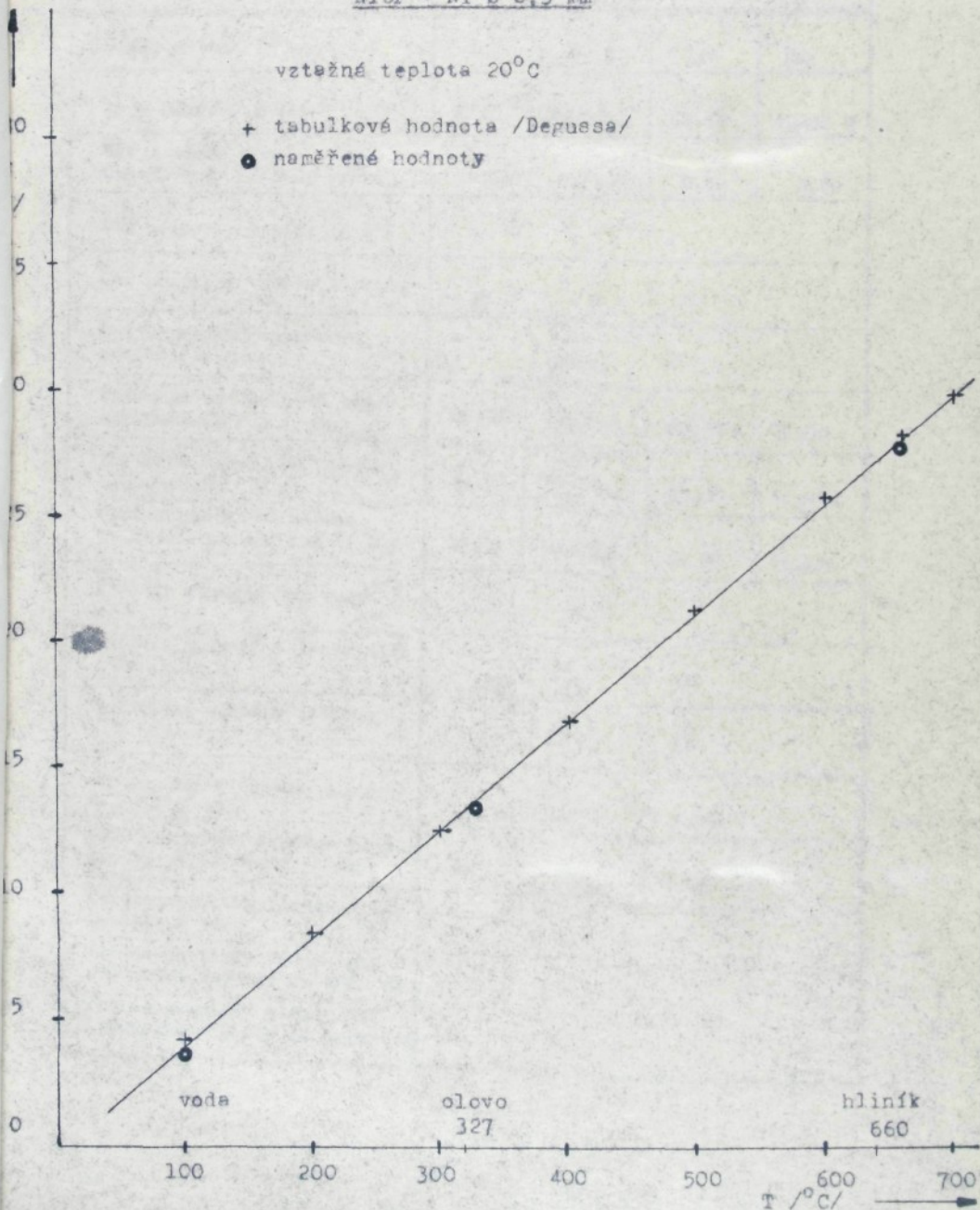


Kalibrační křivka termoelektrického člénkuNiCr - Ni Ø 0,3 mm

vztažná teplota 20°C

+ tabulková hodnota /Degussa/

● naměřené hodnoty



| Sledované veličiny:                                         |                                                                           |                      |       |         |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------|---------|
|                                                             | Rozměr vzorku $\emptyset 20 \times 50,5 \times 22,5 \times 90 \text{ mm}$ |                      |       |         |
| Číslo měření                                                | 1                                                                         | 2                    | 11    | 12      |
| Druh sádrové směsi                                          | ALAB.                                                                     | 50-50 <sub>AB.</sub> | 50-50 | 50-50 N |
| Vodní poměr v/s<br>(množ. vody na 100g směsi)               | 0,64                                                                      | 0,72,64              | 0,72  | 0,70    |
| Čas přípravy břečky / s /                                   |                                                                           |                      |       |         |
| Čas přípravy vzorku / s /                                   |                                                                           |                      |       |         |
| Čas tepelného zpracování<br>vzorků / s /                    | 1800                                                                      |                      |       |         |
| Hmotnost vzorku před tep.<br>zpracováním / g / $m_{poč.}$   | 25,00                                                                     | 25,10 <sub>40</sub>  | 80,30 | 37,30   |
| Hmotnost vzorku po tepel.<br>zpracování / g / $m_{kon.}$    | 14,00                                                                     | 13,00 <sub>00</sub>  | 41,00 | 20,00   |
| Zbytek hmotnosti vzorku<br>po tepel. zpracování / % /       | 44,00                                                                     | 48,50 <sub>60</sub>  | 48,90 | 46,30   |
| Teplota roztápěcí vody<br>/ °C /                            |                                                                           |                      |       |         |
| Teplota vzduchu v laboratoři<br>/ °C /                      | 20                                                                        |                      |       |         |
| Relativní vlhkost vzduchu<br>/ % /                          | 60                                                                        |                      |       |         |
| Redukovaná tloušťka vzorku<br>$R = V/S / \text{mm} /$       | 4,20                                                                      |                      |       |         |
| Střední průměr kruhové plochy<br>břečky po ztuhnutí / mm /  | 90                                                                        | 89                   | 92    | 91      |
| Termoelektrický článek sled.<br>teploty v peci              |                                                                           |                      |       |         |
| Termoelektrický článek pro<br>sledování teploty ve stř. vz. |                                                                           |                      |       |         |
| Termoelektrický článek pro<br>sledování teploty na povr. vz |                                                                           |                      |       |         |



ALABASTROVÁ SÁIRA, vzorek Ø 20 x 50 mm

| Čas tepelného zpracování | Teplota ve stě. vzorku |       |       | Teplota na povr. vzorku | Teplota v peci | Úbytek hmotnosti vzorku | Poměrný zbytek hmotnosti vzorku | Poměrný úbytek hmotnosti vzorku | Čas tepelného z zpracování | Teplota ve stě. vzorku |       |       | Teplota na povr. vzorku | Teplota v peci | Úbytek hmotnosti vzorku | Poměrný zbytek hmotnosti vzorku | Poměrný úbytek hmotnosti vz. |
|--------------------------|------------------------|-------|-------|-------------------------|----------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------|-------|-------|-------------------------|----------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| $t$                      | $T_1$                  | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$                   | $T_5$          | $\frac{m_1 - m_2}{m_1}$ | $\frac{m_2 - m_3}{m_2}$         | $\frac{m_3 - m_4}{m_3}$         | $t$                        | $T_1$                  | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$                   | $T_5$          | $\frac{m_1 - m_2}{m_1}$ | $\frac{m_2 - m_3}{m_2}$         | $\frac{m_3 - m_4}{m_3}$      |
| min                      | °C                     | °C    | °C    | °C                      | °C             | 1                       | 1                               | 1                               | min                        | °C                     | °C    | °C    | °C                      | °C             | 1                       | 1                               | 1                            |
| 0                        | 25                     | 28    | 28    | 0,00                    | 1,000          | 0,000                   |                                 |                                 | 16                         | 95                     | 115   | 420   | 9,20                    | 0,630          | 0,370                   |                                 |                              |
| 1                        | 27                     | 32    | 35    | 0,08                    | 0,996          | 0,004                   |                                 |                                 | 17                         | 95                     | 120   | 435   | 9,60                    | 0,613          | 0,387                   |                                 |                              |
| 2                        | 35                     | 43    | 65    | 0,20                    | 0,991          | 0,009                   |                                 |                                 | 18                         | 96                     | 130   | 460   | 10,00                   | 0,596          | 0,404                   |                                 |                              |
| 3                        | 40                     | 50    | 90    | 0,35                    | 0,986          | 0,014                   |                                 |                                 | 19                         | 98                     | 142   | 475   | 10,30                   | 0,585          | 0,415                   |                                 |                              |
| 4                        | 50                     | 60    | 130   | 0,50                    | 0,977          | 0,023                   |                                 |                                 | 20                         | 105                    | 160   | 495   | 10,50                   | 0,576          | 0,424                   |                                 |                              |
| 5                        | 55                     | 65    | 150   | 0,85                    | 0,968          | 0,032                   |                                 |                                 | 21                         | 135                    | 225   | 505   | 10,60                   | 0,574          | 0,426                   |                                 |                              |
| 6                        | 65                     | 75    | 170   | 1,20                    | 0,949          | 0,051                   |                                 |                                 | 22                         | 155                    | 247   | 520   | 10,70                   | 0,570          | 0,430                   |                                 |                              |
| 7                        | 70                     | 86    | 195   | 1,80                    | 0,927          | 0,073                   |                                 |                                 | 23                         | 210                    | 296   | 540   | 11,00                   | 0,560          | 0,440                   |                                 |                              |
| 8                        | 76                     | 89    | 220   | 2,50                    | 0,899          | 0,101                   |                                 |                                 | 24                         | 240                    | 321   | 550   | 11,00                   | 0,560          | 0,440                   |                                 |                              |
| 9                        | 79                     | 90    | 230   | 3,40                    | 0,865          | 0,135                   |                                 |                                 | 25                         | 315                    | 385   | 575   | 11,00                   | 0,560          | 0,440                   |                                 |                              |
| 10                       | 83                     | 93    | 250   | 4,30                    | 0,826          | 0,174                   |                                 |                                 | 26                         | 387                    | 450   | 585   | 11,00                   | 0,560          | 0,440                   |                                 |                              |
| 11                       | 85                     | 95    | 335   | 5,40                    | 0,784          | 0,216                   |                                 |                                 | 27                         | 460                    | 520   | 597   | 11,00                   | 0,560          | 0,440                   |                                 |                              |
| 12                       | 86                     | 95    | 350   | 6,50                    | 0,748          | 0,252                   |                                 |                                 | 28                         | 496                    | 545   | 600   | 11,00                   | 0,560          | 0,440                   |                                 |                              |
| 13                       | 89                     | 105   | 370   | 7,20                    | 0,714          | 0,286                   |                                 |                                 | 29                         | 523                    | 560   | 600   | 11,00                   | 0,560          | 0,440                   |                                 |                              |
| 14                       | 90                     | 110   | 385   | 7,90                    | 0,680          | 0,320                   |                                 |                                 | 30                         | 545                    | 575   | 600   | 11,00                   | 0,560          | 0,440                   |                                 |                              |
| 15                       | 95                     | 115   | 405   | 8,60                    | 0,652          | 0,348                   |                                 |                                 | 31                         | 551                    | 580   | 600   | 11,00                   | 0,560          | 0,440                   |                                 |                              |



SÁDROVÁ SMĚS 50 - 50, vzorek Ø 20 x 50 mm

| Čas tepelného zpracování | Teplota ve stří. vzorku |                |                | Teplota na povr. vzorku | Teplota v peci | Úbytek hmotnosti vzorku | Poměrný úbytek hmotnosti vzorku | Poměrný úbytek hmotnosti vzorku | Čas tepelného zpracování | Teplota ve stří. vzorku |                |                | Teplota na povr. vzorku | Teplota v peci | Úbytek hmotnosti vzorku | Poměrný úbytek hmotnosti vzorku | Poměrný úbytek hmotnosti vzorku |
|--------------------------|-------------------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| t                        | T <sub>1</sub>          | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub>          | T <sub>5</sub> | $\frac{m_1 - m_2}{m_1}$ | $\frac{m_2 - m_3}{m_2}$         | $\frac{m_3 - m_4}{m_3}$         | t                        | T <sub>1</sub>          | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub>          | T <sub>5</sub> | $\frac{m_1 - m_2}{m_1}$ | $\frac{m_2 - m_3}{m_2}$         | $\frac{m_3 - m_4}{m_3}$         |
| min                      | °C                      | °C             | °C             | °C                      | °C             | g                       | 1                               | 1                               | min                      | °C                      | °C             | °C             | °C                      | °C             | g                       | 1                               | 1                               |
| 0                        | 26                      | 27             | 27             |                         | 0,00           | 1,000                   | 0,000                           |                                 | 16                       | 95                      | 120            | 415            | 9,70                    | 0,610          | 0,390                   |                                 |                                 |
| 1                        | 28                      | 31             | 35             |                         | 0,09           | 0,996                   | 0,004                           |                                 | 17                       | 95                      | 120            | 430            | 10,10                   | 0,594          | 0,406                   |                                 |                                 |
| 2                        | 36                      | 41             | 60             |                         | 0,20           | 0,991                   | 0,009                           |                                 | 18                       | 98                      | 130            | 460            | 11,50                   | 0,538          | 0,462                   |                                 |                                 |
| 3                        | 40                      | 49             | 88             |                         | 0,30           | 0,986                   | 0,014                           |                                 | 19                       | 106                     | 155            | 475            | 11,90                   | 0,525          | 0,475                   |                                 |                                 |
| 4                        | 51                      | 58             | 130            |                         | 0,60           | 0,977                   | 0,023                           |                                 | 20                       | 110                     | 185            | 490            | 12,00                   | 0,520          | 0,480                   |                                 |                                 |
| 5                        | 56                      | 68             | 152            |                         | 0,85           | 0,966                   | 0,034                           |                                 | 21                       | 127                     | 205            | 508            | 12,00                   | 0,520          | 0,480                   |                                 |                                 |
| 6                        | 64                      | 78             | 172            |                         | 1,20           | 0,950                   | 0,050                           |                                 | 22                       | 157                     | 230            | 517            | 12,00                   | 0,520          | 0,480                   |                                 |                                 |
| 7                        | 70                      | 86             | 190            |                         | 1,80           | 0,926                   | 0,074                           |                                 | 23                       | 215                     | 285            | 539            | 12,00                   | 0,520          | 0,480                   |                                 |                                 |
| 8                        | 75                      | 92             | 210            |                         | 2,60           | 0,894                   | 0,106                           |                                 | 24                       | 250                     | 315            | 550            | 12,00                   | 0,520          | 0,480                   |                                 |                                 |
| 9                        | 78                      | 93             | 231            |                         | 3,40           | 0,866                   | 0,134                           |                                 | 25                       | 320                     | 360            | 572            | 12,00                   | 0,520          | 0,480                   |                                 |                                 |
| 10                       | 80                      | 95             | 255            |                         | 4,30           | 0,826                   | 0,173                           |                                 | 26                       | 375                     | 415            | 585            | 12,00                   | 0,520          | 0,480                   |                                 |                                 |
| 11                       | 81                      | 95             | 272            |                         | 5,40           | 0,785                   | 0,215                           |                                 | 27                       | 425                     | 456            | 595            | 12,00                   | 0,520          | 0,480                   |                                 |                                 |
| 12                       | 82                      | 95             | 300            |                         | 6,40           | 0,742                   | 0,258                           |                                 | 28                       | 450                     | 470            | 600            | 12,00                   | 0,520          | 0,480                   |                                 |                                 |
| 13                       | 83                      | 95             | 340            |                         | 7,10           | 0,714                   | 0,286                           |                                 | 29                       | 470                     | 491            | 600            | 12,00                   | 0,520          | 0,480                   |                                 |                                 |
| 14                       | 90                      | 115            | 385            |                         | 7,90           | 0,680                   | 0,320                           |                                 | 30                       | 510                     | 530            | 600            | 12,00                   | 0,520          | 0,480                   |                                 |                                 |
| 15                       | 93                      | 120            | 400            |                         | 8,70           | 0,650                   | 0,350                           |                                 | 31                       | 534                     | 550            | 600            | 12,00                   | 0,520          | 0,480                   |                                 |                                 |



SÁDROVÁ SMĚS 50 - 50 napěněná, vzorek Ø 20 x 50 mm

| Čas tepelného zpracování | Teplota ve stě. vzorku |                |                | Teplota na povr. vzorku | Teplota v peci | Úbytek hmotnosti vzorku | Poměrný zbytek hmotnosti vzorku | Poměrný úbytek hmotnosti vzorku | Čas tepelného zpracování | Teplota ve stě. vzorku |                |                | Teplota na povr. vzorku | Teplota v peci | Úbytek hmotnosti vzorku | Poměrný zbytek hmotnosti vzorku | Poměrný úbytek hmotnosti vzorku |
|--------------------------|------------------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| t                        | T <sub>1</sub>         | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub>          | m <sub>x</sub> | $\frac{m-m_x}{m-m_0}$   | $\frac{m}{m-m_0}$               | $\frac{m-m_x}{m}$               | t                        | T <sub>1</sub>         | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub>          | T <sub>5</sub> | m <sub>x</sub>          | $\frac{m-m_x}{m-m_0}$           | $\frac{m}{m-m_0}$               |
| min                      | °C                     | °C             | °C             | °C                      | g              | 1                       | 1                               | 1                               | min                      | °C                     | °C             | °C             | °C                      | °C             | g                       | 1                               | 1                               |
| 0                        | 27                     | 27             | 25             |                         | 0,00           | 1,000                   | 0,000                           |                                 | 16                       | 95                     | 125            | 415            | 3,90                    |                | 0,577                   | 0,423                           |                                 |
| 1                        | 28                     | 35             | 45             |                         | 0,10           | 0,990                   | 0,010                           |                                 | 17                       | 95                     | 145            | 432            | 4,00                    |                | 0,565                   | 0,435                           |                                 |
| 2                        | 30                     | 46             | 60             |                         | 0,20           | 0,979                   | 0,021                           |                                 | 18                       | 95                     | 185            | 455            | 4,20                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |
| 3                        | 35                     | 50             | 89             |                         | 0,40           | 0,957                   | 0,043                           |                                 | 19                       | 115                    | 210            | 475            | 4,20                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |
| 4                        | 41                     | 56             | 128            |                         | 0,80           | 0,914                   | 0,086                           |                                 | 20                       | 130                    | 272            | 495            | 4,20                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |
| 5                        | 45                     | 62             | 150            |                         | 1,00           | 0,892                   | 0,108                           |                                 | 21                       | 175                    | 336            | 510            | 4,00                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |
| 6                        | 52                     | 71             | 172            |                         | 1,30           | 0,859                   | 0,141                           |                                 | 22                       | 195                    | 398            | 520            | 4,20                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |
| 7                        | 59                     | 78             | 190            |                         | 1,60           | 0,827                   | 0,173                           |                                 | 23                       | 245                    | 435            | 535            | 4,20                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |
| 8                        | 63                     | 84             | 219            |                         | 1,90           | 0,794                   | 0,206                           |                                 | 24                       | 350                    | 475            | 552            | 4,20                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |
| 9                        | 66                     | 90             | 230            |                         | 2,30           | 0,750                   | 0,250                           |                                 | 25                       | 380                    | 498            | 572            | 4,20                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |
| 10                       | 70                     | 95             | 255            |                         | 2,50           | 0,729                   | 0,271                           |                                 | 26                       | 410                    | 550            | 580            | 4,20                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |
| 11                       | 75                     | 95             | 292            |                         | 2,90           | 0,685                   | 0,315                           |                                 | 27                       | 464                    | 575            | 598            | 4,20                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |
| 12                       | 79                     | 101            | 323            |                         | 3,20           | 0,653                   | 0,347                           |                                 | 28                       | 520                    | 590            | 600            | 4,20                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |
| 13                       | 85                     | 105            | 340            |                         | 3,40           | 0,631                   | 0,369                           |                                 | 29                       | 560                    | 600            | 600            | 4,20                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |
| 14                       | 90                     | 115            | 389            |                         | 3,60           | 0,609                   | 0,391                           |                                 | 30                       | 580                    | 600            | 600            | 4,20                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |
| 15                       | 95                     | 125            | 402            |                         | 3,80           | 0,587                   | 0,413                           |                                 | 31                       | 600                    | 600            | 600            | 4,20                    |                | 0,544                   | 0,456                           |                                 |



ALABASTROVÁ SÁDRA, vzorek  $\varnothing$  35 x 50 mm

| Čas tepelného zpracování | Teplota ve stř. vzorku |                | Teplota na povr. vzorku | Teplota v peci | Úbytek hmotnosti vzorku | Poměrný zbytek hmotnosti vzorku | Poměrný úbytek hmotnosti vzorku | Čas tepelného zpracování | Teplota ve stř. vzorku |                | Teplota na povr. vzorku | Teplota v peci | Poměrný úbytek hmotnosti vzorku |
|--------------------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|---------------------------------|
| t                        | T <sub>1</sub>         | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub>          | T <sub>x</sub> | $\frac{m_p - m_v}{m_p}$ | $\frac{m_p - m_v}{m_p}$         | $\frac{m_p - m_v}{m_p}$         | t                        | T <sub>1</sub>         | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub>          | T <sub>x</sub> | $\frac{m_p - m_v}{m_p}$         |
| min                      | °C                     | °C             | °C                      | g              | 1                       | 1                               | 1                               | min                      | °C                     | °C             | °C                      | g              | 1                               |
| 0                        | 27                     | 29             | 22                      | 0,00           | 1,000                   | 0,000                           |                                 | 21                       | 95                     | 241            |                         | 50,418         |                                 |
| 1                        | 30                     | 31             | 32                      | 0,10           | 0,999                   | 0,001                           |                                 | 22                       | 95                     | 270            |                         | 50,418         |                                 |
| 2                        | 30                     | 32             | 48                      | 0,25           | 0,996                   | 0,004                           |                                 | 23                       | 95                     | 300            |                         | 50,418         |                                 |
| 3                        | 31                     | 36             | 81                      | 0,30           | 0,995                   | 0,005                           |                                 | 24                       | 95                     | 315            |                         | 50,418         |                                 |
| 4                        | 32                     | 42             | 118                     | 0,40           | 0,994                   | 0,006                           |                                 | 25                       | 95                     | 350            |                         | 50,419         |                                 |
| 5                        | 34                     | 50             | 155                     | 0,40           | 0,994                   | 0,006                           |                                 | 26                       | 95                     | 372            |                         | 50,419         |                                 |
| 6                        | 36                     | 59             | 196                     | 0,80           | 0,990                   | 0,010                           |                                 | 27                       | 95                     | 395            |                         | 50,419         |                                 |
| 7                        | 40                     | 65             | 222                     | 0,90           | 0,987                   | 0,013                           |                                 | 28                       | 95                     | 418            |                         | 50,419         |                                 |
| 8                        | 50                     | 72             | 250                     | 1,25           | 0,984                   | 0,016                           |                                 | 29                       | 95                     | 420            |                         | 60,438         |                                 |
| 9                        | 56                     | 80             | 275                     | 1,90           | 0,976                   | 0,024                           |                                 | 30                       | 95                     | 422            |                         | 60,438         |                                 |
| 10                       | 60                     | 81             | 300                     | 2,60           | 0,967                   | 0,033                           |                                 | 31                       | 98                     | 424            |                         | 60,438         |                                 |
| 11                       | 68                     | 85             | 322                     | 3,80           | 0,952                   | 0,048                           |                                 | 32                       | 111                    | 426            |                         | 60,438         |                                 |
| 12                       | 72                     | 88             | 345                     | 4,80           | 0,940                   | 0,060                           |                                 | 33                       | 120                    | 427            |                         | 60,438         |                                 |
| 13                       | 75                     | 90             | 365                     | 6,60           | 0,917                   | 0,083                           |                                 | 34                       | 120                    | 428            |                         | 60,438         |                                 |
| 14                       | 80                     | 91             | 380                     | 8,70           | 0,891                   | 0,109                           |                                 | 35                       | 120                    | 428            |                         | 60,438         |                                 |
| 15                       | 80                     | 93             | 390                     | 10,30          | 0,871                   | 0,129                           |                                 | 36                       | 125                    | 429            |                         | 60,438         |                                 |
| 16                       | 85                     | 95             | 400                     | 12,90          | 0,838                   | 0,162                           |                                 | 37                       | 125                    | 430            |                         | 60,438         |                                 |
| 17                       | 89                     | 120            | 419                     | 15,20          | 0,810                   | 0,190                           |                                 | 38                       | 125                    | 434            |                         | 60,438         |                                 |
| 18                       | 91                     | 151            | 432                     | 17,10          | 0,786                   | 0,213                           |                                 | 39                       | 125                    | 437            |                         | 60,438         |                                 |
| 19                       | 91                     | 183            | 458                     | 19,00          | 0,762                   | 0,238                           |                                 | 40                       | 141                    | 441            |                         | 60,438         |                                 |
| 20                       | 92                     | 210            | 480                     | 22,00          | 0,725                   | 0,275                           |                                 | 41                       | 172                    | 447            |                         | 60,438         |                                 |





SÁDROVÁ SMĚS 50 - 50, napěchovaná vzorek Ø 35 x 50 mm

| Čas tepelného<br>zpracování | Teplota ve stř.<br>vzorku | Teplota na povr.<br>vzorku | Teplota v peci | Úbytek hmotnosti<br>vzorku | Poměrný úbytek<br>hmotnosti vzorku | Poměrný úbytek<br>hmotnosti vz.<br>1 | Čas tepelného<br>zpracování | Teplota ve stř.<br>vzorku | Teplota na povr.<br>vzorku | Teplota v peci | Úbytek hmotnosti<br>vzorku | Poměrný úbytek<br>hmotnosti<br>vzorku | Poměrný úbytek<br>hmotnosti<br>vzorku | Čas tepelného<br>zpracování |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| t                           | T <sub>1</sub>            | T <sub>2</sub>             | T <sub>3</sub> | m <sub>x</sub>             | $\frac{m_x}{m}$                    | $\frac{m_x}{m}$                      | t                           | T <sub>1</sub>            | T <sub>2</sub>             | T <sub>3</sub> | m <sub>x</sub>             | $\frac{m_x}{m}$                       | $\frac{m_x}{m}$                       | t                           |
| min                         | °C                        | °C                         | °C             | g                          | 1                                  | 1                                    | min                         | °C                        | °C                         | °C             | g                          | 1                                     | 1                                     | min                         |
| 0                           | 27                        | 27                         | 25             | 0,00                       | 1,000                              | 0,000                                | 21                          | 87                        | 155                        | 390            | 10,30                      | 0,733                                 | 0,267                                 | 42                          |
| 1                           | 27                        | 30                         | 35             | 0,20                       | 0,997                              | 0,003                                | 22                          | 89                        | 169                        | 400            | 10,90                      | 0,717                                 | 0,283                                 | 43                          |
| 2                           | 30                        | 35                         | 45             | 0,40                       | 0,990                              | 0,010                                | 23                          | 90                        | 180                        | 415            | 11,40                      | 0,704                                 | 0,296                                 | 44                          |
| 3                           | 35                        | 40                         | 52             | 0,60                       | 0,985                              | 0,015                                | 24                          | 95                        | 197                        | 430            | 11,80                      | 0,694                                 | 0,306                                 | 45                          |
| 4                           | 37                        | 44                         | 60             | 1,20                       | 0,969                              | 0,031                                | 25                          | 95                        | 210                        | 446            | 12,40                      | 0,678                                 | 0,322                                 | 46                          |
| 5                           | 39                        | 49                         | 90             | 1,70                       | 0,956                              | 0,044                                | 26                          | 95                        | 229                        | 460            | 12,90                      | 0,665                                 | 0,335                                 | 47                          |
| 6                           | 40                        | 49                         | 112            | 2,20                       | 0,943                              | 0,057                                | 27                          | 96                        | 254                        | 475            | 13,40                      | 0,652                                 | 0,348                                 | 48                          |
| 7                           | 42                        | 50                         | 150            | 2,70                       | 0,930                              | 0,070                                | 28                          | 98                        | 274                        | 489            | 13,90                      | 0,639                                 | 0,361                                 | 49                          |
| 8                           | 45                        | 60                         | 165            | 3,10                       | 0,920                              | 0,080                                | 29                          | 100                       | 290                        | 496            | 14,40                      | 0,626                                 | 0,374                                 | 50                          |
| 9                           | 50                        | 65                         | 185            | 3,50                       | 0,910                              | 0,090                                | 30                          | 105                       | 309                        | 505            | 14,80                      | 0,616                                 | 0,384                                 | 51                          |
| 10                          | 55                        | 80                         | 195            | 3,90                       | 0,899                              | 0,101                                | 31                          | 110                       | 329                        | 519            | 14,90                      | 0,613                                 | 0,387                                 | 52                          |
| 11                          | 60                        | 82                         | 235            | 4,20                       | 0,891                              | 0,109                                | 32                          | 115                       | 365                        | 530            | 15,20                      | 0,606                                 | 0,394                                 | 53                          |
| 12                          | 64                        | 90                         | 255            | 4,60                       | 0,881                              | 0,119                                | 33                          | 115                       | 390                        | 552            | 15,70                      | 0,593                                 | 0,407                                 | 54                          |
| 13                          | 69                        | 95                         | 285            | 5,10                       | 0,868                              | 0,132                                | 34                          | 125                       | 419                        | 565            | 16,00                      | 0,585                                 | 0,415                                 | 55                          |
| 14                          | 75                        | 98                         | 310            | 5,60                       | 0,855                              | 0,145                                | 35                          | 135                       | 432                        | 589            | 16,40                      | 0,575                                 | 0,425                                 | 56                          |
| 15                          | 80                        | 98                         | 319            | 6,10                       | 0,842                              | 0,158                                | 36                          | 142                       | 450                        | 599            | 16,70                      | 0,567                                 | 0,433                                 | 57                          |
| 16                          | 80                        | 105                        | 330            | 6,70                       | 0,826                              | 0,174                                | 37                          | 160                       | 468                        | 600            | 16,70                      | 0,567                                 | 0,433                                 | 58                          |
| 17                          | 82                        | 110                        | 345            | 7,30                       | 0,811                              | 0,189                                | 38                          | 189                       | 498                        | 600            | 16,70                      | 0,567                                 | 0,433                                 | 59                          |
| 18                          | 85                        | 125                        | 353            | 8,50                       | 0,780                              | 0,220                                | 39                          | 205                       | 515                        | 600            | 16,70                      | 0,567                                 | 0,433                                 | 60                          |
| 19                          | 85                        | 137                        | 365            | 9,20                       | 0,746                              | 0,254                                | 40                          | 211                       | 528                        | 600            | 17,00                      | 0,559                                 | 0,441                                 | 61                          |
| 20                          | 85                        | 145                        | 390            | 10,300                     | 0,733                              | 0,267                                | 41                          | 229                       | 542                        | 600            | 17,00                      | 0,559                                 | 0,441                                 | 62                          |



ALABASTROVÁ SÁDRA, vzorek Ø 50 x 50 mm

| Čas tepelného<br>spracování | Teplota ve stř.<br>vzorku | Teplota na povr.<br>vzorku | Teplota v peci | Úbytek hmotnosti<br>vzorku | Peměrný zbytek<br>hmotnosti vs. | Peměrný úbytek<br>hmotnosti vs. | Čas tepelného<br>spracování | Teplota ve stř.<br>vzorku | Teplota na povr.<br>vzorku | Teplota v peci<br>řezaný úbytek<br>hmotnosti vs. |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------|
| t                           | T <sub>1</sub>            | T <sub>2</sub>             | T <sub>3</sub> | m <sub>x</sub>             | $\frac{m-x}{p}$                 | $\frac{m-x}{p}$                 | t                           | T <sub>1</sub>            | T <sub>2</sub>             | T <sub>3</sub>                                   |
| min                         | °C                        | °C                         | °C             | g                          | l                               | l                               | min                         | °C                        | °C                         | °C                                               |
| 0                           | 23                        | 23                         | 23             | 0,00                       | 1,000                           | 0,000                           | 21                          | 75                        | 118                        | 30,401                                           |
| 1                           | 23                        | 30                         | 40             | 0,10                       | 0,999                           | 0,001                           | 22                          | 80                        | 125                        | 30,407                                           |
| 2                           | 23                        | 35                         | 45             | 0,30                       | 0,997                           | 0,003                           | 23                          | 82                        | 135                        | 30,412                                           |
| 3                           | 23                        | 42                         | 50             | 0,40                       | 0,996                           | 0,004                           | 24                          | 85                        | 130                        | 30,415                                           |
| 4                           | 23                        | 42                         | 65             | 0,60                       | 0,995                           | 0,005                           | 25                          | 85                        | 130                        | 30,423                                           |
| 5                           | 23                        | 48                         | 100            | 0,75                       | 0,995                           | 0,005                           | 26                          | 89                        | 130                        | 40,429                                           |
| 6                           | 23                        | 51                         | 120            | 0,80                       | 0,994                           | 0,006                           | 27                          | 90                        | 135                        | 40,437                                           |
| 7                           | 30                        | 58                         | 155            | 1,20                       | 0,992                           | 0,008                           | 28                          | 95                        | 139                        | 40,439                                           |
| 8                           | 35                        | 63                         | 170            | 1,70                       | 0,988                           | 0,012                           | 29                          | 95                        | 140                        | 40,445                                           |
| 9                           | 35                        | 70                         | 190            | 2,10                       | 0,986                           | 0,014                           | 30                          | 98                        | 143                        | 40,450                                           |
| 10                          | 38                        | 80                         | 200            | 2,80                       | 0,981                           | 0,019                           | 31                          | 100                       | 145                        | 40,450                                           |
| 11                          | 40                        | 85                         | 240            | 3,60                       | 0,976                           | 0,024                           | 32                          | 105                       | 150                        | 50,450                                           |
| 12                          | 42                        | 95                         | 260            | 4,60                       | 0,969                           | 0,031                           | 33                          | 110                       | 165                        | 50,450                                           |
| 13                          | 45                        | 95                         | 275            | 6,30                       | 0,958                           | 0,031                           | 34                          | 110                       | 170                        | 50,450                                           |
| 14                          | 50                        | 95                         | 290            | 7,50                       | 0,949                           | 0,051                           | 35                          | 115                       | 175                        | 50,450                                           |
| 15                          | 52                        | 100                        | 305            | 9,20                       | 0,938                           | 0,062                           | 36                          | 121                       | 190                        | 60,450                                           |
| 16                          | 55                        | 102                        | 315            | 11,30                      | 0,924                           | 0,076                           | 37                          | 125                       | 215                        | 60,450                                           |
| 17                          | 59                        | 105                        | 328            | 13,40                      | 0,910                           | 0,089                           | 38                          | 127                       | 230                        | 60,450                                           |
| 18                          | 62                        | 108                        | 338            | 15,50                      | 0,897                           | 0,102                           | 39                          | 129                       | 245                        | 60,450                                           |
| 19                          | 69                        | 115                        | 345            | 17,60                      | 0,883                           | 0,117                           | 40                          | 131                       | 270                        | 60,450                                           |
| 20                          | 70                        | 116                        | 355            | 20,10                      | 0,866                           | 0,134                           | 41                          | 135                       | 285                        | 60,450                                           |

SÁDROVÁ SMĚS 50 - 50, vzorek Ø 50 x 50 mm

| Čas tepelného<br>zpracování | Teplota ve stř.<br>vzorku |                |                | Teplota na pevr.<br>vzorku | Teplota v peci          | Úbytek hmotnosti<br>vzorku | Peměrný zbytek<br>hmotnosti vz. | Peměrný úbytek<br>hmotnosti vz. | Čas tepelného<br>zpracování | Teplota ve stř.<br>vzorku |                |                         | Teplota na pevr.<br>vzorku | Peměrný úbytek<br>hmotnosti vzorku |
|-----------------------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| t                           | T <sub>1</sub>            | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | $\frac{m_1 - m_2}{m_1}$    | $\frac{m_2 - m_3}{m_2}$ | $\frac{m_3 - m_4}{m_3}$    | $\frac{m_4 - m_5}{m_4}$         | $\frac{m_5 - m_6}{m_5}$         | t                           | T <sub>1</sub>            | T <sub>2</sub> | $\frac{m_1 - m_2}{m_1}$ | $\frac{m_2 - m_3}{m_2}$    | $\frac{m_3 - m_4}{m_3}$            |
| min                         | °C                        | °C             | °C             | g                          | l                       | l                          | l                               | l                               | min                         | °C                        | °C             | l                       | l                          | l                                  |
| 0                           | 25                        | 25             | 25             | 0,00                       | 1,000                   | 0,000                      |                                 |                                 | 21                          | 59                        | 120            | 0,449                   |                            |                                    |
| 1                           | 25                        | 30             | 35             | 0,10                       | 0,999                   | 0,001                      |                                 |                                 | 22                          | 65                        | 124            | 0,465                   |                            |                                    |
| 2                           | 25                        | 36             | 45             | 0,30                       | 0,998                   | 0,002                      |                                 |                                 | 23                          | 67                        | 125            | 0,481                   |                            |                                    |
| 3                           | 25                        | 43             | 51             | 0,40                       | 0,997                   | 0,003                      |                                 |                                 | 24                          | 69                        | 125            | 0,481                   |                            |                                    |
| 4                           | 27                        | 47             | 63             | 0,50                       | 0,996                   | 0,004                      |                                 |                                 | 25                          | 75                        | 130            | 0,481                   |                            |                                    |
| 5                           | 29                        | 54             | 95             | 0,70                       | 0,995                   | 0,005                      |                                 |                                 | 26                          | 79                        | 135            | 0,483                   |                            |                                    |
| 6                           | 31                        | 59             | 119            | 0,90                       | 0,994                   | 0,006                      |                                 |                                 | 27                          | 80                        | 135            | 0,483                   |                            |                                    |
| 7                           | 33                        | 62             | 153            | 1,10                       | 0,993                   | 0,007                      |                                 |                                 | 28                          | 80                        | 140            | 0,483                   |                            |                                    |
| 8                           | 35                        | 70             | 171            | 1,60                       | 0,990                   | 0,010                      |                                 |                                 | 29                          | 80                        | 145            | 0,483                   |                            |                                    |
| 9                           | 38                        | 75             | 187            | 2,20                       | 0,986                   | 0,014                      |                                 |                                 | 30                          | 85                        | 150            | 0,483                   |                            |                                    |
| 10                          | 40                        | 82             | 198            | 2,70                       | 0,982                   | 0,018                      |                                 |                                 | 31                          | 86                        | 153            | 0,483                   |                            |                                    |
| 11                          | 41                        | 95             | 235            | 3,60                       | 0,976                   | 0,024                      |                                 |                                 | 32                          | 89                        | 161            | 0,483                   |                            |                                    |
| 12                          | 43                        | 95             | 258            | 4,30                       | 0,971                   | 0,029                      |                                 |                                 | 33                          | 91                        | 168            | 0,483                   |                            |                                    |
| 13                          | 44                        | 95             | 275            | 6,50                       | 0,957                   | 0,043                      |                                 |                                 | 34                          | 95                        | 175            | 0,483                   |                            |                                    |
| 14                          | 46                        | 100            | 287            | 7,30                       | 0,951                   | 0,049                      |                                 |                                 | 35                          | 96                        | 191            | 0,483                   |                            |                                    |
| 15                          | 50                        | 105            | 308            | 9,10                       | 0,939                   | 0,061                      |                                 |                                 | 36                          | 96                        | 213            | 0,483                   |                            |                                    |
| 16                          | 51                        | 105            | 314            | 11,20                      | 0,925                   | 0,075                      |                                 |                                 | 37                          | 100                       | 226            | 0,483                   |                            |                                    |
| 17                          | 53                        | 105            | 330            | 13,40                      | 0,910                   | 0,090                      |                                 |                                 | 38                          | 105                       | 243            | 0,483                   |                            |                                    |
| 18                          | 54                        | 105            | 346            | 15,50                      | 0,899                   | 0,101                      |                                 |                                 | 39                          | 108                       | 268            | 0,483                   |                            |                                    |
| 19                          | 55                        | 110            | 357            | 17,30                      | 0,884                   | 0,116                      |                                 |                                 | 40                          | 110                       | 288            | 0,483                   |                            |                                    |
| 20                          | 57                        | 115            | 365            | 21,30                      | 0,857                   | 0,143                      |                                 |                                 | 41                          | 115                       | 310            | 0,483                   |                            |                                    |



SÁDROVÁ SMĚS 50 - 50, napěněná vzrtek Ø 50

| Čas tepelného zpracování | Teplota ve stř. vzrku | Teplota na povr. vzrku | Teplota v peci | Úbytek hmotnosti vzrku | Peměrný sbytek hmotnosti vzrku | Peměrný úbytek hmotnosti vzrku | Čas tepelného zpracování | Teplota ve stř. vzrku | Teplota na povr. | Peměrný úbytek hmotnosti vzrku |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------|
| $t$                      | $T_1$                 | $T_2$                  | $T_3$          | $\frac{m - m_1}{m}$    | $\frac{m - m_1}{m}$            | $\frac{m - m_1}{m}$            | $t$                      | $T_1$                 | $T_2$            | $\frac{m - m_1}{m}$            |
| min                      | °C                    | °C                     | °C             | g                      | l                              | l                              | min                      | °C                    | °C               | l                              |
| 0                        | 25                    | 25                     | 23             | 0,00                   | 1,000                          | 0,000                          | 21                       | 70                    | 13               | 0,392                          |
| 1                        | 25                    | 27                     | 30             | 0,20                   | 0,997                          | 0,003                          | 22                       | 71                    | 13               | 0,404                          |
| 2                        | 25                    | 30                     | 45             | 0,40                   | 0,993                          | 0,007                          | 23                       | 74                    | 14               | 0,415                          |
| 3                        | 25                    | 34                     | 50             | 0,50                   | 0,991                          | 0,009                          | 24                       | 79                    | 15               | 0,434                          |
| 4                        | 27                    | 40                     | 65             | 0,70                   | 0,988                          | 0,012                          | 25                       | 81                    | 16               | 0,455                          |
| 5                        | 30                    | 45                     | 90             | 0,90                   | 0,985                          | 0,015                          | 26                       | 82                    | 18               | 0,462                          |
| 6                        | 32                    | 50                     | 120            | 1,50                   | 0,974                          | 0,026                          | 27                       | 84                    | 21               | 0,464                          |
| 7                        | 34                    | 55                     | 155            | 1,90                   | 0,967                          | 0,033                          | 28                       | 85                    | 22               | 0,466                          |
| 8                        | 36                    | 65                     | 170            | 2,40                   | 0,958                          | 0,042                          | 29                       | 87                    | 23               | 0,466                          |
| 9                        | 38                    | 74                     | 195            | 2,60                   | 0,955                          | 0,045                          | 30                       | 90                    | 24               | 0,466                          |
| 10                       | 40                    | 80                     | 232            | 2,80                   | 0,951                          | 0,049                          | 31                       | 95                    | 25               | 0,468                          |
| 11                       | 42                    | 85                     | 260            | 3,10                   | 0,946                          | 0,054                          | 32                       | 95                    | 26               | 0,468                          |
| 12                       | 45                    | 90                     | 276            | 3,60                   | 0,937                          | 0,063                          | 33                       | 100                   | 30               | 0,468                          |
| 13                       | 49                    | 95                     | 289            | 4,10                   | 0,928                          | 0,072                          | 34                       | 105                   | 31               | 0,468                          |
| 14                       | 52                    | 95                     | 310            | 4,90                   | 0,914                          | 0,086                          | 35                       | 108                   | 32               | 0,468                          |
| 15                       | 56                    | 100                    | 315            | 5,30                   | 0,907                          | 0,093                          | 36                       | 112                   | 33               | 0,468                          |
| 16                       | 59                    | 115                    | 329            | 5,80                   | 0,898                          | 0,102                          | 37                       | 125                   | 35               | 0,468                          |
| 17                       | 60                    | 120                    | 345            | 6,20                   | 0,891                          | 0,109                          | 38                       | 120                   | 37               | 0,468                          |
| 18                       | 63                    | 125                    | 355            | 6,90                   | 0,879                          | 0,121                          | 39                       | 125                   | 38               | 0,468                          |
| 19                       | 65                    | 128                    | 365            | 7,40                   | 0,870                          | 0,130                          | 40                       | 130                   | 39               | 0,468                          |
| 20                       | 67                    | 130                    | 378            | 7,80                   | 0,873                          | 0,137                          | 41                       | 135                   | 40               | 0,468                          |

ALABASTROVÁ SÁDRA, vzorek 22,5 x 22,5 x 90 mm

| Čas tepelného zpracování |                |                | Teplota ve stř. v. vzorku |                |                | Teplota na povr. v. vzorku | Teplota v peci | Úbytek hmotnosti v. vzorku | Poměrný zbytek hmotnosti v. vzorku | Poměrný úbytek hmotnosti v. vzorku | Čas tepelného zpracování |                |                | Teplota ve stř. v. vzorku |                |                | Teplota na povr. v. vzorku | Teplota v peci | Poměrný úbytek hmotnosti v. vzorku |      |
|--------------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------------------|----------------|------------------------------------|------|
| t                        | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub>            | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>6</sub>             | T <sub>7</sub> | T <sub>8</sub>             | T <sub>9</sub>                     | T <sub>10</sub>                    | t                        | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub>            | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>6</sub>             | T <sub>7</sub> | T <sub>8</sub>                     |      |
| min                      | °C             | °C             | °C                        | °C             | g              | l                          | l              | l                          | l                                  | l                                  | min                      | °C             | °C             | °C                        | °C             | °C             | °C                         | °C             | °C                                 | l    |
| 0                        | 27             | 27             | 27                        | 0,00           | 1,000          | 0,000                      | 21             | 135                        | 220                                | 480                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 1                        | 35             | 40             | 60                        | 0,10           | 0,999          | 0,001                      | 22             | 141                        | 229                                | 495                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 2                        | 40             | 45             | 90                        | 0,30           | 0,997          | 0,003                      | 23             | 145                        | 240                                | 510                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 3                        | 55             | 65             | 120                       | 0,50           | 0,994          | 0,006                      | 24             | 152                        | 261                                | 530                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 4                        | 61             | 75             | 200                       | 1,20           | 0,985          | 0,015                      | 25             | 162                        | 275                                | 540                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 5                        | 69             | 85             | 210                       | 2,40           | 0,971          | 0,029                      | 26             | 178                        | 291                                | 550                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 6                        | 75             | 90             | 235                       | 4,70           | 0,942          | 0,058                      | 27             | 180                        | 295                                | 560                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 7                        | 81             | 94             | 250                       | 5,30           | 0,934          | 0,066                      | 28             | 186                        | 305                                | 570                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 8                        | 85             | 105            | 260                       | 8,30           | 0,898          | 0,102                      | 29             | 209                        | 325                                | 575                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 9                        | 88             | 110            | 275                       | 9,50           | 0,884          | 0,116                      | 30             | 215                        | 346                                | 580                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 10                       | 90             | 126            | 280                       | 11,80          | 0,857          | 0,143                      | 31             | 224                        | 358                                | 599                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 11                       | 95             | 134            | 290                       | 14,50          | 0,824          | 0,176                      | 32             | 232                        | 369                                | 600                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 12                       | 97             | 141            | 300                       | 17,20          | 0,792          | 0,208                      | 33             | 245                        | 380                                | 600                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 13                       | 97             | 146            | 315                       | 19,00          | 0,770          | 0,230                      | 34             | 258                        | 395                                | 600                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 14                       | 105            | 157            | 330                       | 23,20          | 0,719          | 0,281                      | 35             | 269                        | 410                                | 600                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 15                       | 115            | 168            | 360                       | 23,80          | 0,712          | 0,288                      | 36             | 278                        | 428                                | 600                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 16                       | 120            | 175            | 370                       | 25,50          | 0,691          | 0,309                      | 37             | 285                        | 445                                | 600                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 17                       | 122            | 180            | 400                       | 27,40          | 0,669          | 0,332                      | 38             | 296                        | 461                                | 600                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 18                       | 125            | 186            | 420                       | 29,20          | 0,646          | 0,354                      | 39             | 305                        | 479                                | 600                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 19                       | 128            | 190            | 440                       | 32,20          | 0,606          | 0,396                      | 40             | 341                        | 485                                | 600                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |
| 20                       | 130            | 209            | 465                       | 34,40          | 0,583          | 0,417                      | 41             | 365                        | 495                                | 600                                |                          |                |                |                           |                |                |                            |                |                                    | ,466 |



SÁDROVÁ SMĚS 50 - 50, vzorek 22,5 x 22,5 x 90 mm

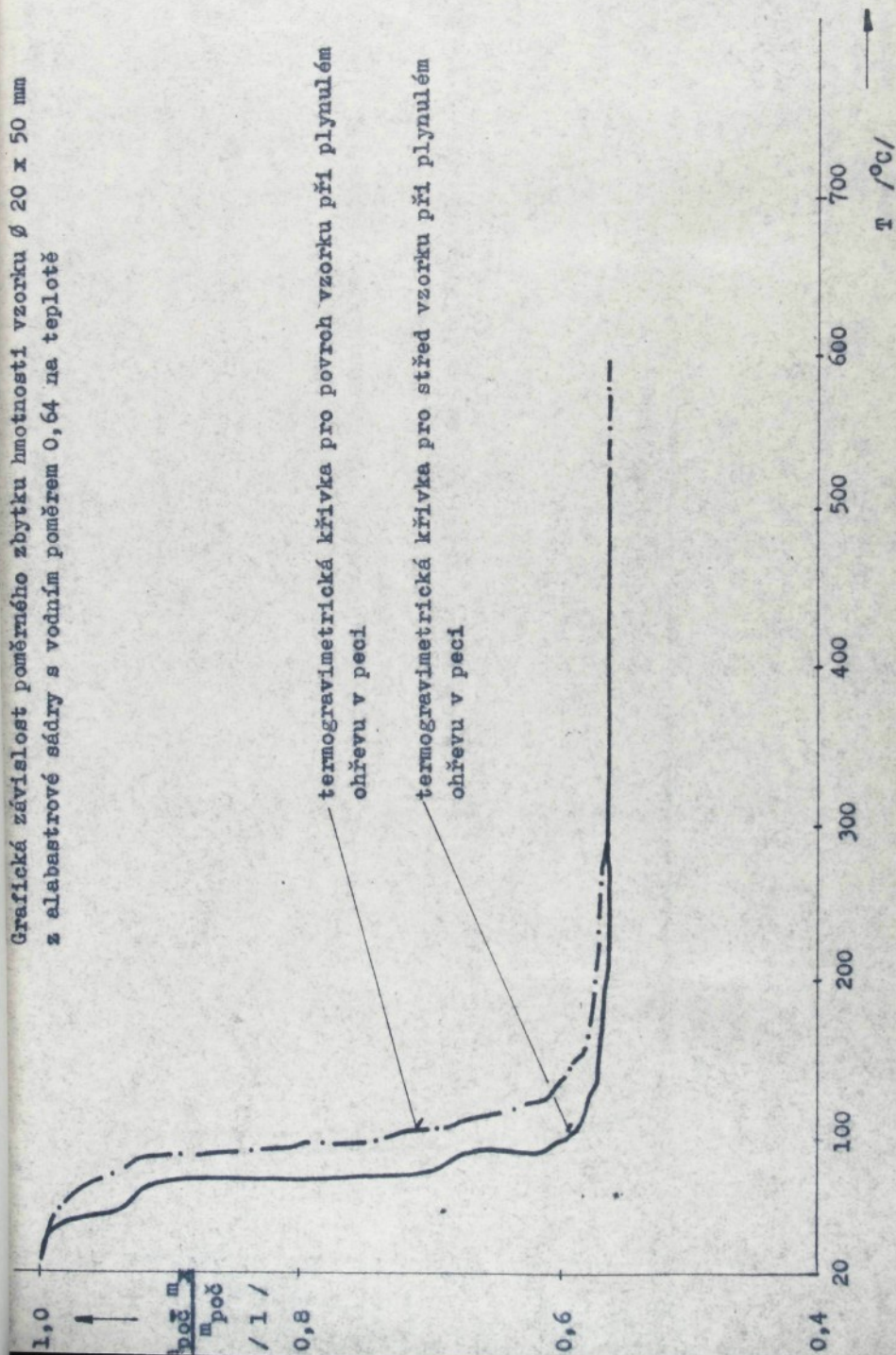
| Čas tepelného zpracování | Teplota ve stř. vzorku |                |                | Teplota na povr. vzorku |                         |                         | Teplota v peci |                |                | Úbytek hmotnosti vzorku | Poměrný zbytek hmotnosti vzorku | Poměrný úbytek hmotnosti vzorku | Čas tepelného zpracování | Teplota ve stř. vzorku |                |                         | Teplota na povr. vzorku |  |  | Teplota v peci reálný úbytek hmotnosti vzorku |
|--------------------------|------------------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|--|--|-----------------------------------------------|
| t                        | T <sub>1</sub>         | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | $\frac{T_3 - T_1}{T_1}$ | $\frac{T_3 - T_1}{T_1}$ | $\frac{T_3 - T_1}{T_1}$ | t              | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | $\frac{T_3 - T_1}{T_1}$ |                                 |                                 | t                        | T <sub>1</sub>         | T <sub>2</sub> | $\frac{T_3 - T_1}{T_1}$ |                         |  |  |                                               |
| min                      | °C                     | °C             | °C             | %                       | 1                       | 1                       | min            | °C             | °C             | °C                      | 1                               |                                 | min                      | °C                     | °C             | °C                      | 1                       |  |  |                                               |
| 0                        | 27                     | 27             | 27             | 0,00                    | 1,000                   | 0,000                   | 21             | 129            | 218            | 42,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 1                        | 36                     | 40             | 58             | 0,10                    | 0,999                   | 0,001                   | 22             | 135            | 226            | 43,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 2                        | 41                     | 54             | 85             | 0,20                    | 0,998                   | 0,002                   | 23             | 142            | 238            | 44,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 3                        | 45                     | 60             | 117            | 0,50                    | 0,995                   | 0,005                   | 24             | 148            | 255            | 46,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 4                        | 56                     | 80             | 195            | 1,20                    | 0,985                   | 0,015                   | 25             | 154            | 276            | 47,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 5                        | 60                     | 85             | 210            | 2,50                    | 0,969                   | 0,031                   | 26             | 163            | 289            | 48,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 6                        | 65                     | 90             | 235            | 4,10                    | 0,939                   | 0,061                   | 27             | 172            | 305            | 50,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 7                        | 71                     | 95             | 250            | 5,50                    | 0,932                   | 0,068                   | 28             | 180            | 313            | 51,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 8                        | 79                     | 100            | 265            | 7,60                    | 0,905                   | 0,095                   | 29             | 192            | 325            | 53,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 9                        | 84                     | 110            | 275            | 9,80                    | 0,878                   | 0,122                   | 30             | 198            | 331            | 54,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 10                       | 89                     | 115            | 280            | 11,90                   | 0,851                   | 0,149                   | 31             | 209            | 348            | 55,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 11                       | 90                     | 120            | 305            | 17,50                   | 0,817                   | 0,183                   | 32             | 217            | 365            | 57,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 12                       | 92                     | 125            | 316            | 19,10                   | 0,762                   | 0,238                   | 33             | 225            | 376            | 59,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 13                       | 95                     | 131            | 327            | 23,40                   | 0,709                   | 0,291                   | 34             | 231            | 389            | 59,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 14                       | 100                    | 142            | 338            | 26,10                   | 0,674                   | 0,326                   | 35             | 243            | 408            | 60,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 15                       | 105                    | 153            | 340            | 26,50                   | 0,676                   | 0,324                   | 36             | 255            | 425            | 60,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 16                       | 108                    | 165            | 358            | 27,50                   | 0,647                   | 0,343                   | 37             | 262            | 439            | 60,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 17                       | 110                    | 175            | 367            | 29,60                   | 0,632                   | 0,368                   | 38             | 285            | 462            | 60,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 18                       | 116                    | 182            | 379            | 32,80                   | 0,592                   | 0,408                   | 39             | 307            | 480            | 60,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 19                       | 120                    | 198            | 395            | 34,90                   | 0,564                   | 0,436                   | 40             | 321            | 491            | 60,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |
| 20                       | 125                    | 208            | 410            | 34,60                   | 0,555                   | 0,445                   | 41             | 345            | 501            | 60,489                  |                                 |                                 |                          |                        |                |                         |                         |  |  |                                               |

SÁDROVÁ SMĚS 50 - 50, napěněná, vzorek 22,5 x 22,

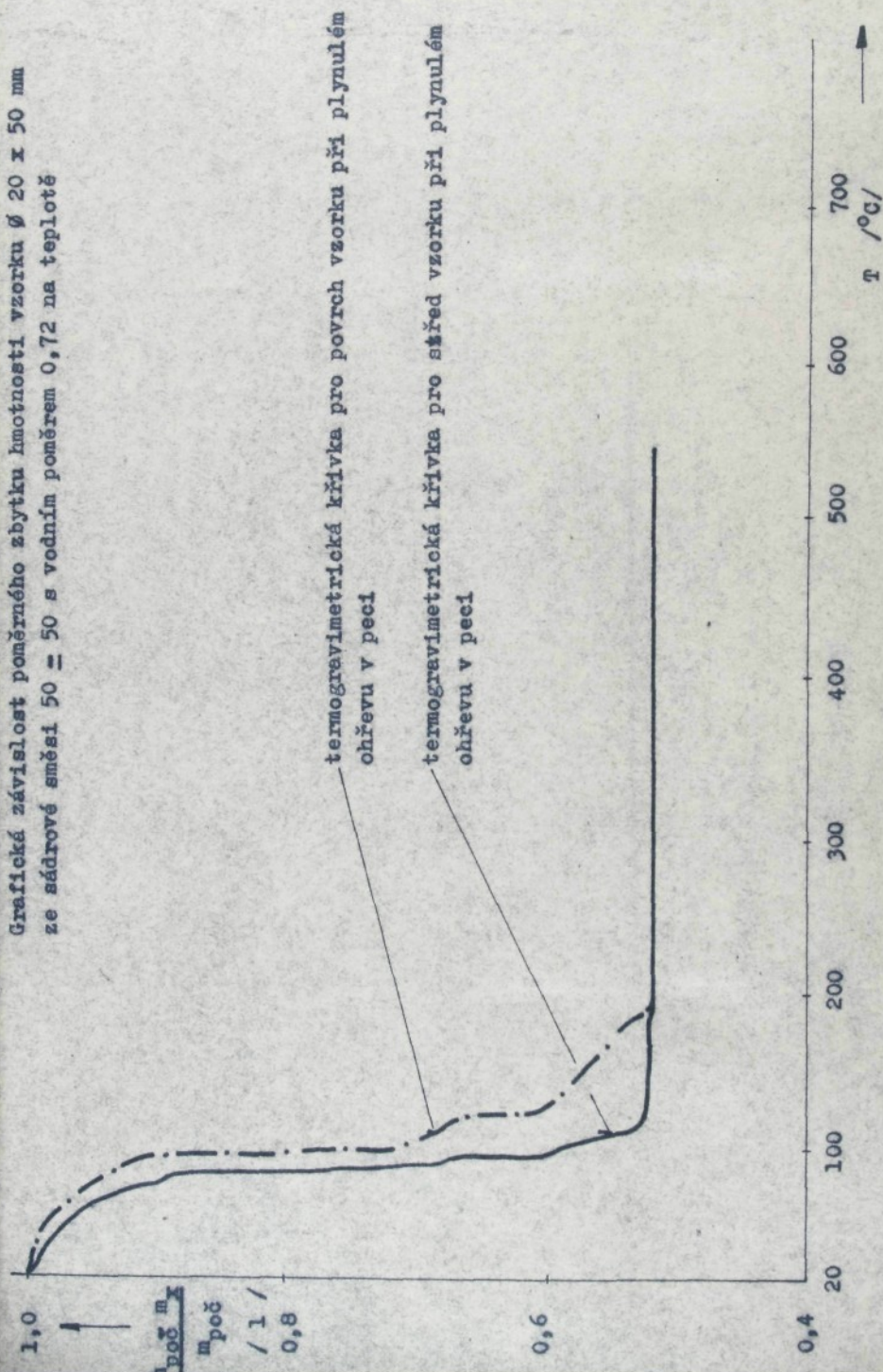
| Čas tepelného zpracování | Teplota ve stř. vzorku |                |                | Teplota na povr. vzorku | Teplota v peci      | Úbytek hmotnosti vzorku | Poměrný zbytek hmotnosti vzorku | Poměrný úbytek hmotnosti vzorku | Čas tepelného zpracování | Teplota ve stř. vzorku |                     |                 | Teplota na povr. vzorku | Poměrný úbytek hmotnosti vzorku |                |                |                     |
|--------------------------|------------------------|----------------|----------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|-----------------|-------------------------|---------------------------------|----------------|----------------|---------------------|
| t                        | T <sub>1</sub>         | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | m <sub>x</sub>          | $\frac{m - m_x}{p}$ | $\frac{m_x}{p}$         | t                               | T <sub>1</sub>                  | T <sub>2</sub>           | T <sub>3</sub>         | $\frac{m - m_x}{p}$ | $\frac{m_x}{p}$ | t                       | T <sub>1</sub>                  | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | $\frac{m - m_x}{p}$ |
| min                      | °C                     | °C             | °C             | g                       | 1                   | 1                       | min                             | °C                              | °C                       | °C                     | 1                   | 1               | min                     | °C                              | °C             | °C             | 1                   |
| 0                        | 26                     | 26             | 24             | 0,00                    | 1,000               | 0,000                   | 21                              | 115                             | 199                      | 30,463                 |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 1                        | 30                     | 35             | 30             | 0,10                    | 0,998               | 0,002                   | 22                              | 120                             | 215                      | 40,463                 |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 2                        | 39                     | 43             | 45             | 0,20                    | 0,995               | 0,005                   | 23                              | 126                             | 245                      | 40,463                 |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 3                        | 48                     | 59             | 51             | 0,50                    | 0,987               | 0,013                   | 24                              | 126                             | 267                      | 40,463                 |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 4                        | 55                     | 70             | 64             | 1,10                    | 0,971               | 0,029                   | 25                              | 126                             | 290                      | 40,463                 |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 5                        | 68                     | 85             | 89             | 1,90                    | 0,950               | 0,050                   | 26                              | 130                             | 315                      | 40,463                 |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 6                        | 73                     | 85             | 117            | 2,50                    | 0,933               | 0,067                   | 27                              | 145                             | 345                      | 4,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 7                        | 80                     | 96             | 150            | 4,70                    | 0,874               | 0,126                   | 28                              | 161                             | 368                      | 4,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 8                        | 81                     | 96             | 168            | 5,30                    | 0,858               | 0,142                   | 29                              | 190                             | 396                      | 5,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 9                        | 85                     | 96             | 195            | 6,20                    | 0,834               | 0,166                   | 30                              | 200                             | 405                      | 5,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 10                       | 85                     | 96             | 235            | 7,50                    | 0,799               | 0,201                   | 31                              | 215                             | 425                      | 5,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 11                       | 85                     | 100            | 258            | 8,10                    | 0,783               | 0,217                   | 32                              | 248                             | 458                      | 5,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 12                       | 90                     | 105            | 275            | 8,90                    | 0,762               | 0,238                   | 33                              | 265                             | 486                      | 5,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 13                       | 95                     | 110            | 285            | 9,30                    | 0,751               | 0,249                   | 34                              | 295                             | 500                      | 5,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 14                       | 95                     | 115            | 309            | 9,90                    | 0,734               | 0,266                   | 35                              | 320                             | 516                      | 5,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 15                       | 95                     | 115            | 316            | 10,80                   | 0,711               | 0,289                   | 36                              | 345                             | 535                      | 6,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 16                       | 95                     | 115            | 330            | 11,60                   | 0,690               | 0,310                   | 37                              | 368                             | 550                      | 6,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 17                       | 95                     | 125            | 345            | 12,50                   | 0,665               | 0,335                   | 38                              | 390                             | 561                      | 6,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 18                       | 95                     | 125            | 365            | 13,10                   | 0,649               | 0,351                   | 39                              | 420                             | 570                      | 6,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 19                       | 100                    | 156            | 375            | 14,00                   | 0,625               | 0,375                   | 40                              | 448                             | 592                      | 6,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |
| 20                       | 110                    | 178            | 392            | 14,10                   | 0,622               | 0,378                   | 41                              | 485                             | 600                      | 6,463                  |                     |                 |                         |                                 |                |                |                     |



Grafická závislost poměrného zbytku hmotnosti vzorku  $\varnothing 20 \times 50$  mm  
z elabastrové sádky s vodním poměrem 0,64 na teplotě

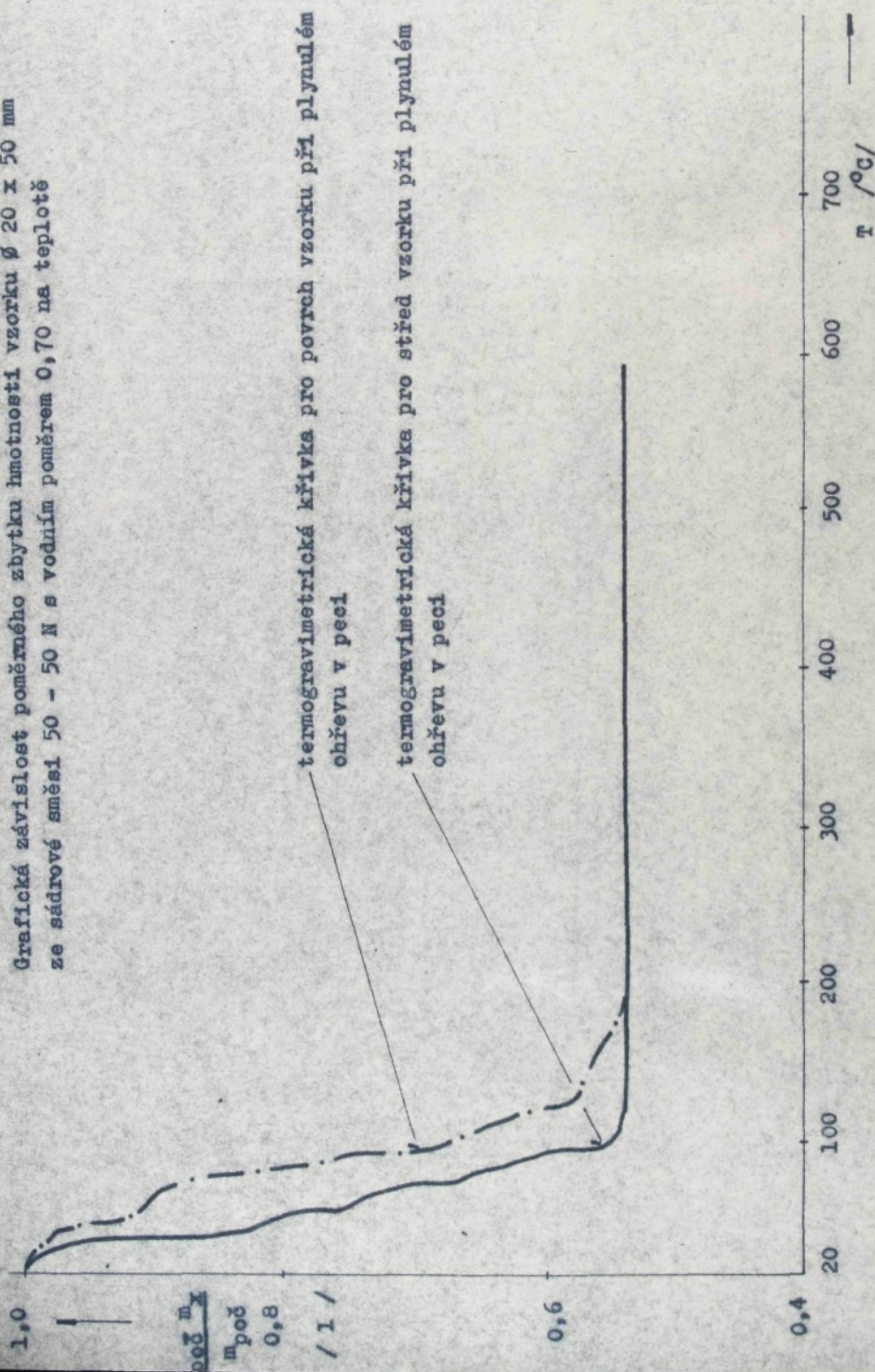


Grafická závislost poměrného zbytku kmočnosti vzorku  $\emptyset 20 \times 50$  mm  
ze sádrové směsi 50 = 50 s vodním poměrem 0,72 na teplotě

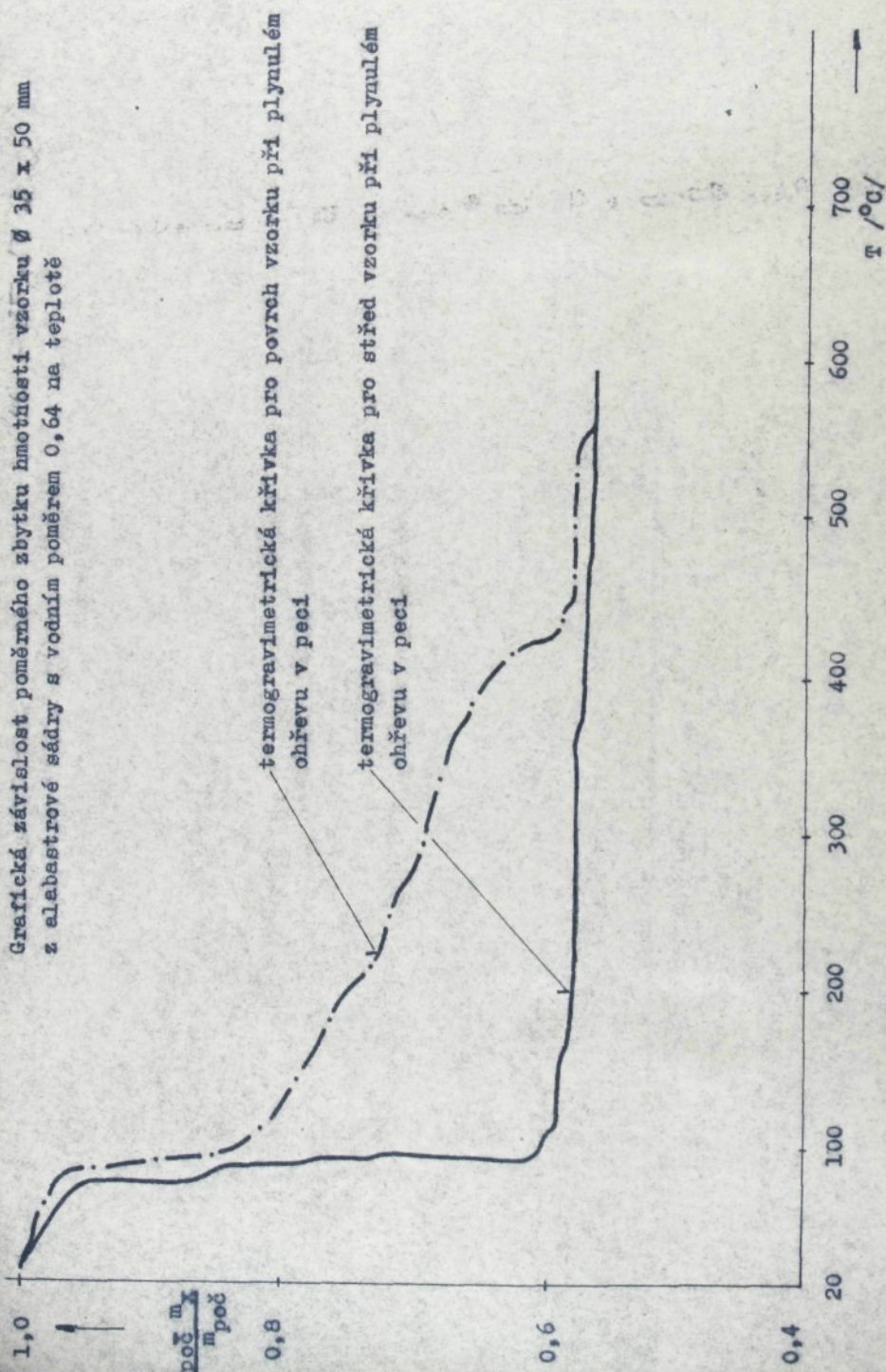




Grafická závislost poměrného zbytku hmotnosti vzorku  $\phi$  20 x 50 mm  
ze sádrové směsi 50 - 50 N s vodním poměrem 0,70 na teplotě

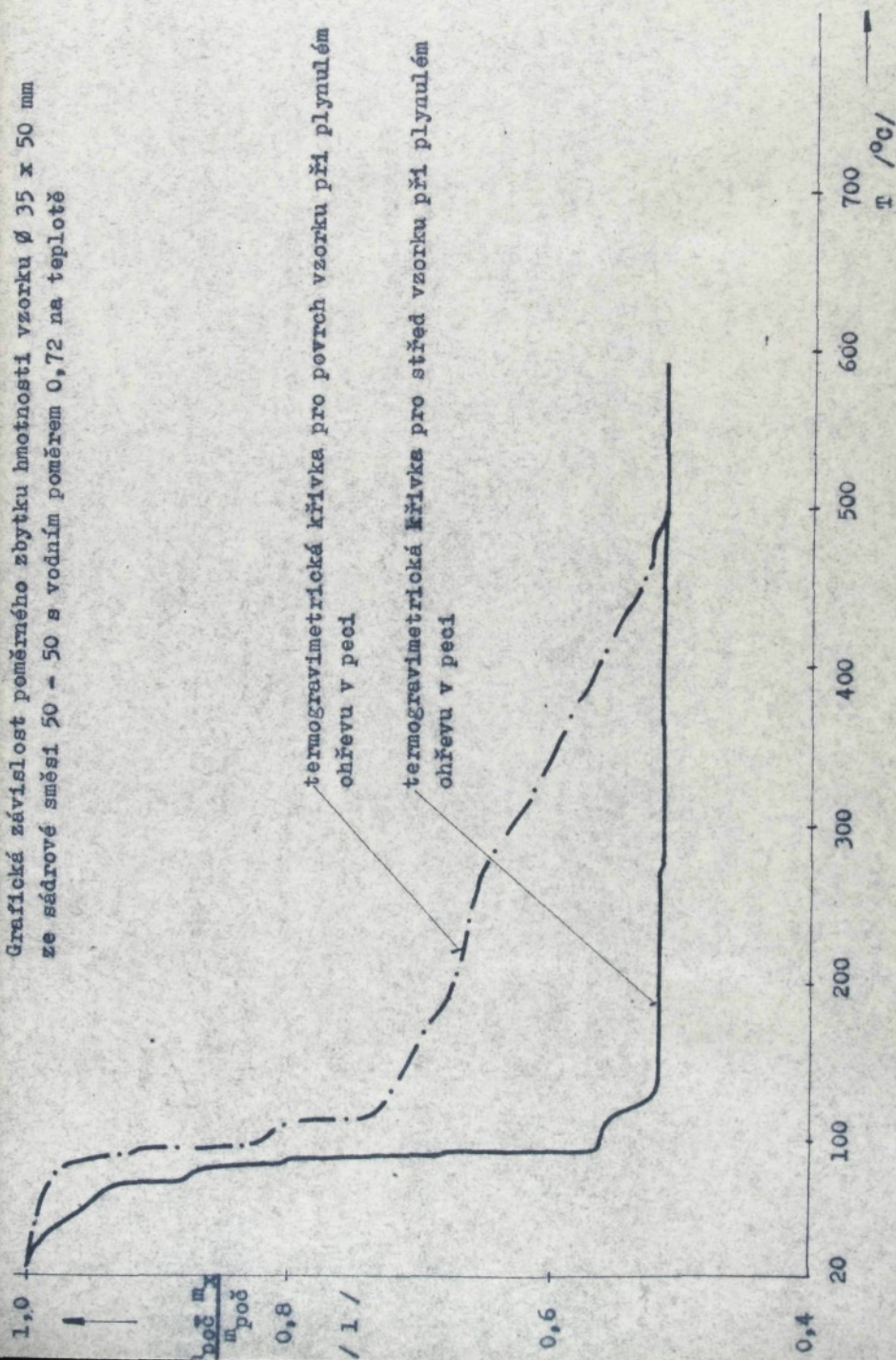


Grafická závislost poměrného zbytku hmotnosti vzorku  $\varnothing 35 \times 50$  mm  
z alabastrové sádry s vodním poměrem 0,64 na teplotě

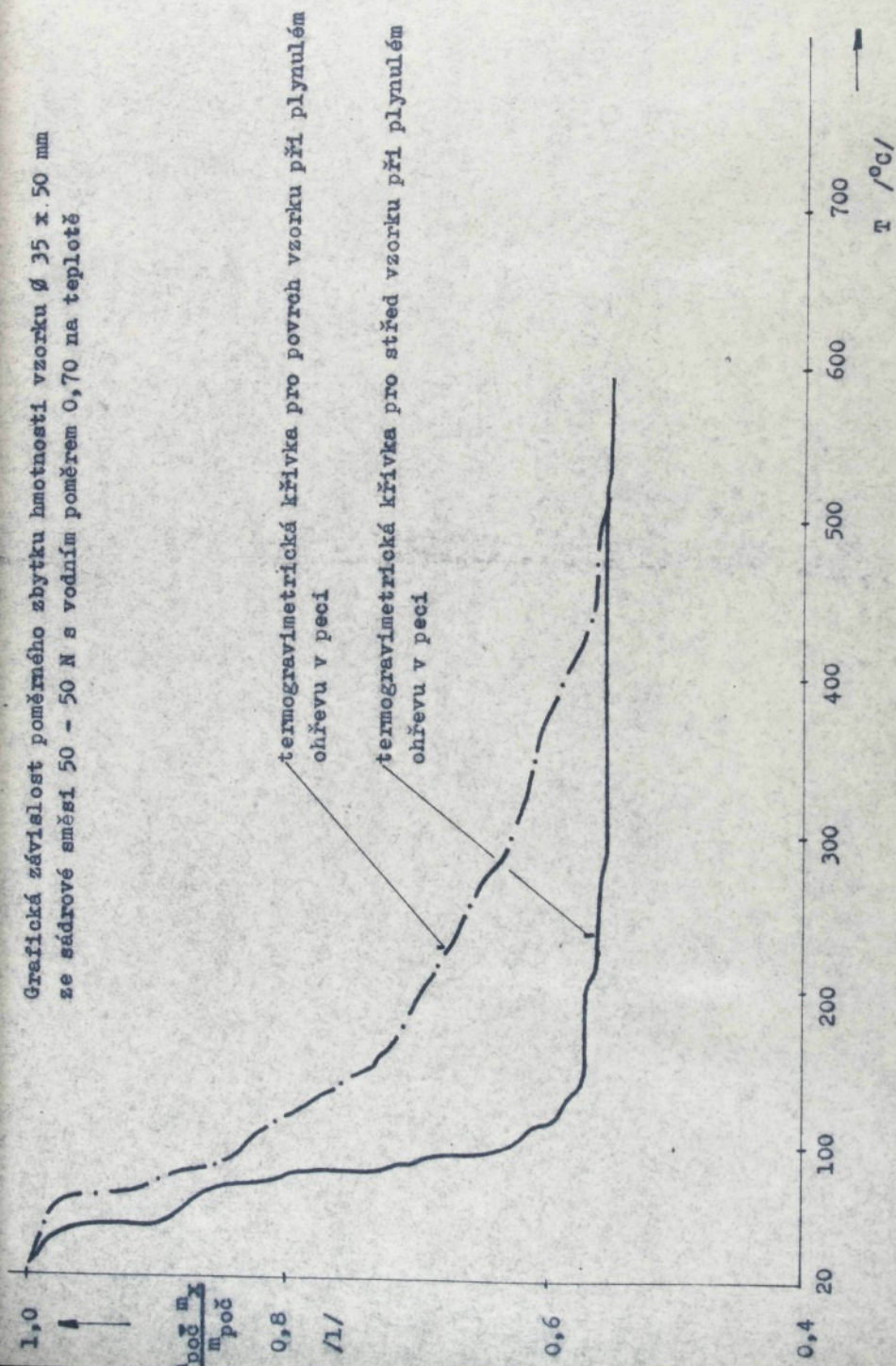




Grafická závislost poměrného zbytku hmotnosti vzorku  $\varnothing 35 \times 50$  mm  
ze sádrové směsi 50 - 50 s vodním poměrem 0,72 na teplotě

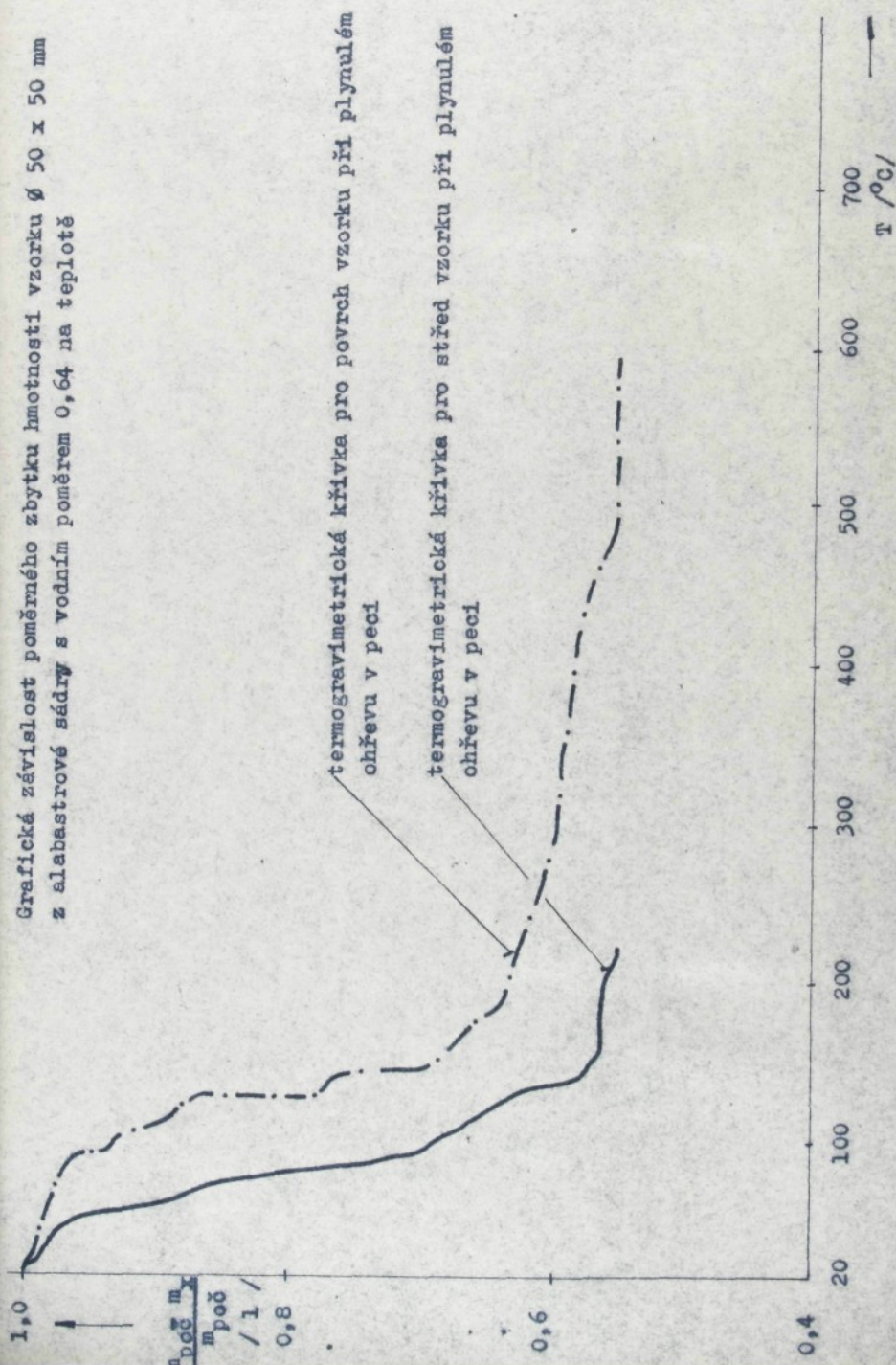


Grafická závislost poměrného zbytku hmotnosti vzorku  $\varnothing 35 \times 50$  mm  
ze sádrové směsi 50 - 50 N s vodním poměrem 0,70 na teplotě

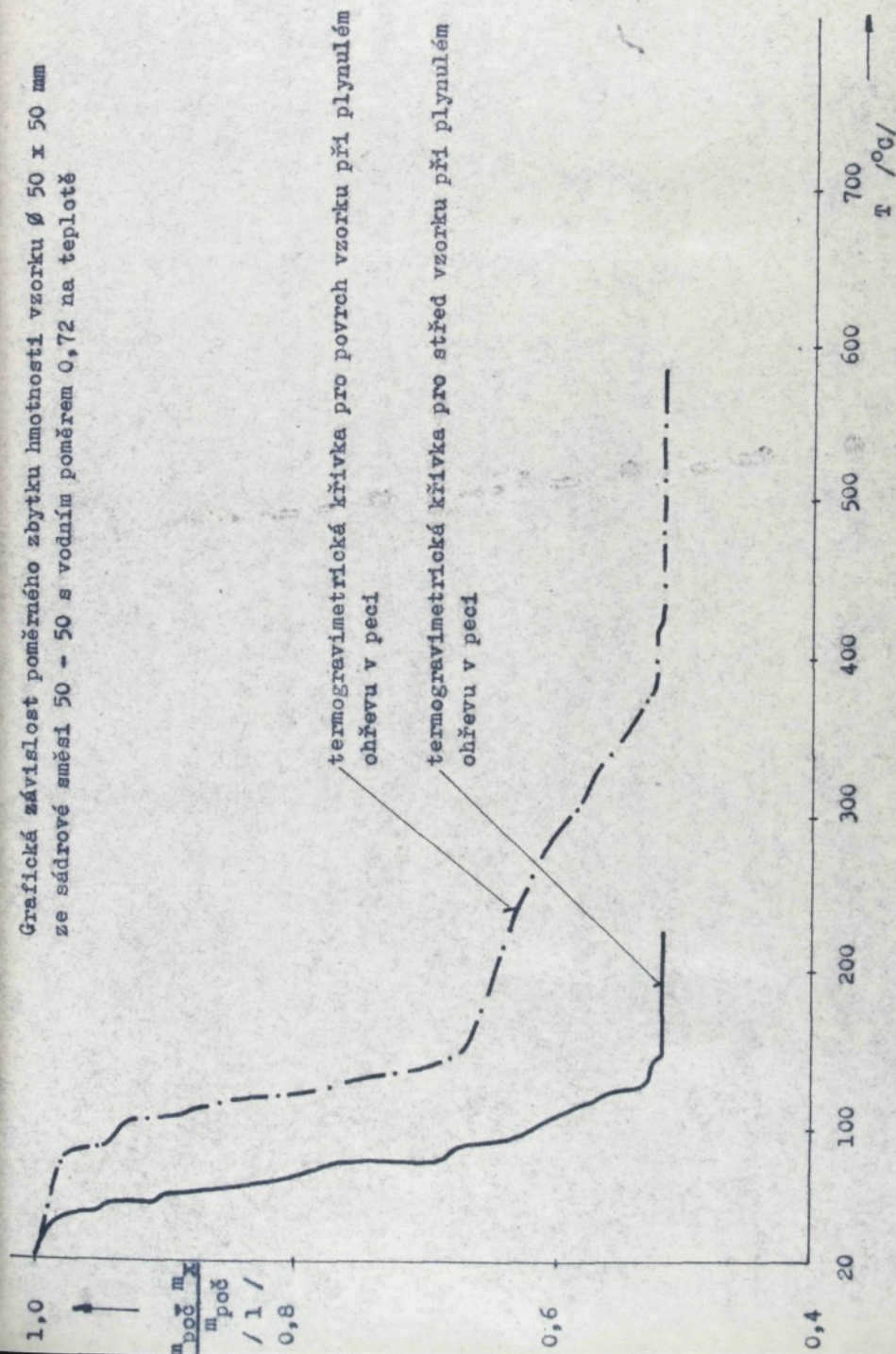




Grafická závislost poměrného zbytku hmotnosti vzorku  $\emptyset 50 \times 50$  mm  
z alabastrové sádky s vodním poměrem 0,64 na teplotě

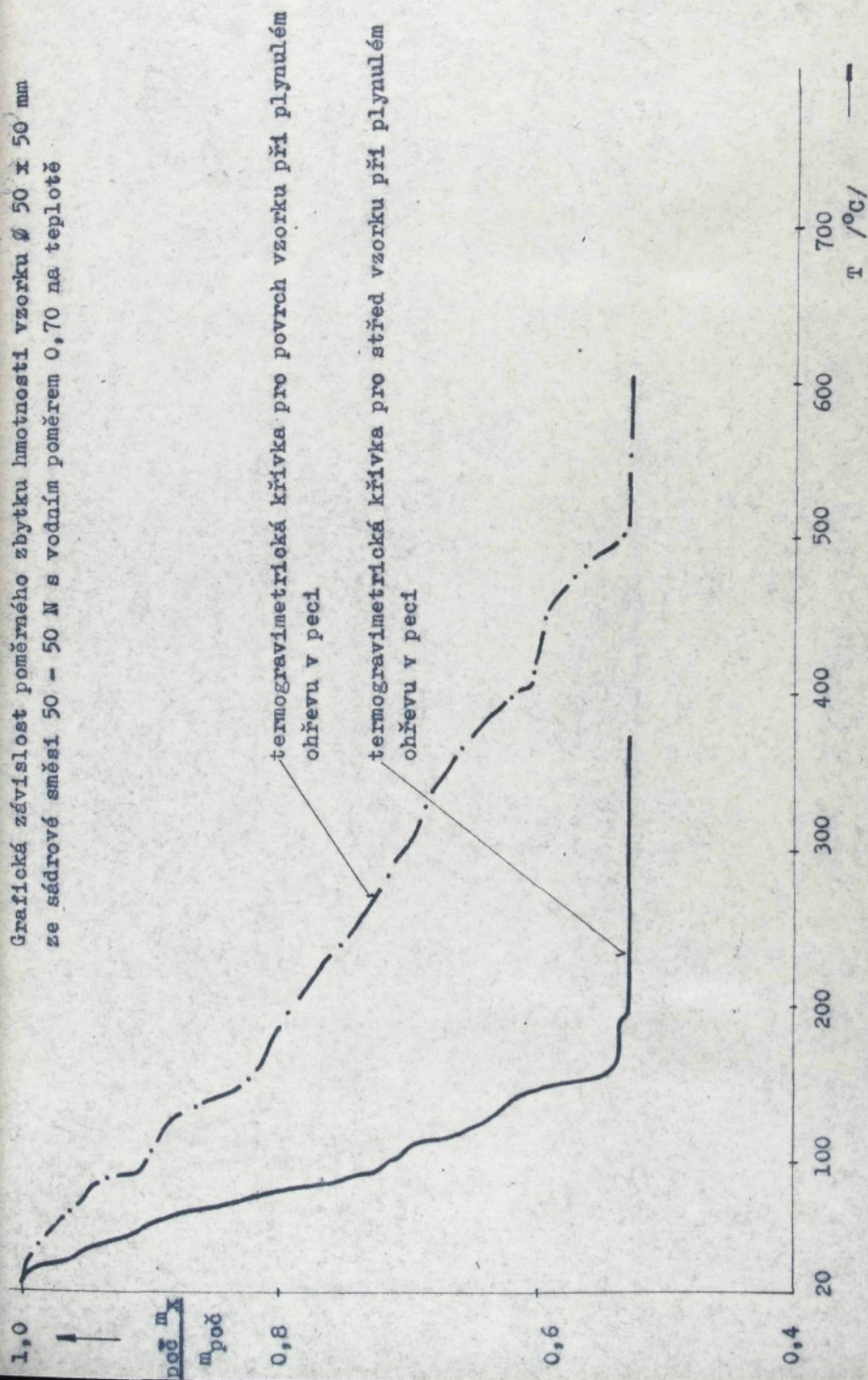


Grafická závislost poměrného zbytku hmotnosti vzorku  $\varnothing 50 \times 50$  mm  
ze sádrové směsi 50 - 50 s vodním poměrem 0,72 na teplotě

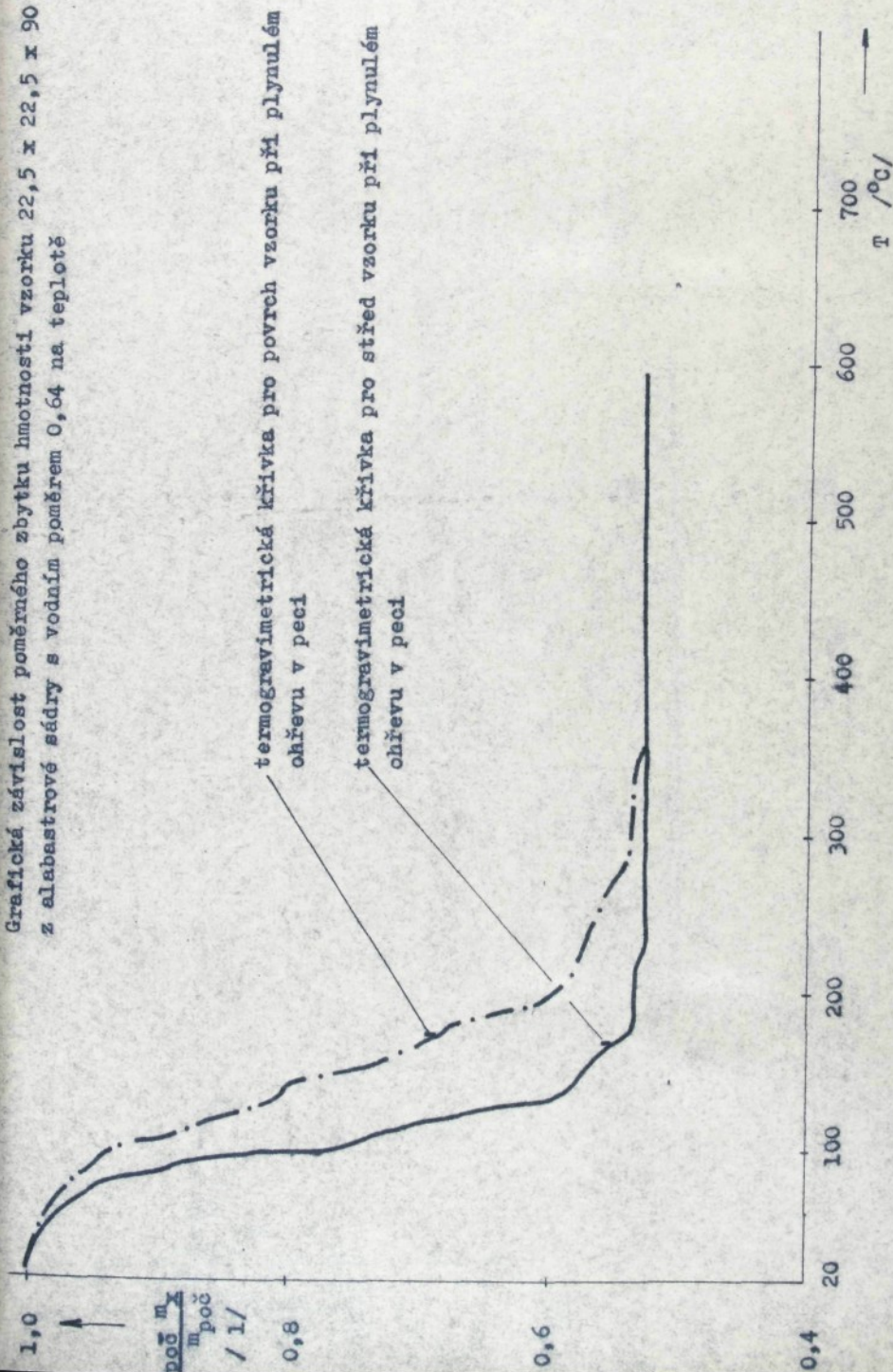




Grafická závislost poměrného zbytku hmotnosti vzorku  $\varnothing 50 \times 50$  mm ze sádrové směsi 50 - 50 N s vodním poměrem 0,70 na teplotě

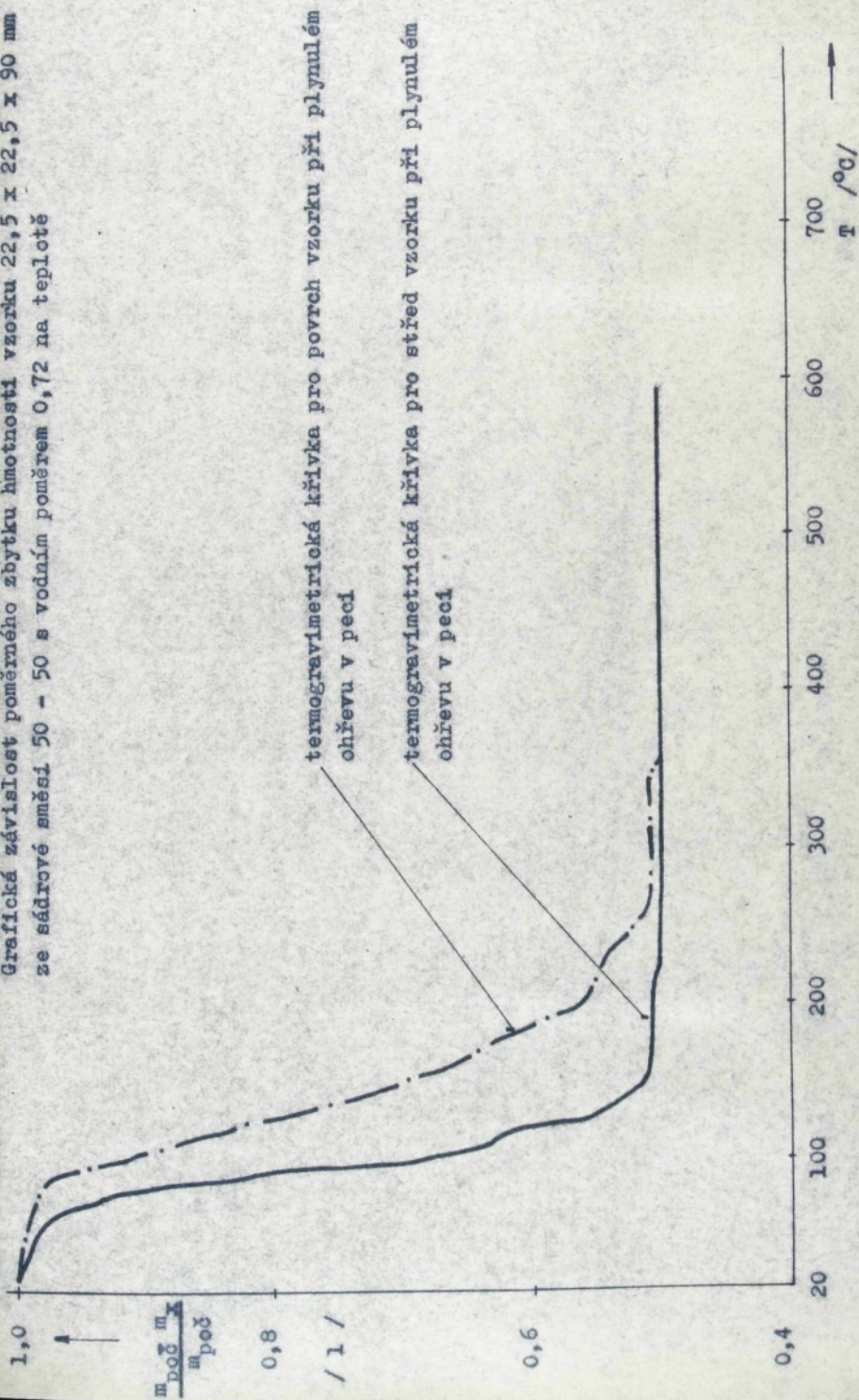


Grafická závislosť pomerného zvyšku hmotnosti vzorku 22,5 x 22,5 x 90 mm z alabastrové sádry s vodným poměrem 0,64 na teplotě

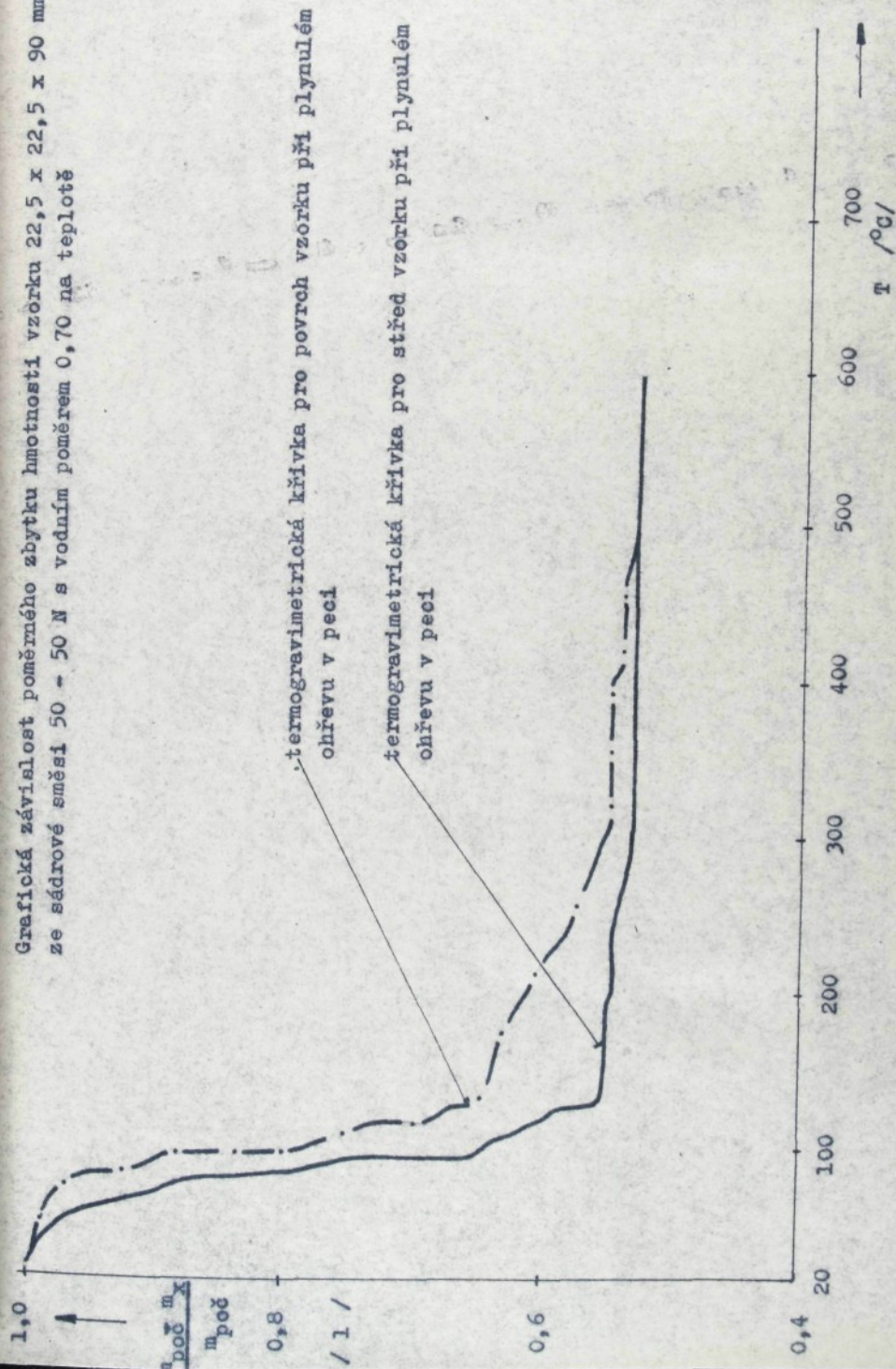




Grafická závislost poměrného zbytku hmotnosti vzorku 22,5 x 22,5 x 90 mm ze sádrové směsi 50 - 50 s vodním poměrem 0,72 na teplotě

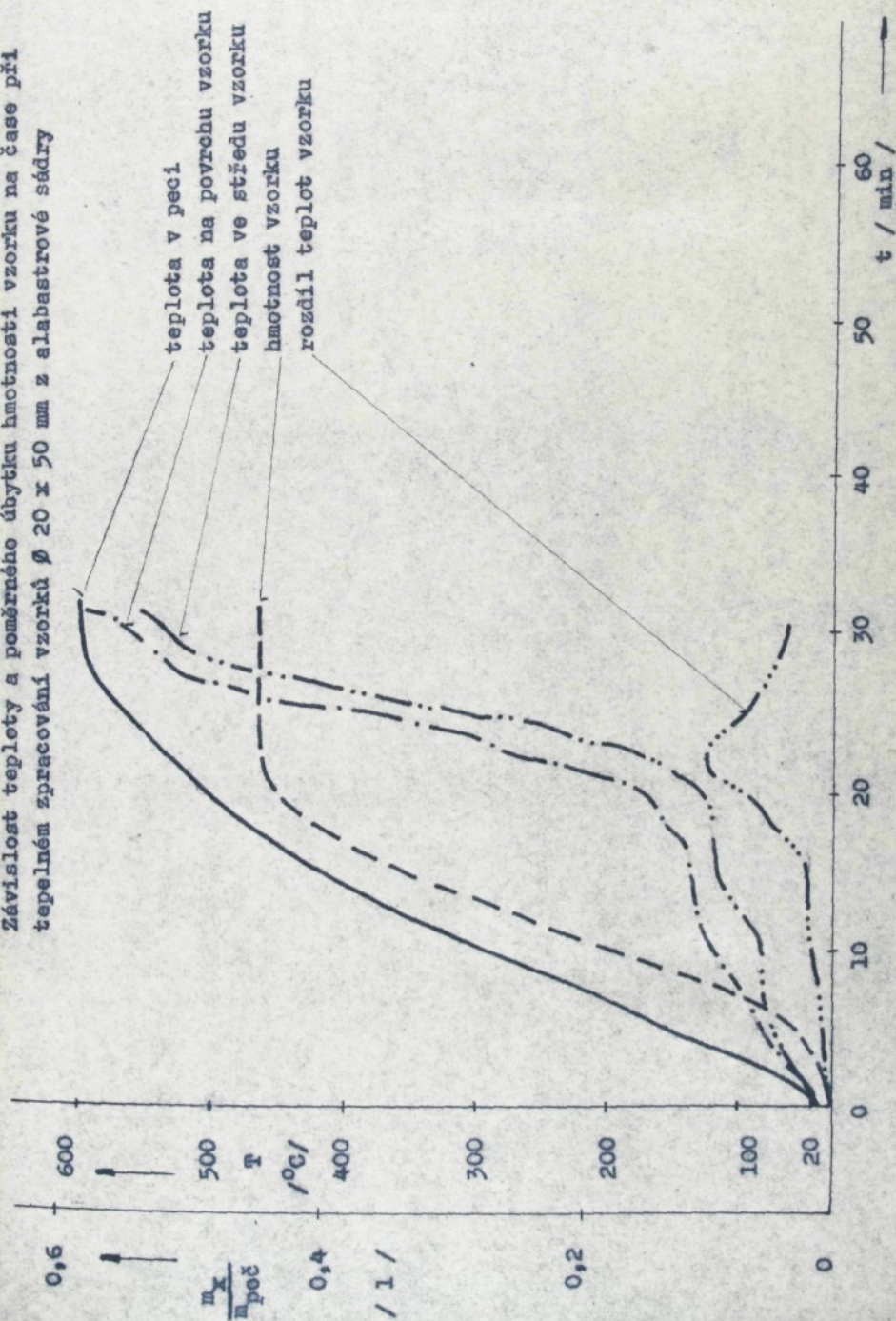


Grafická závislost poměrného zbytku hmotnosti vzorku 22,5 x 22,5 x 90 mm ze sádrové směsi 50 - 50 N s vodním poměrem 0,70 na teplotě

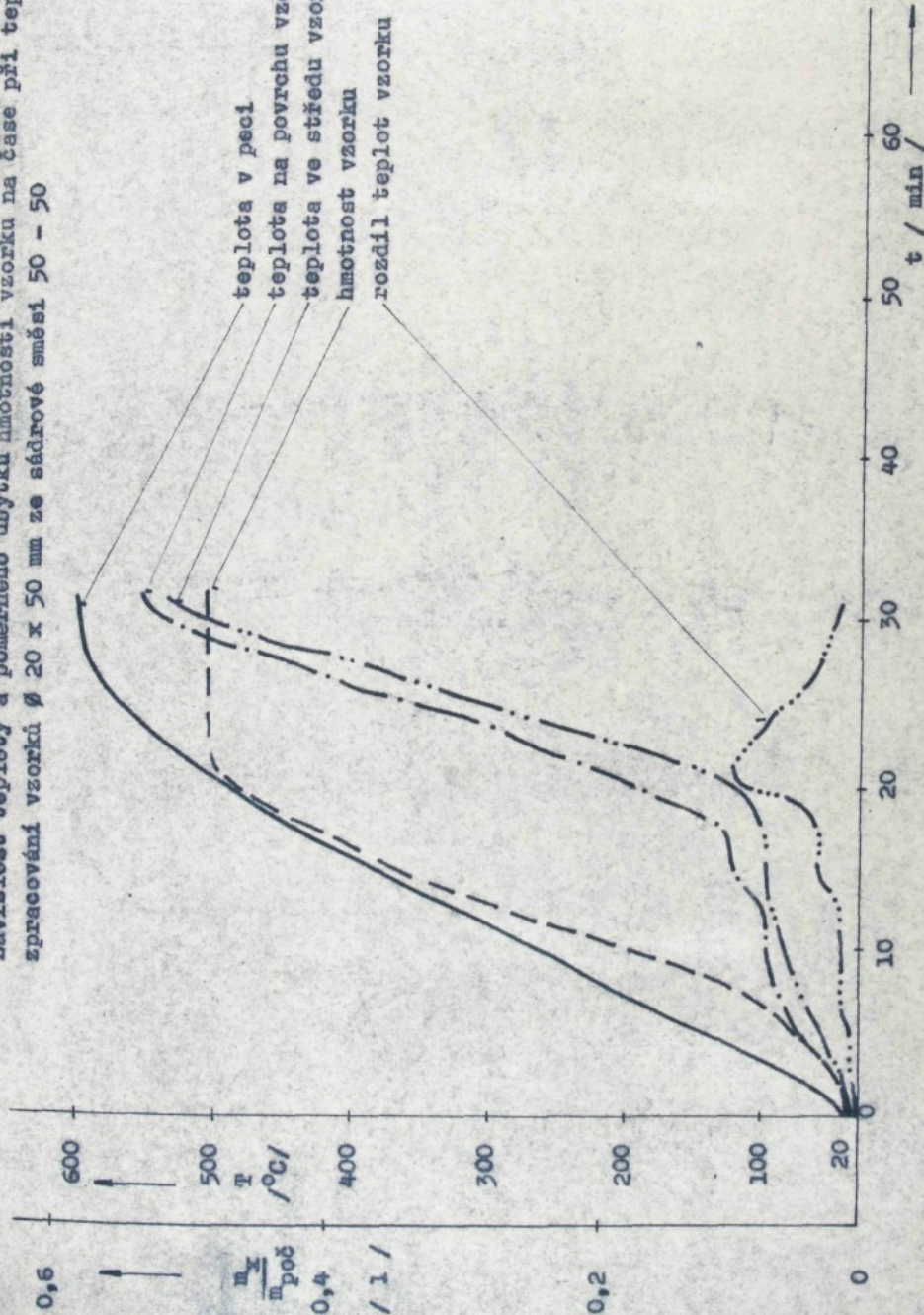




Závislost teploty a poměrného úbytku hmotnosti vzorku na čase při tepelném zpracování vzorků Ø 20 x 50 mm z alabastrové sádry

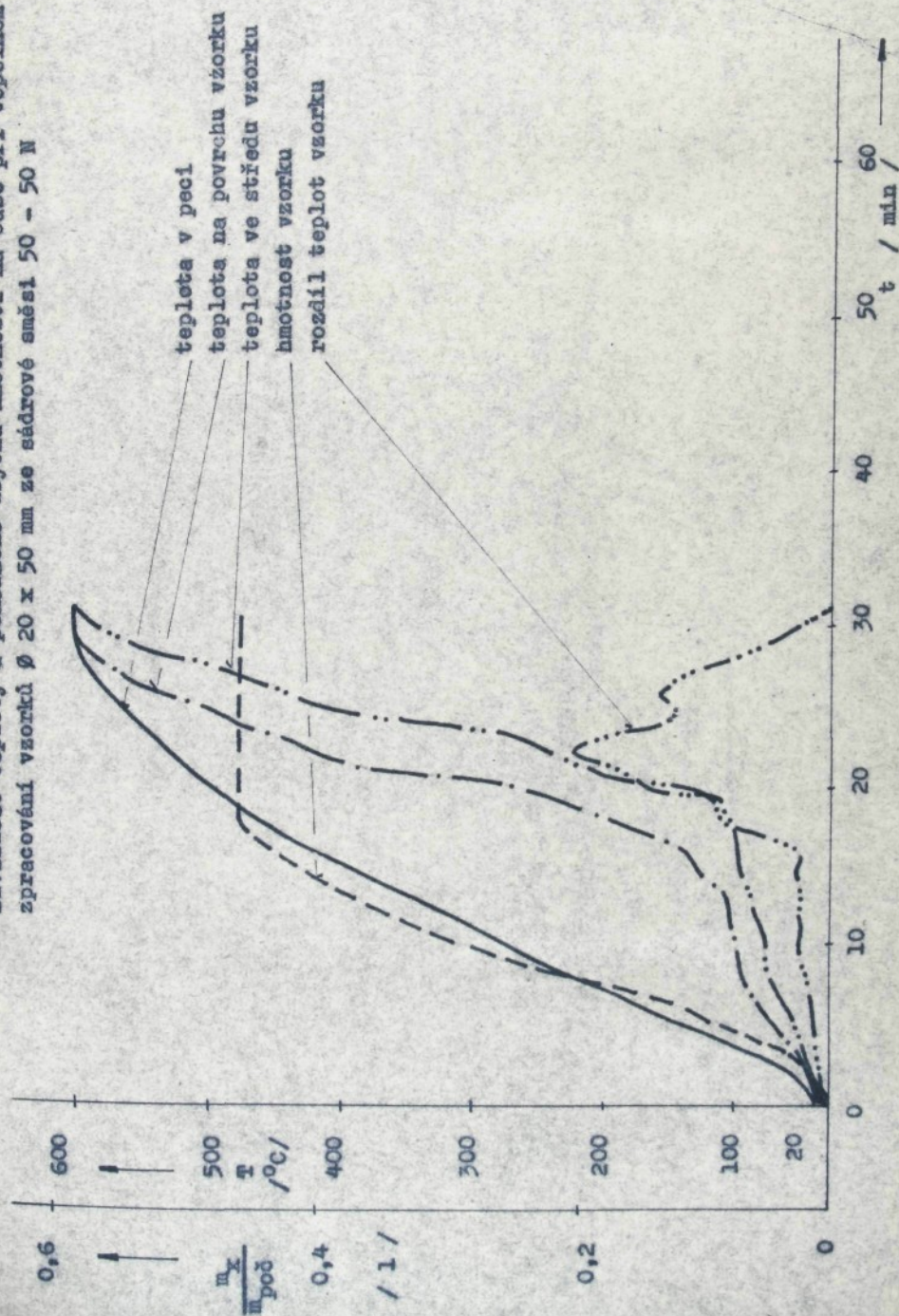


Závislost teploty a poměrného úbytku hmotnosti vzorku na čase při tepelném zpracování vzorků  $\varnothing 20 \times 50$  mm ze sádrové směsi 50 - 50

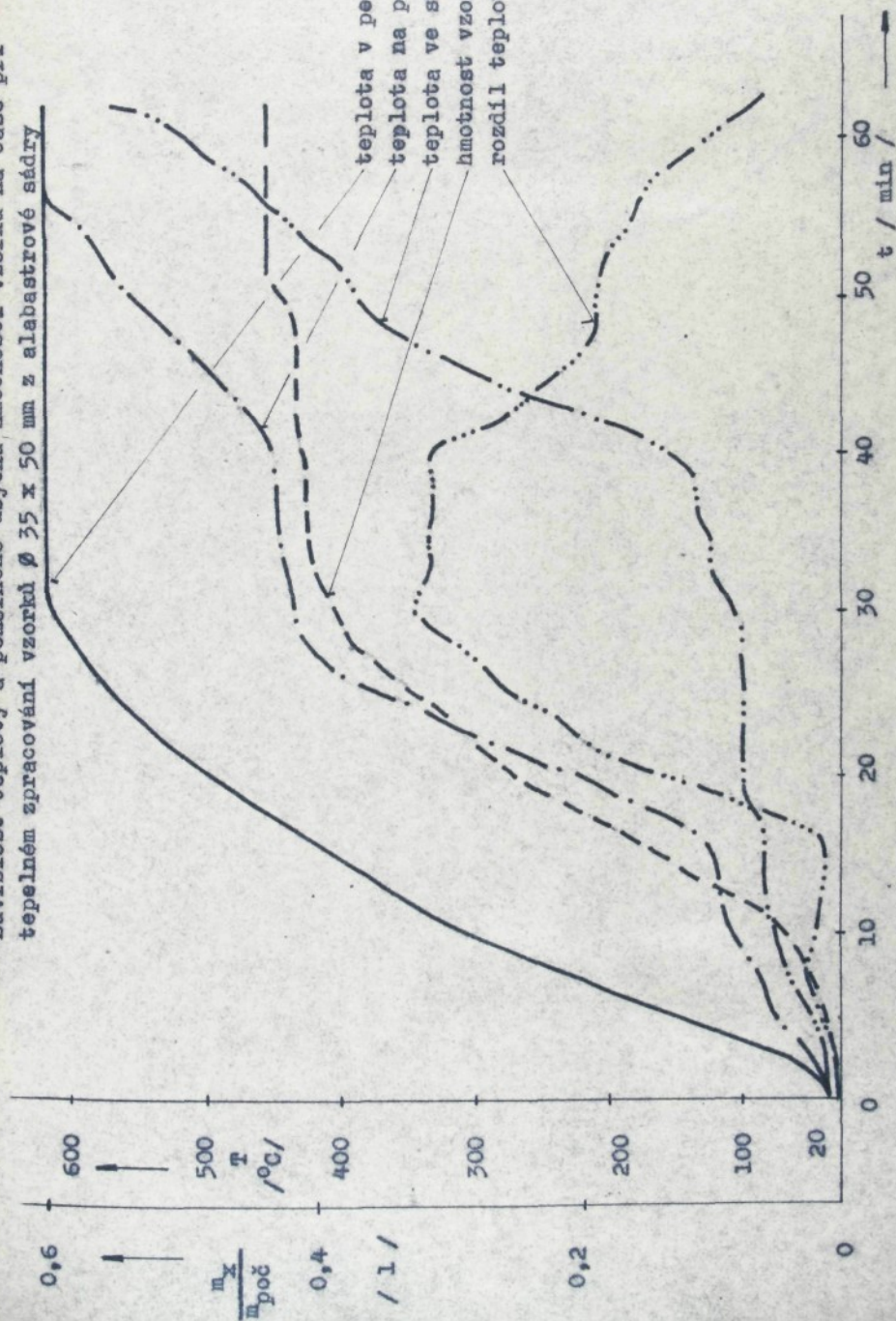




Závislost teploty a poměrného úbytku hmotnosti na čase při tepelném zpracování vzorků Ø 20 x 50 mm ze sádrové směsi 50 - 50 N

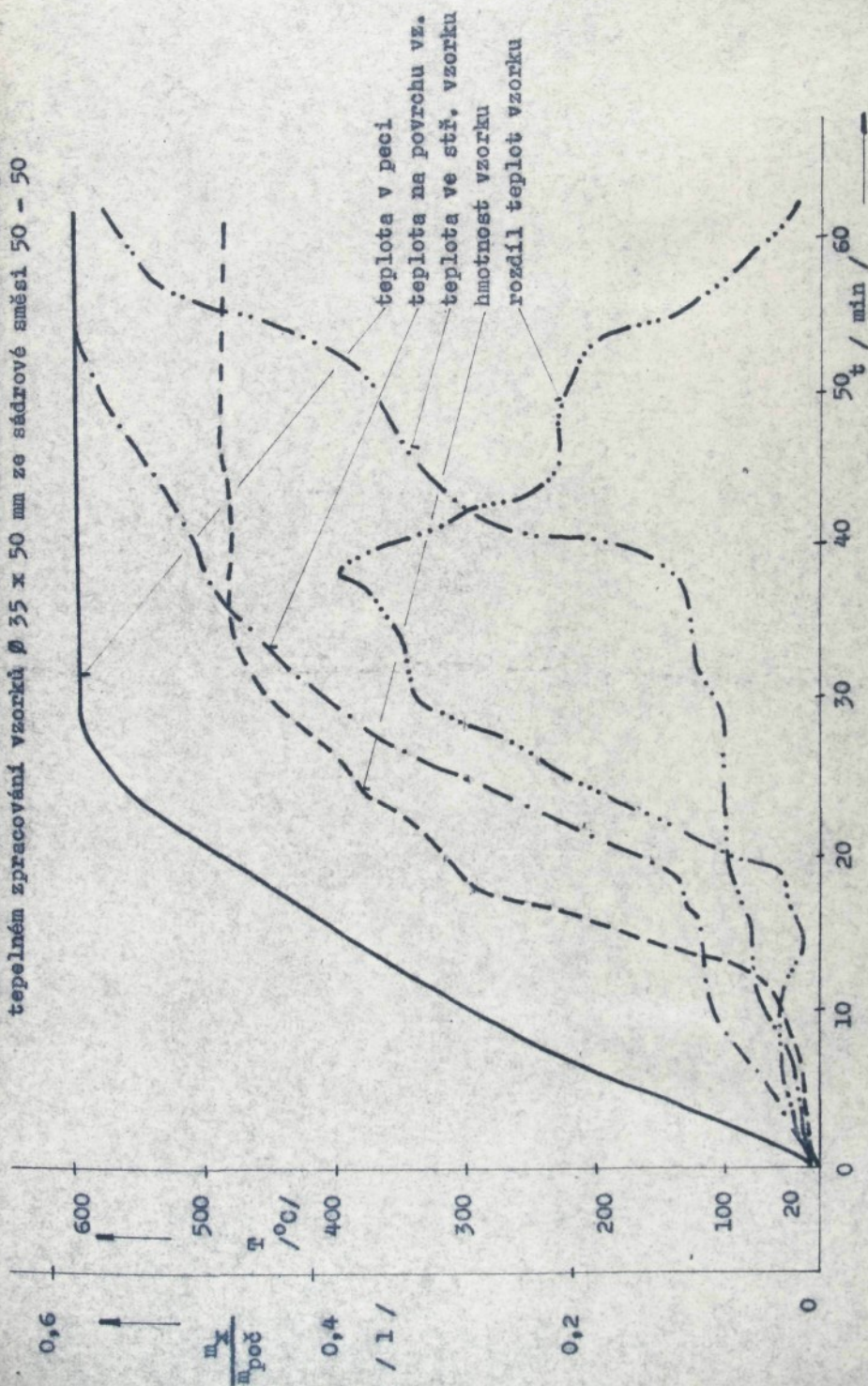


Závislost teploty a poměrného úbytku hmotnosti vzorku na čase při tepelném zpracování vzorků  $\varnothing 35 \times 50$  mm z alabastrové sádky

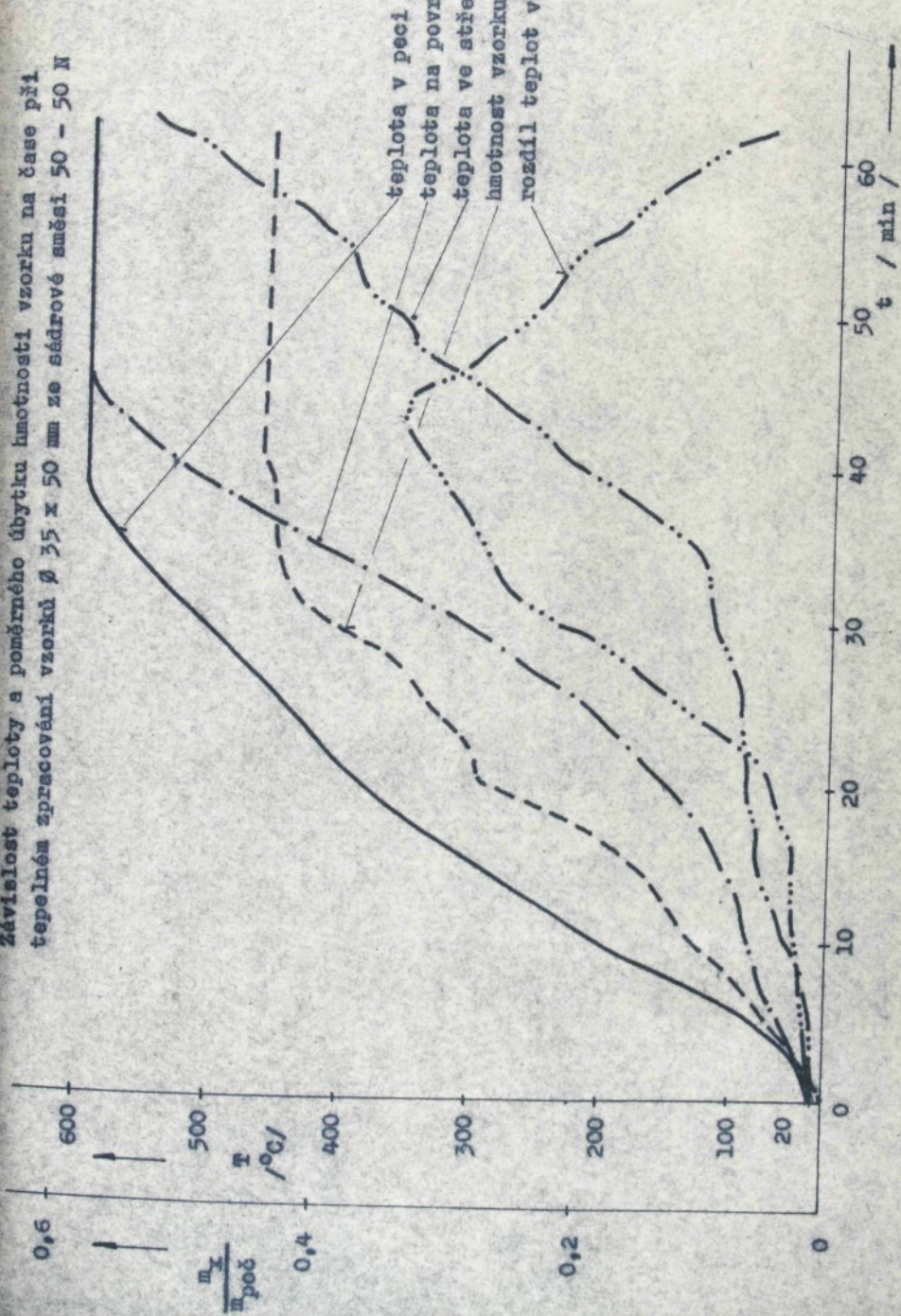




Závislost teploty a poměrného úbytku hmotnosti vzorku na čase při tepelném zpracování vzorků  $\varnothing 35 \times 50$  mm ze sádrové směsi 50 - 50

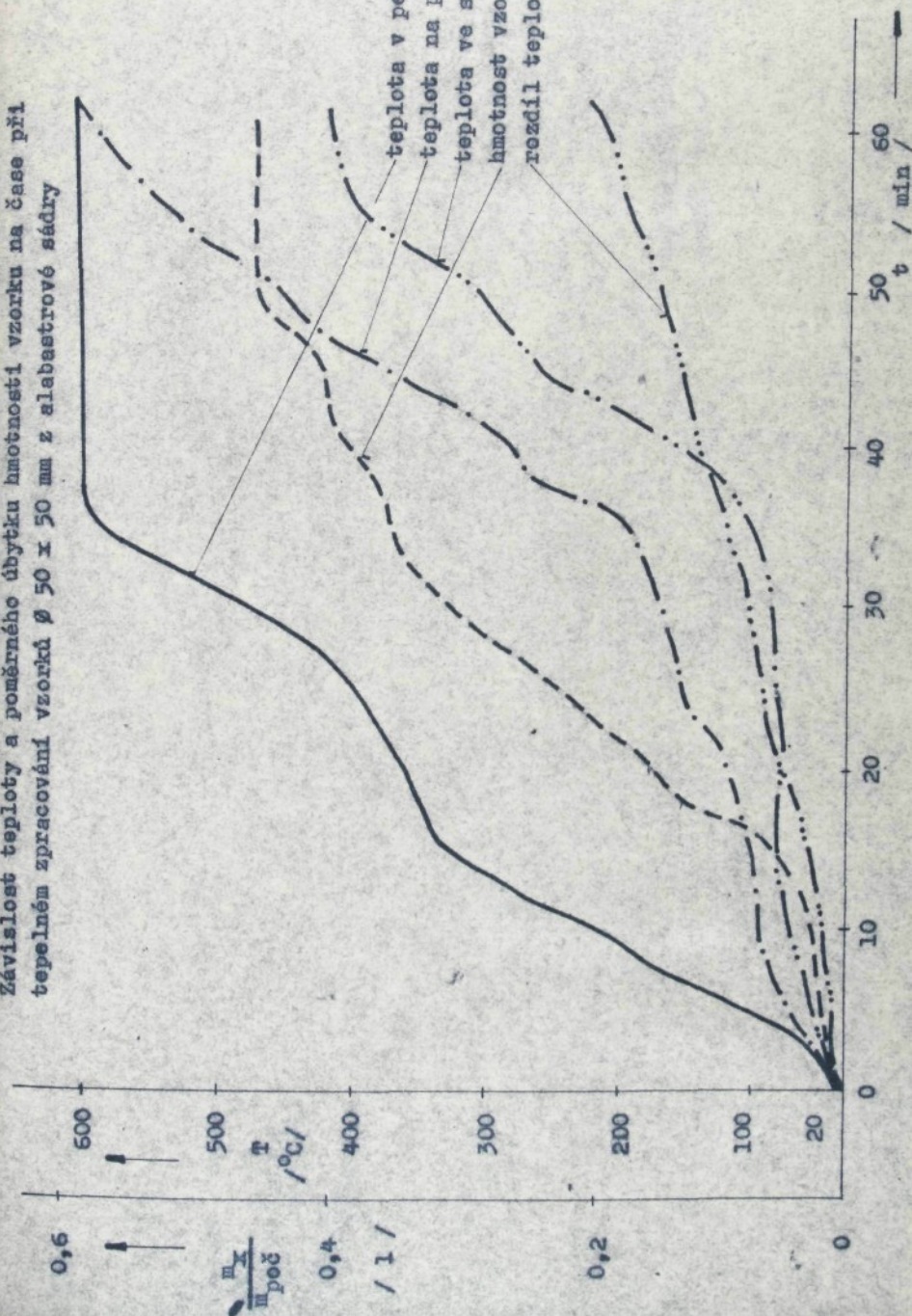


Závislost teploty a poměrného úbytku hmotnosti vzorku na čase při tepelném zpracování vzorků  $\varnothing 35 \times 50$  mm ze sádrové směsi 50 - 50 N

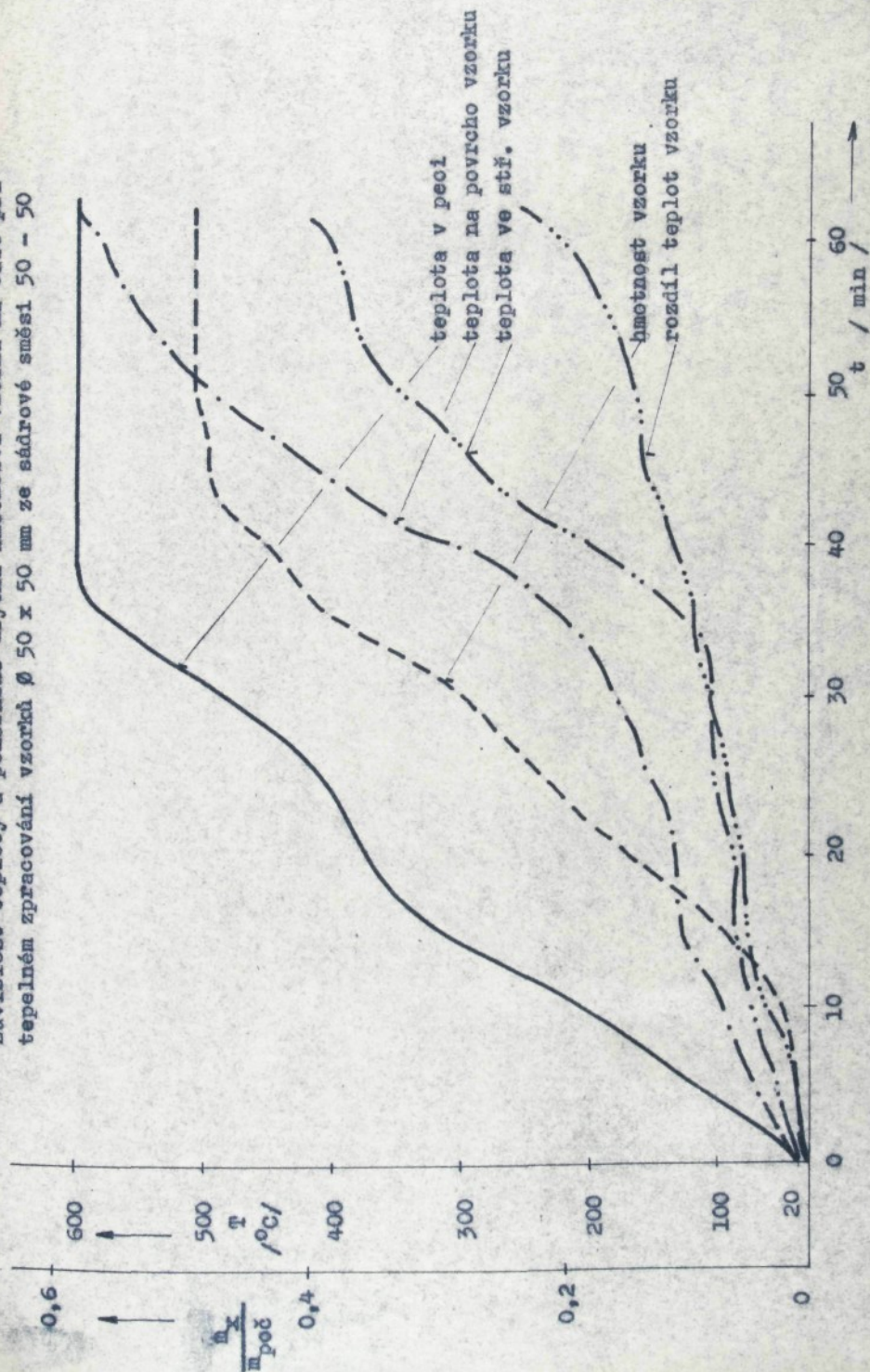




Závislost teploty a poměrného úbytku hmotnosti vzorku na čase při tepelném zpracování vzorků Ø 50 x 50 mm z alabestrové sádky

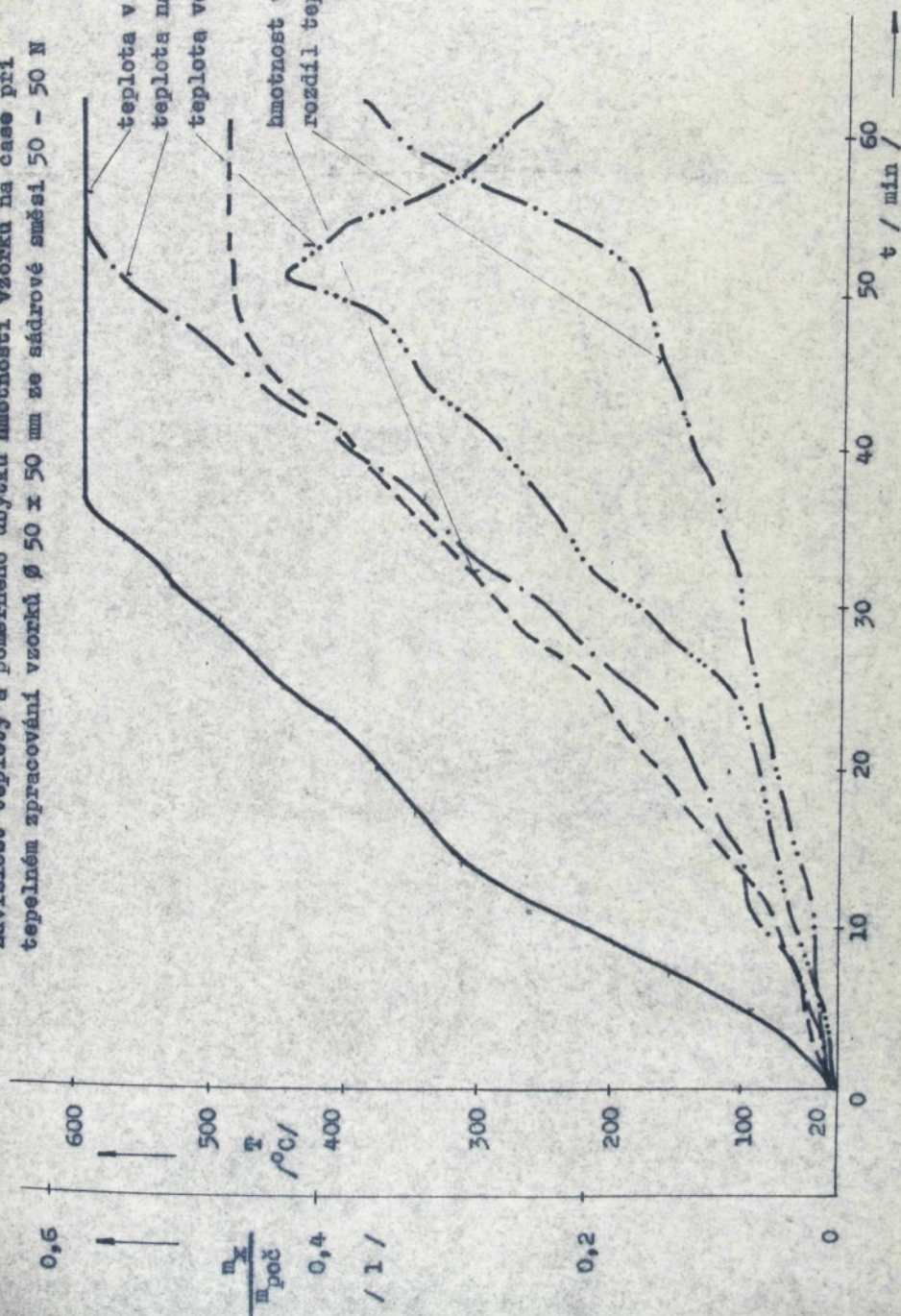


Závislost teploty a poměrného úbytku hmotnosti vzorku na čase při tepelném zpracování vzorků Ø 50 x 50 mm ze sádrové směsi 50 - 50

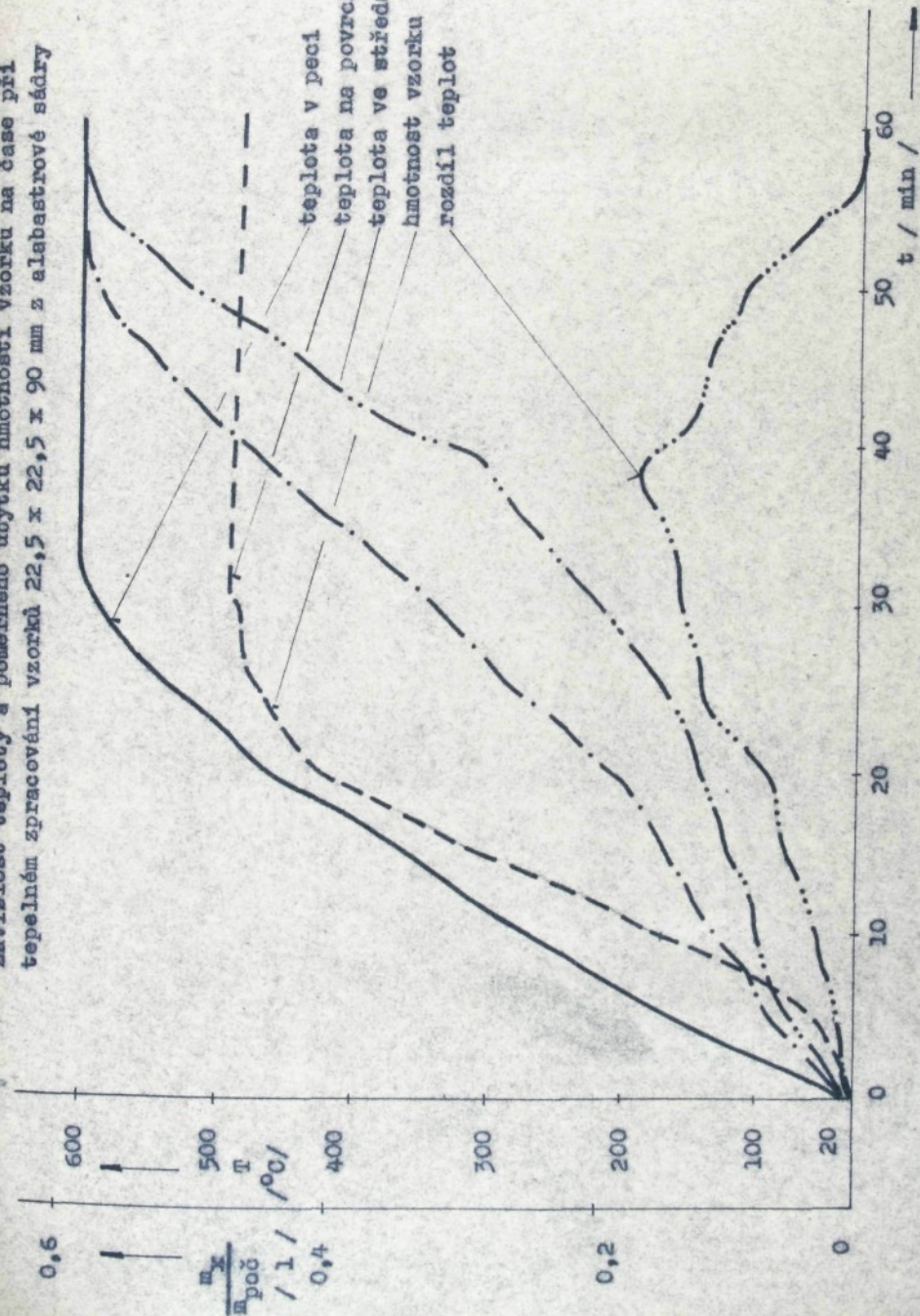




Závislost teploty a poměrného úbytku hmotnosti vzorku na čase při tepelném zpracování vzorků Ø 50 x 50 mm ze sádrové směsi 50 - 50 N

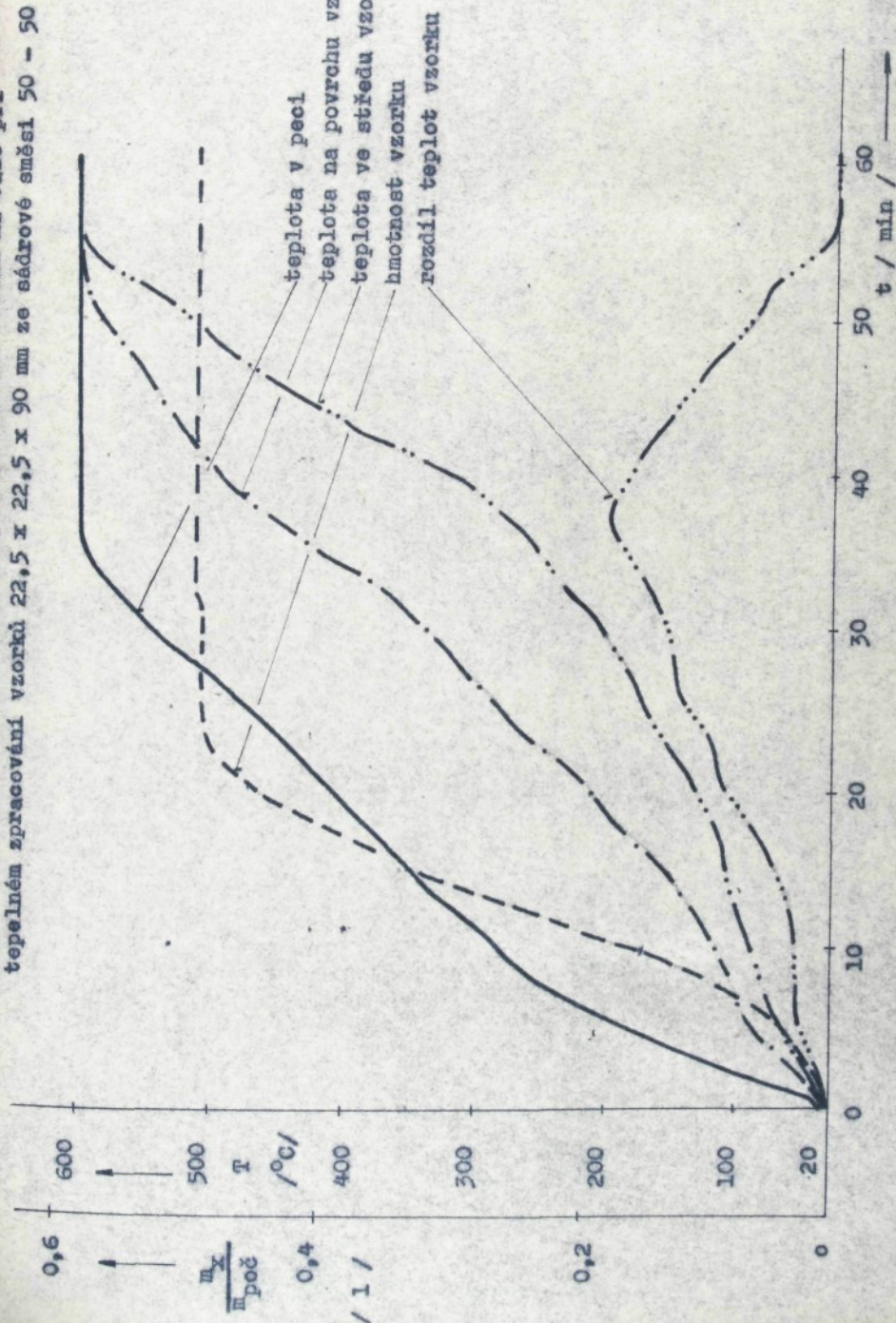


Závislost teploty a poměrného úbytku vzorku na čase při tepelném zpracování vzorků 22,5 x 22,5 x 90 mm z alabastrové sádry

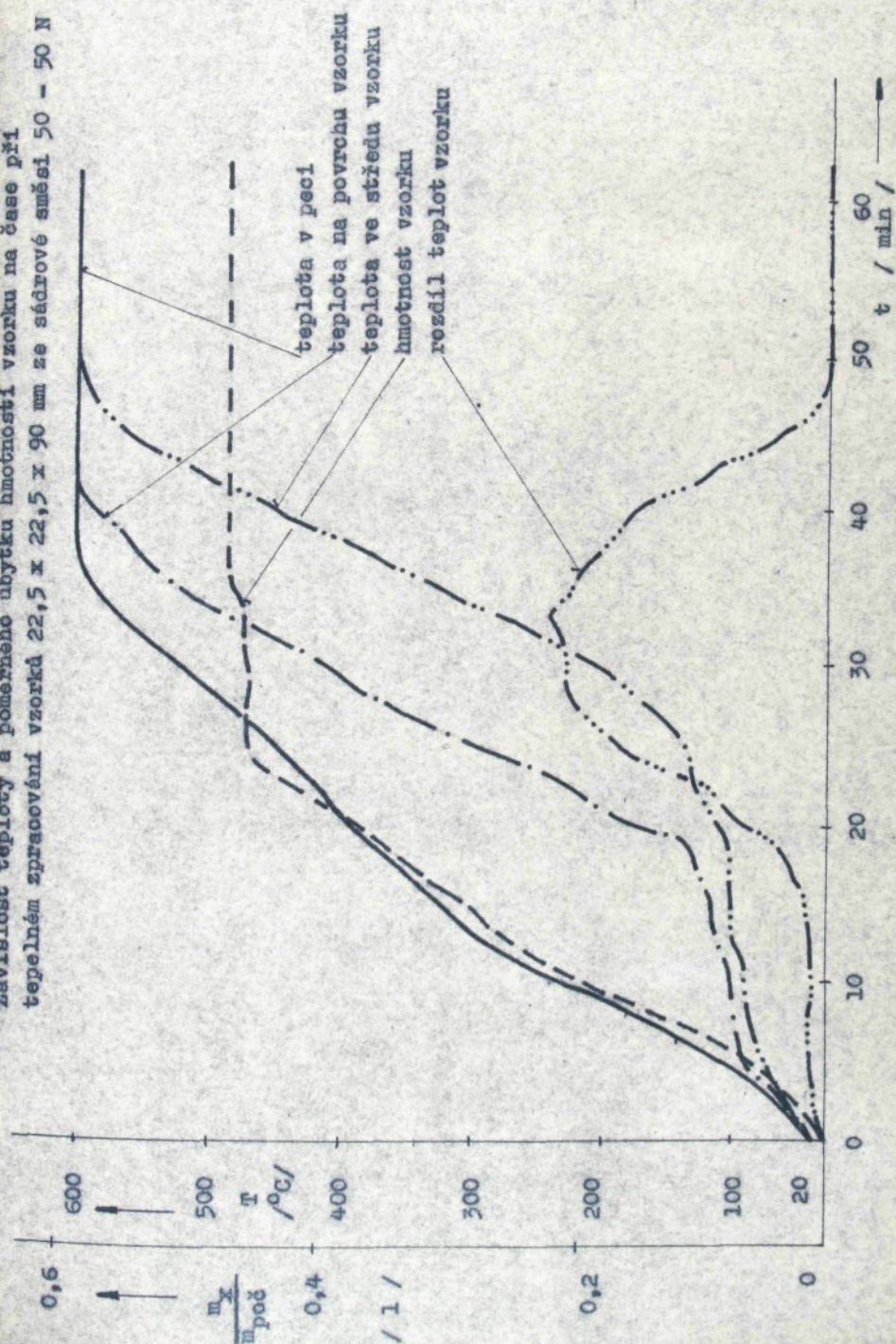




Závislost teploty a poměrného úbytku hmotnosti vzorku na čase při tepelném zpracování vzorků 22,5 x 22,5 x 90 mm ze sádrové směsi 50 - 50

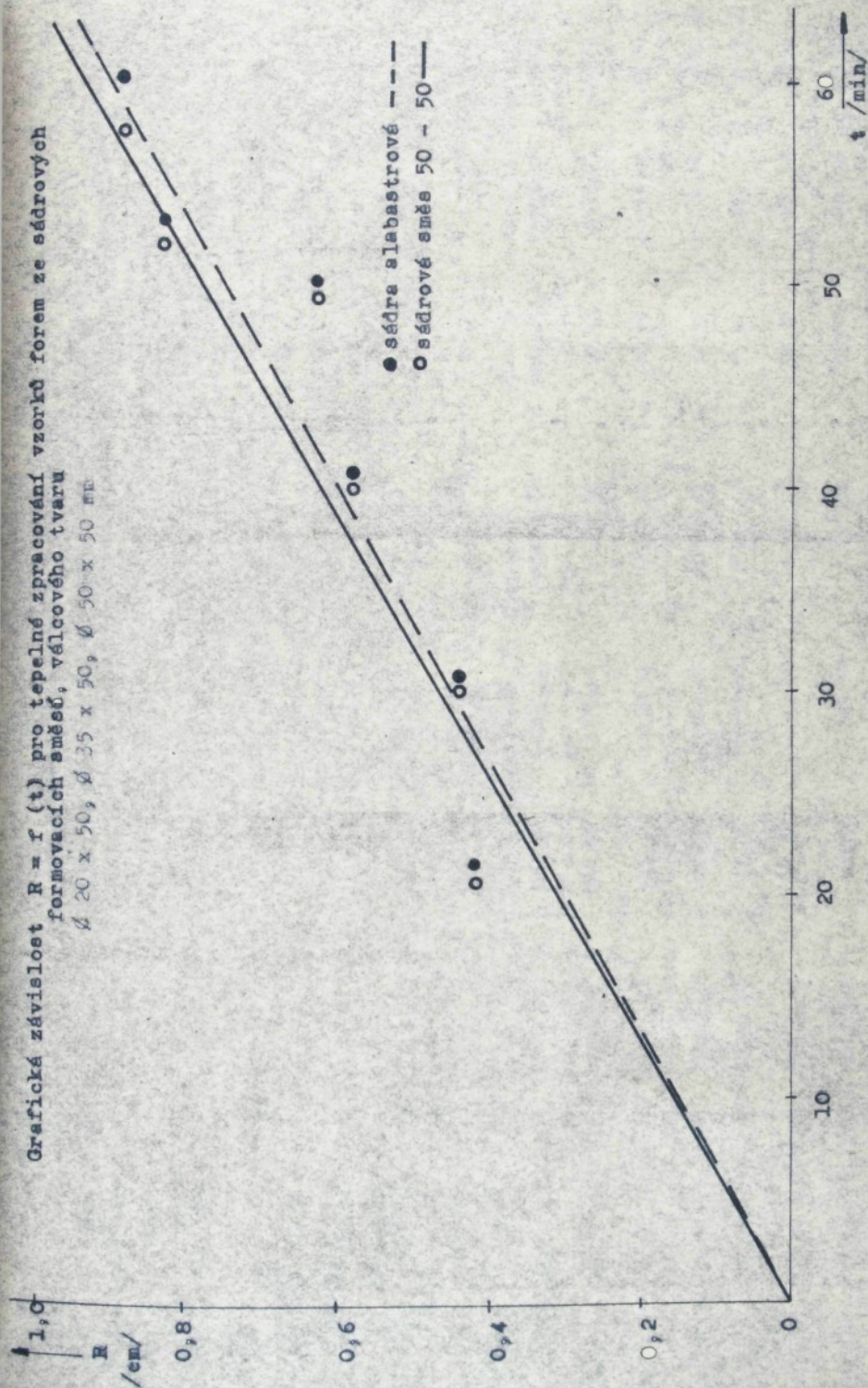


Závislost teploty a poměrného úbytku hmotnosti vzorku na čase při tepelném zpracování vzorků 22,5 x 22,5 x 90 mm ze sádrové směsi 50 - 50 N





Grafická závislost  $R = f(t)$  pro tepelné zpracování vzorků forem ze sádrových  
formovacích směsí, válcového tvaru  
 $\varnothing 20 \times 50, \varnothing 35 \times 50, \varnothing 50 \times 50$  mm



Teplotní závislost  $\Delta G^\circ_T$  pro hlavní složku alabastrové sádky -  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s})$

ROVNICE PŘEMĚN SÍRANU VÁPENATÉHO PŘI JEHO TUHNUTÍ A TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ (ZAHŘÍVÁNÍ)

|       |                                                                                                                                                                                        |                                     |                                       |                                     |                    |                    |                                     |                                     |  |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| I/a   | $\alpha \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 5 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) = \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 7/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ |                                     |                                       |                                     |                    |                    |                                     |                                     |  |
| I/b   | $\beta \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 5 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) = \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 7/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$  |                                     |                                       |                                     |                    |                    |                                     |                                     |  |
| II/a  | $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \alpha \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 3/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                  |                                     |                                       |                                     |                    |                    |                                     |                                     |  |
| II/b  | $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \beta \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 3/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                   |                                     |                                       |                                     |                    |                    |                                     |                                     |  |
| III/a | $\alpha \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \alpha \text{CaSO}_4(\text{s}) + 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                                      |                                     |                                       |                                     |                    |                    |                                     |                                     |  |
| III/b | $\beta \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \beta \text{CaSO}_4(\text{s}) + 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                                        |                                     |                                       |                                     |                    |                    |                                     |                                     |  |
| III/c | $\alpha \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \text{CaSO}_4^{\text{II}} + 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                                           |                                     |                                       |                                     |                    |                    |                                     |                                     |  |
| III/d | $\beta \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \text{CaSO}_4^{\text{II}} + 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                                            |                                     |                                       |                                     |                    |                    |                                     |                                     |  |
| Rev.  | $\Delta C_p = \Delta a + \Delta bT$                                                                                                                                                    | $\Delta H_{298}^\circ / \text{J} /$ | $\Delta S_{298}^\circ / \text{J/K} /$ | $\Delta G_{298}^\circ / \text{J} /$ | $I_H / \text{J} /$ | $I_G / \text{J} /$ | $\Delta G_{300}^\circ / \text{J} /$ | $\Delta G_{400}^\circ / \text{J} /$ |  |
| I/a   | $-247,55 + 0,103T$                                                                                                                                                                     | 136973,20                           | 364,27                                | 28419,25                            | 202619,03          | -1965,88           | 28161,87                            | -5132,17                            |  |
| I/b   | $-224,70 + 0,091T$                                                                                                                                                                     | 114880,80                           | 396,50                                | 4768,31                             | 177802,31          | -1847,23           | 23984,20                            | -9889,15                            |  |
| II/a  | $26,30 - 0,143T$                                                                                                                                                                       | 83252,50                            | 228,77                                | 15079,04                            | 81764,58           | -95,43             | 14573,91                            | -7992,74                            |  |
| II/b  | $3,40 - 0,051T$                                                                                                                                                                        | 85345,90                            | 223,54                                | 18730,98                            | 86595,71           | -215,95            | 20323,09                            | -3864,03                            |  |
| III/a | $3,66 - 0,021T$                                                                                                                                                                        | 32705,20                            | 72,28                                 | 11164,27                            | 32545,47           | -53,99             | 11020,62                            | 3739,49                             |  |
| III/b | $26,56 - 0,113T$                                                                                                                                                                       | 32956,40                            | 68,52                                 | 12535,95                            | 30057,46           | 75,71              | 12379,00                            | 5739,69                             |  |
| III/c | $3,66 - 0,021T$                                                                                                                                                                        | 21735,80                            | 70,61                                 | 695,51                              | 21576,07           | -52,31             | 551,31                              | -6453,93                            |  |
| III/d | $26,56 - 0,113T$                                                                                                                                                                       | 19642,40                            | 66,84                                 | -275,92                             | 16743,45           | 86,93              | -457,39                             | -3104,91                            |  |



Teplotní závislost  $\Delta G_T^\circ$  pro hlavní složku alabastrové sádky -  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s})$

| Rev.  | ROVNICE PŘEMĚN SÍRANU VÁPENATÉHO PŘI JEHO TUHNUTÍ A TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ (ZAHŘÍVÁNÍ)                                                                                               |          |        |          |          |          |          |           |  |  |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|-----------|--|--|
| I/a   | $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 5 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) = \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 7/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$   |          |        |          |          |          |          |           |  |  |
| I/b   | $3 \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 5 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) = \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 7/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ |          |        |          |          |          |          |           |  |  |
| II/a  | $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 3/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                    |          |        |          |          |          |          |           |  |  |
| II/b  | $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = 3 \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 3/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                  |          |        |          |          |          |          |           |  |  |
| III/a | $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                                                     |          |        |          |          |          |          |           |  |  |
| III/b | $3 \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = 3 \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                                                 |          |        |          |          |          |          |           |  |  |
| III/c | $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \text{CaSO}_4^{\text{II}} + 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                                             |          |        |          |          |          |          |           |  |  |
| II/a  | 26,30 - 0,143T                                                                                                                                                                    | 83252,50 | 228,77 | 15079,04 | 81764,58 | - 95,43  | 14573,91 | - 7992,74 |  |  |
| II/b  | 3,40 - 0,051T                                                                                                                                                                     | 85345,90 | 223,54 | 18730,98 | 86595,71 | - 215,95 | 20323,09 | - 3864,03 |  |  |
| III/a | 3,66 - 0,021T                                                                                                                                                                     | 32705,20 | 72,28  | 11164,27 | 32545,47 | - 53,99  | 11020,62 | 9739,49   |  |  |
| III/b | 26,56 - 0,113T                                                                                                                                                                    | 32956,40 | 68,52  | 12535,95 | 30057,46 | 75,71    | 12379,00 | 5739,69   |  |  |
| III/c | 3,66 - 0,021T                                                                                                                                                                     | 21735,80 | 70,61  | 695,51   | 21576,07 | - 52,31  | 551,31   | - 6453,93 |  |  |
| III/d | 26,56 - 0,113T                                                                                                                                                                    | 19642,40 | 66,84  | - 275,92 | 16743,45 | 86,93    | - 457,39 | - 3104,91 |  |  |

Teplotní závislost  $\Delta G_m^\circ$  pro hlavní složku stavební sádry -  $\text{CaSO}_4(\text{s})$

Priloha C.

| Rev.  | ROVNICE PŘEMĚN SÍRANU VÁPENATÉHO PŘI JEGO TUHNUTÍ A TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ (ZAHŘÍVÁNÍ)                                                                          |                                   |                                     |                                   |                  |                  |                                   |                                   |  |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| I/A   | $\text{CaSO}_4^{\text{II}}(\text{s}) + 5 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) = \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 3 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ |                                   |                                     |                                   |                  |                  |                                   |                                   |  |
| II/A  | $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 3/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$               |                                   |                                     |                                   |                  |                  |                                   |                                   |  |
| II/B  | $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 3/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$               |                                   |                                     |                                   |                  |                  |                                   |                                   |  |
| III/A | $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \text{CaSO}_4(\text{s}) + 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                          |                                   |                                     |                                   |                  |                  |                                   |                                   |  |
| III/B | $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \text{CaSO}_4(\text{s}) + 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                          |                                   |                                     |                                   |                  |                  |                                   |                                   |  |
| III/C | $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \text{CaSO}_4^{\text{II}} + 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                        |                                   |                                     |                                   |                  |                  |                                   |                                   |  |
| III/D | $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \text{CaSO}_4^{\text{II}} + 1/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$                                        |                                   |                                     |                                   |                  |                  |                                   |                                   |  |
| Rev.  | $\Delta G_p^\circ = \Delta a + \Delta bT$                                                                                                                    | $\Delta H_{298}^\circ / \text{J}$ | $\Delta S_{298}^\circ / \text{J/K}$ | $\Delta G_{298}^\circ / \text{J}$ | $I_H / \text{J}$ | $I_G / \text{J}$ | $\Delta G_{300}^\circ / \text{J}$ | $\Delta G_{400}^\circ / \text{J}$ |  |
| I/A   | - 251,27 + 0,20T                                                                                                                                             | 113237,40                         | 302,66                              | 25044,72                          | 181057,86        | -1924,65         | 24440,25                          | - 2930,10                         |  |
| II/A  | 26,30 - 0,113T                                                                                                                                               | 83252,50                          | 228,77                              | 15079,04                          | 81764,58         | - 95,43          | 14573,91                          | - 7992,74                         |  |
| II/B  | 3,40 - 0,051T                                                                                                                                                | 85345,90                          | 223,54                              | 18730,98                          | 86595,71         | - 215,95         | 20323,09                          | - 3864,03                         |  |
| III/A | 3,66 - 0,021T                                                                                                                                                | 32705,20                          | 72,28                               | 11164,27                          | 32545,47         | - 53,99          | 11020,62                          | 3733,49                           |  |
| III/B | 25,56 - 0,113T                                                                                                                                               | 32956,40                          | 69,52                               | 12535,95                          | 30057,46         | 75,71            | 12379,00                          | 5739,69                           |  |
| III/C | 3,66 - 0,021T                                                                                                                                                | 21735,80                          | 70,61                               | 695,51                            | 21576,07         | - 52,31          | 551,31                            | - 6453,93                         |  |
| III/D | 26,56 - 0,113T                                                                                                                                               | 19642,40                          | 66,84                               | - 275,92                          | 16743,45         | 86,93            | - 457,39                          | - 3104,91                         |  |



Teplotní závislost  $\Delta G_T^\circ$  pro hlavní složku sádkyVypočítané hodnoty  $\Delta G_T^\circ$  pro různé teploty složky alabastrové sádky  
 $\alpha\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ 

| Teplota<br>/K/<br>Označ. křiv. | $\Delta G_T^\circ$ /kJ/ |       |        |        |        |        |
|--------------------------------|-------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
|                                | 300                     | 350   | 400    | 450    | 500    | 550    |
| I/a                            | 28,16                   | 7,15  | - 5,13 | -24,82 | -39,34 | -53,07 |
| II/a                           | 44,57                   | 6,41  | - 7,99 | -14,88 | -25,22 | -35,33 |
| III/a                          | 11,02                   | 7,42  | 3,73   | - 0,29 | - 3,22 | - 6,69 |
| III/o                          | 0,55                    | -2,96 | - 6,45 | - 9,91 | -13,35 | -16,74 |

Vypočítané hodnoty  $\Delta G_T^\circ$  pro různé teploty složky alabastrové sádky  
 $\beta\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ 

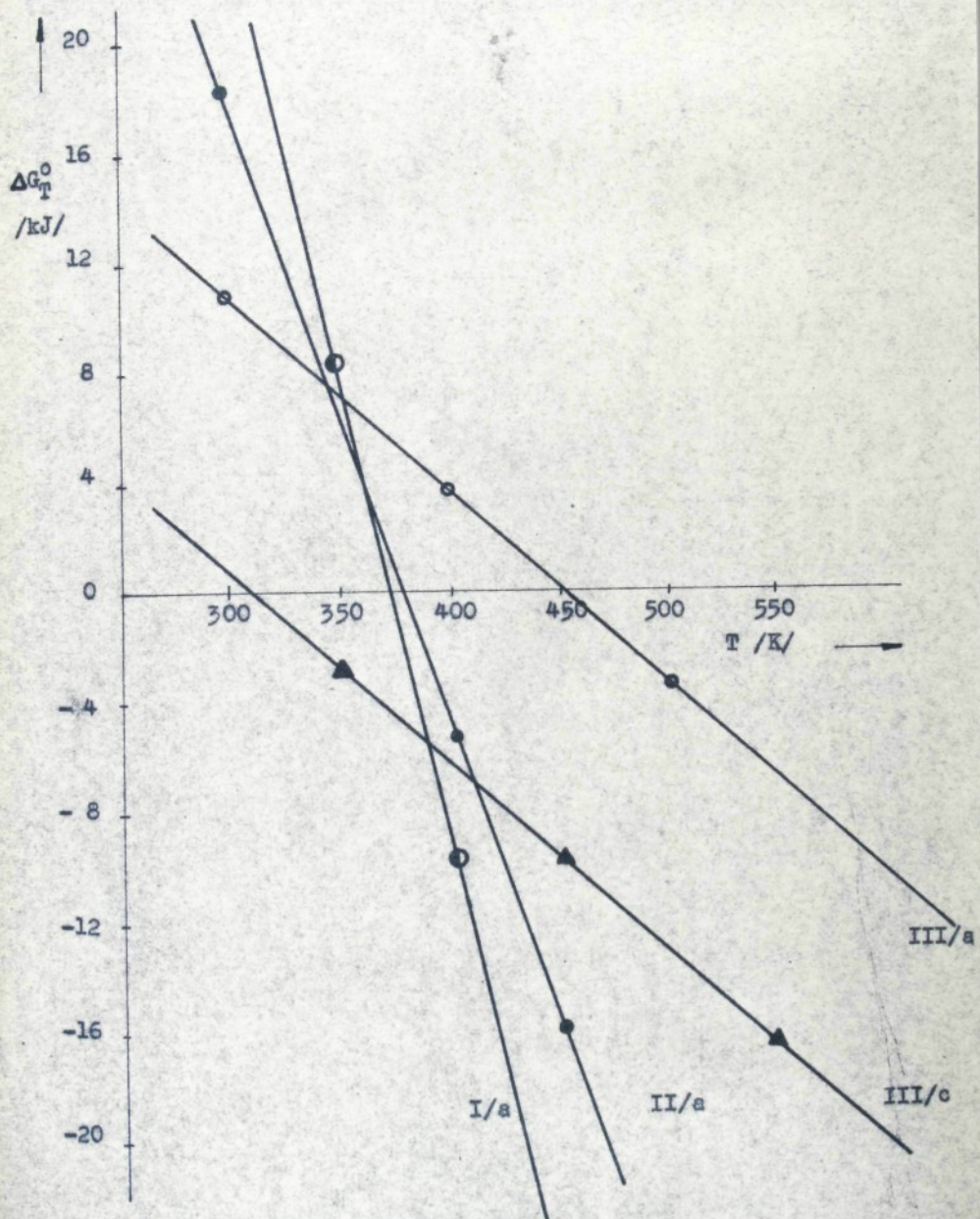
| Teplota<br>/K/<br>Označ. křiv. | $\Delta G_T^\circ$ /kJ/ |       |        |        |        |        |
|--------------------------------|-------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
|                                | 300                     | 350   | 400    | 450    | 500    | 550    |
| I/b                            | 23,98                   | 6,39  | - 9,88 | -24,90 | -38,97 | -52,12 |
| II/b                           | 20,32                   | 7,16  | - 3,86 | -14,77 | -25,58 | -36,27 |
| III/b                          | 12,37                   | 9,01  | 5,73   | 2,54   | - 0,51 | - 3,40 |
| III/d                          | -0,45                   | -1,89 | - 3,10 | -10,29 | -12,98 | -15,79 |

Vypočítané hodnoty  $\Delta G_T^\circ$  pro různé teploty složky stavební sádky  
 $\text{CaSO}_4^{\text{II}}$ , za podmínek, kdy se častěji objevuje  $\alpha$  - forma síranu vápenatého

| Teplota<br>/K/<br>Označ. křiv. | $\Delta G_T^\circ$ /kJ/ |        |       |         |        |        |
|--------------------------------|-------------------------|--------|-------|---------|--------|--------|
|                                | 300                     | 350    | 400   | 450     | 500    | 550    |
| I/A                            | 24,44                   | 10,11  | -2,93 | - 14,91 | -25,99 | -36,33 |
| II/A                           | 14,57                   | 6,41   | -7,99 | - 14,88 | -25,22 | -35,33 |
| III/A                          | 11,02                   | 7,42   | 3,73  | 0,29    | - 3,22 | - 6,69 |
| III/C                          | 0,55                    | - 2,96 | -6,45 | - 9,91  | -13,35 | -16,74 |

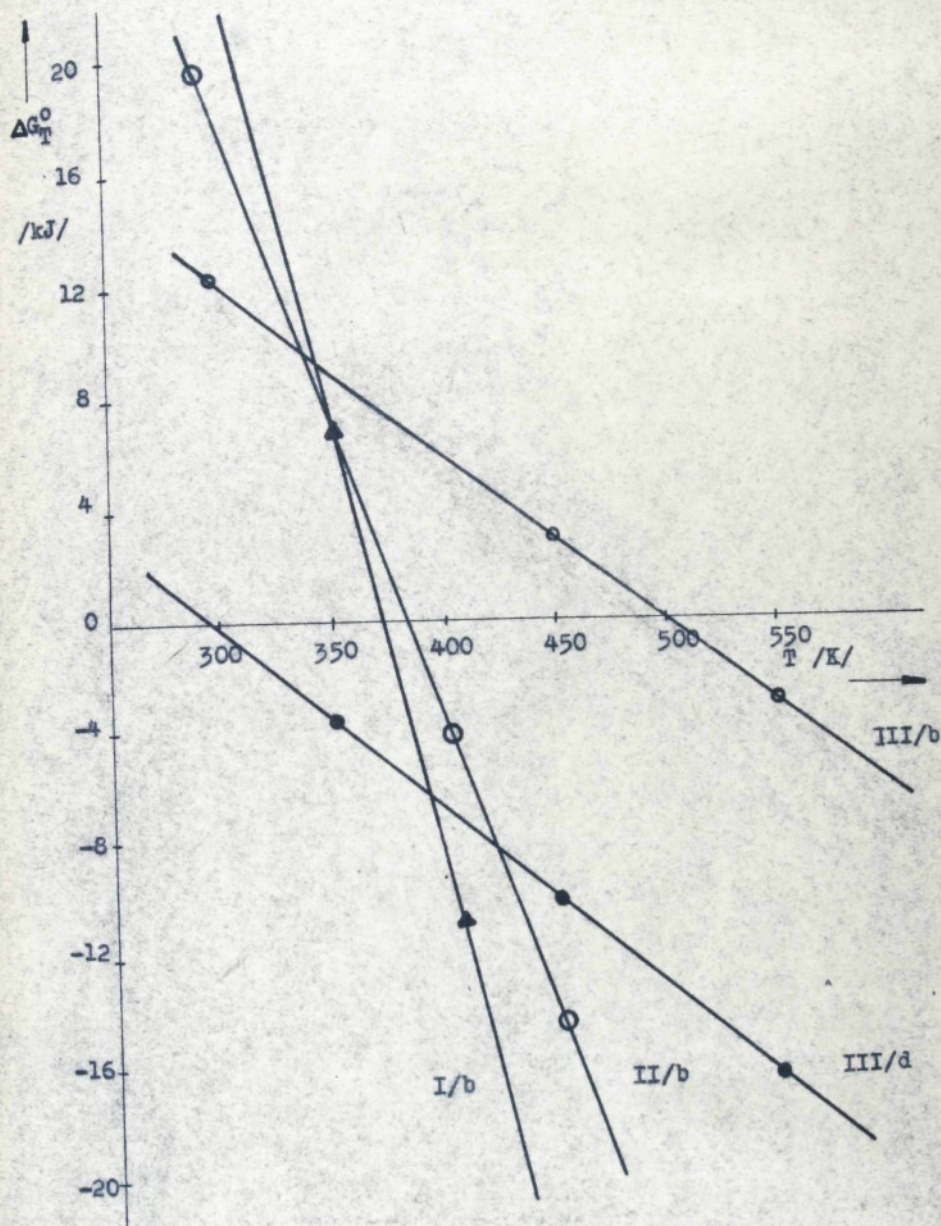
Vypočítané hodnoty  $\Delta G_T^\circ$  pro různé teploty složky stavební sádky  
 $\text{CaSO}_4^{\text{II}}$ , za podmínek, kdy se častěji objevuje  $\beta$  - forma síranu vápenatého

| Teplota<br>/K/<br>Označ. křiv. | $\Delta G_T^\circ$ /kJ/ |       |       |         |        |        |
|--------------------------------|-------------------------|-------|-------|---------|--------|--------|
|                                | 300                     | 350   | 400   | 450     | 500    | 550    |
| I/A                            | 24,44                   | 10,11 | -2,93 | - 14,91 | -25,99 | -36,33 |
| II/B                           | 20,32                   | 7,16  | -3,86 | - 14,77 | -25,58 | -36,27 |
| III/B                          | 12,37                   | 9,01  | 5,73  | 2,54    | - 0,51 | - 3,40 |
| III/D                          | -0,45                   | -1,89 | -3,10 | - 10,29 | -12,98 | -15,79 |

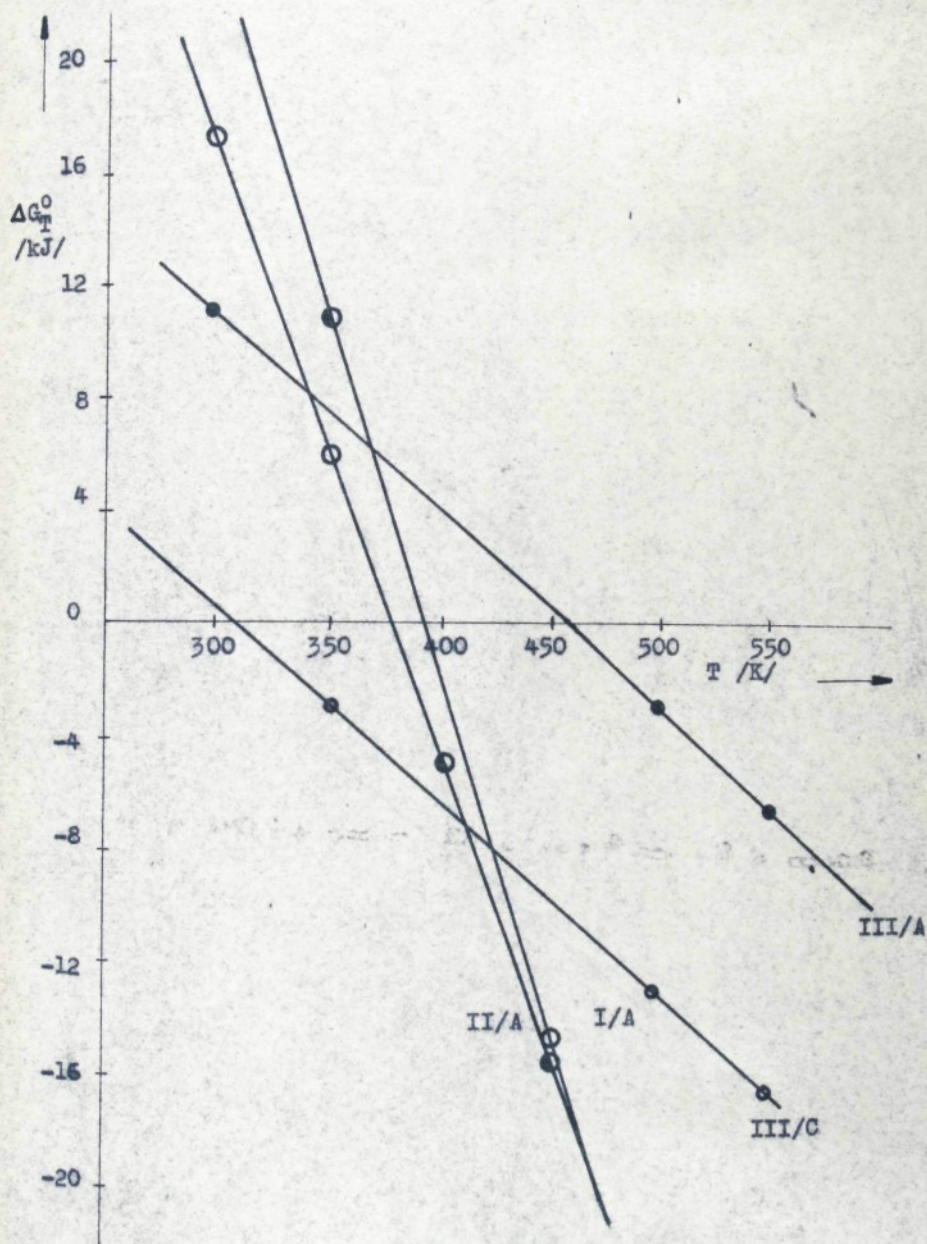


Teplotní závislost  $\Delta G_T^0$  pro hlavní složku  
alabastrové sádky -  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}(\text{s})$



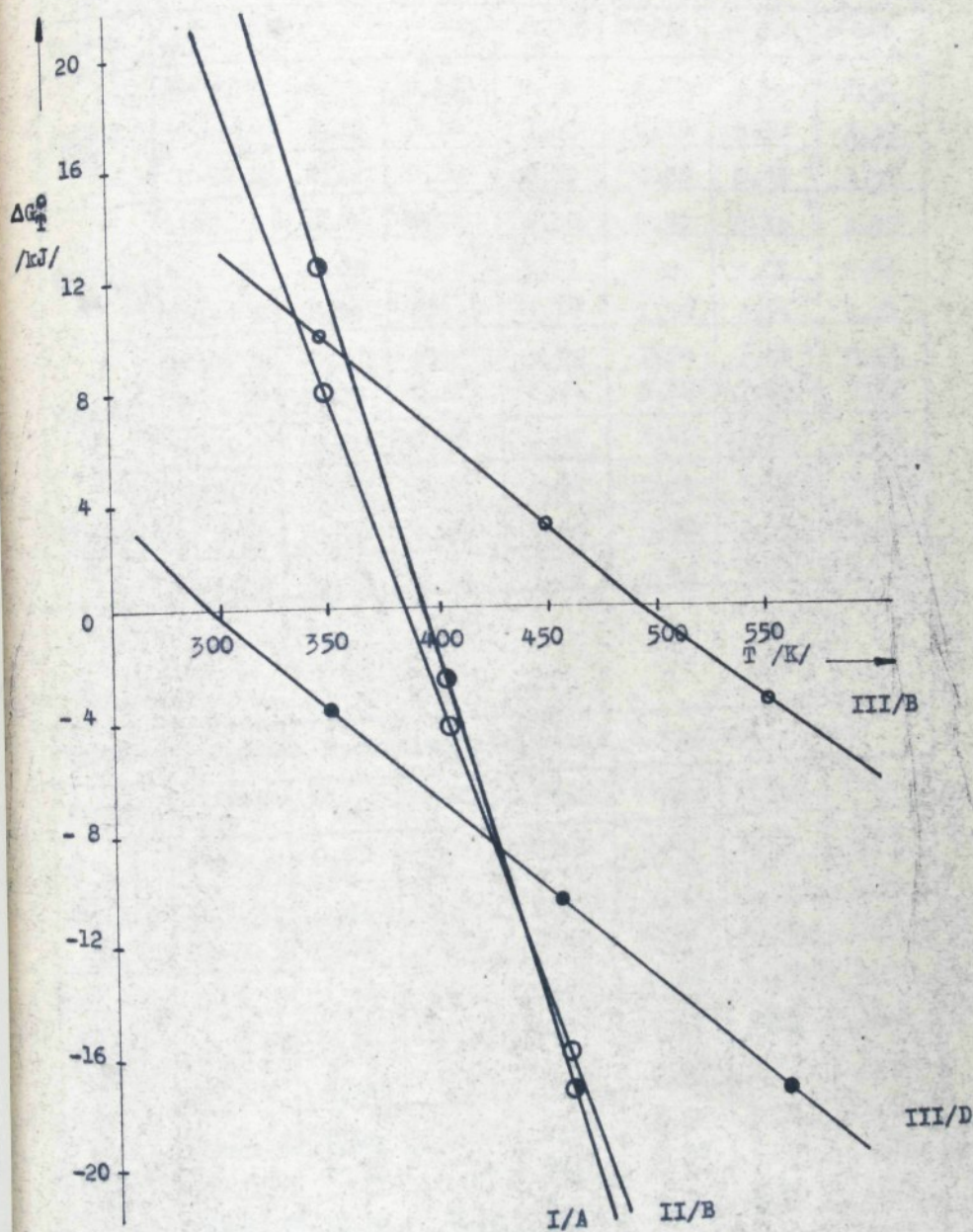


Teplotní závislost  $\Delta G_T^0$  pro hlavní složku  
alabastrové sádky -  $3\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}(\text{s})$



Teplotní závislost  $\Delta G_T^0$  pro hlavní složku  
stavební sádky -  $\text{CaSO}_4$  (s)





Teplotní závislost  $\Delta G_T^0$  pro hlavní složku stavební  
sádky -  $\text{CaSO}_4^{\text{II}}$  (s)

| Vypočítané hodnoty součinitele $\kappa$ vztah. k teplotě stř. vzorku |              |               |               |                |                |                |                |
|----------------------------------------------------------------------|--------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Vzorek                                                               | Sádrová směs | $\kappa_{30}$ | $\kappa_{50}$ | $\kappa_{100}$ | $\kappa_{200}$ | $\kappa_{300}$ | $\kappa_{400}$ |
| Ø20x50 mm                                                            | ALAB. S      | 0,12          | 0,19          | 2,14           | 2,47           | 2,55           | 2,61           |
|                                                                      | 50 - 50      | 0,05          | 0,16          | 2,00           | 2,19           | 2,30           | 2,39           |
|                                                                      | 50-50 N      | 0,12          | 0,30          | 0,59           | 0,60           | 0,63           | 0,71           |
| Ø35x50 mm                                                            | ALAB. S      | 0,06          | 0,21          | 2,56           | 3,03           | 3,12           | 3,47           |
|                                                                      | 50 - 50      | 0,08          | 0,10          | 3,31           | 3,90           | 4,01           | 4,43           |
|                                                                      | 50-50 N      | 0,24          | 0,52          | 1,30           | 1,70           | 1,76           | 1,81           |
| Ø50x50 mm                                                            | ALAB. S      | 0,21          | 0,70          | 1,15           | 3,74           | 7,89           | 8,45           |
|                                                                      | 50 - 50      | 0,11          | 0,19          | 2,91           | 3,69           | 7,17           | 7,72           |
|                                                                      | 50-50 N      | 0,29          | 0,38          | 0,87           | 3,42           | 4,90           | 5,00           |
| 22,5x22,5<br>x 90 mm                                                 | ALAB. S      | 0,11          | 0,26          | 2,98           | 6,44           | 6,89           | 7,40           |
|                                                                      | 50 - 50      | 0,10          | 0,17          | 3,06           | 6,40           | 6,55           | 7,15           |
|                                                                      | 50-50 N      | 0,12          | 0,32          | 1,81           | 2,36           | 2,64           | 3,03           |

| Vypočítané hodnoty součinitele $\kappa$ vztah. k teplotě v peci |              |               |               |                |                |                |                |
|-----------------------------------------------------------------|--------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Vzorek                                                          | Sádrová směs | $\kappa_{30}$ | $\kappa_{50}$ | $\kappa_{100}$ | $\kappa_{200}$ | $\kappa_{300}$ | $\kappa_{400}$ |
| Ø20x50 mm                                                       | ALAB. S      | 0,05          | 0,11          | 0,42           | 0,69           | 1,19           | 1,22           |
|                                                                 | 50 - 50      | 0,03          | 0,09          | 0,35           | 0,50           | 1,02           | 1,35           |
|                                                                 | 50-50 N      | 0,06          | 0,12          | 0,22           | 0,78           | 0,81           | 0,87           |
| Ø35x50 mm                                                       | ALAB. S      | 0,06          | 0,11          | 0,23           | 0,58           | 1,09           | 1,42           |
|                                                                 | 50 - 50      | 0,04          | 0,16          | 0,27           | 0,67           | 0,85           | 1,65           |
|                                                                 | 50-50 N      | 0,04          | 0,20          | 0,24           | 0,59           | 0,62           | 1,02           |
| Ø50x50 mm                                                       | ALAB. S      | 0,06          | 0,17          | 0,28           | 0,34           | 0,75           | 2,30           |
|                                                                 | 50 - 50      | 0,08          | 0,14          | 0,21           | 0,30           | 0,67           | 1,96           |
|                                                                 | 50-50 N      | 0,06          | 0,19          | 0,21           | 0,34           | 0,39           | 1,21           |
| 22,5x22,5<br>x 90 mm                                            | ALAB. S      | 0,02          | 0,11          | 0,19           | 0,36           | 2,18           | 3,24           |
|                                                                 | 50 - 50      | 0,07          | 0,13          | 0,21           | 0,48           | 1,96           | 3,26           |
|                                                                 | 50-50 N      | 0,10          | 0,12          | 0,20           | 0,36           | 1,56           | 2,05           |



Tabulka rozměrů sledovaných vzorků při sušení

| Označ.<br>vzorku | Rozměr vzorku<br>/ mm / | Objem<br>vzorku V<br>/cm <sup>3</sup> / | Povrch<br>vzorku S<br>/cm <sup>2</sup> / | Poměr<br>$\frac{S}{V}$<br>/cm <sup>-1</sup> / |
|------------------|-------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| A1               | 50 x 5,5                | 10,90                                   | 48,00                                    | 4,40                                          |
| A2               | 50 x 10,1               | 19,90                                   | 55,30                                    | 2,48                                          |
| A3               | 50 x 16,3               | 32,20                                   | 65,00                                    | 2,02                                          |
| A4               | 50 x 18,8               | 37,10                                   | 69,00                                    | 1,86                                          |
| A5               | 50 x 43,4               | 85,60                                   | 107,70                                   | 1,26                                          |
| A6               | 50 x 110,4              | 217,00                                  | 212,90                                   | 0,98                                          |

| Označení<br>vzorku | Sušení při teplotě 20°C |                    |                                       | Sušení při teplotě<br>200°C |                    |                                       |
|--------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------------------------|
|                    | $m_{poč}$<br>/ g /      | $m_{kon}$<br>/ g / | $\rho_{kon}$<br>/kg.m <sup>-3</sup> / | $m_{poč}$<br>/ g /          | $m_{kon}$<br>/ g / | $\rho_{kon}$<br>/kg.m <sup>-3</sup> / |
| A1                 | 17                      | 9,40               | 860                                   | 16,50                       | 9,00               | 830                                   |
| A2                 | 31                      | 17,00              | 850                                   | 33,00                       | 18,50              | 830                                   |
| A3                 | 50                      | 27,50              | 850                                   | 65,00                       | 36,00              | 840                                   |
| A4                 | 57                      | 31,40              | 850                                   | 66,00                       | 36,00              | 840                                   |
| A5                 | 129                     | 71,00              | 830                                   | 118,00                      | 65,00              | 840                                   |
| A6                 | 331                     | 194,00             | 840                                   | 330,50                      | 180,00             | 830                                   |

Sušení při teplotě v peci 20°C

| Označení<br>vzorků | A1           |                  | A2           |                  | A3           |                  | A4           |                  | A5           |                  | A6           |                  |
|--------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|
|                    | $m_y$<br>/g/ | $m_y$ vyp<br>/g/ | $m_y$<br>/g/ | $m_y$ vyp<br>/g/ | $m_y$<br>/g/ | $m_y$ vyp<br>/g/ | $m_y$<br>/g/ | $m_y$ vyp<br>/g/ | $m_y$<br>/g/ | $m_y$ vyp<br>/g/ | $m_y$<br>/g/ | $m_y$ vyp<br>/g/ |
| 0,0                | 17,0         | 17,0             | 31,0         | 31,0             | 50,0         | 50,0             | 57,0         | 57,0             | 129,0        | 129,0            | 331,0        | 331,0            |
| 4,0                | 15,5         | 15,0             | 30,0         | 29,0             | 47,0         | 48,0             | 54,0         | 54,0             | 125,5        | 126,0            | 326,0        | 326,0            |
| 8,0                | 14,0         | 13,0             | 28,0         | 28,5             | 44,5         | 46,0             | 52,0         | 53,0             | 121,0        | 123,0            | 320,0        | 319,0            |
| 24,0               | 13,0         | 12,0             | 25,0         | 24,0             | 38,0         | 40,0             | 45,0         | 47,0             | 113,0        | 114,0            | 298,0        | 297,0            |
| 48,0               | 9,5          | 10,0             | 21,0         | 21,0             | 31,0         | 33,0             | 38,0         | 41,0             | 102,0        | 106,0            | 268,0        | 274,0            |
| 72,0               | 9,5          | 9,5              | 19,0         | 19,0             | 27,5         | 29,0             | 33,0         | 37,0             | 94,5         | 94,0             | 247,0        | 252,0            |
| 120,0              | 9,5          | 9,5              | 17,0         | 18,0             | 23,5         | 25,0             | 31,5         | 34,0             | 82,5         | 83,0             | 220,0        | 224,0            |
| 240,0              | 9,5          | 9,5              | 17,0         | 17,0             | 22,5         | 22,0             | 31,5         | 31,5             | 71,0         | 74,0             | 194,0        | 194,0            |



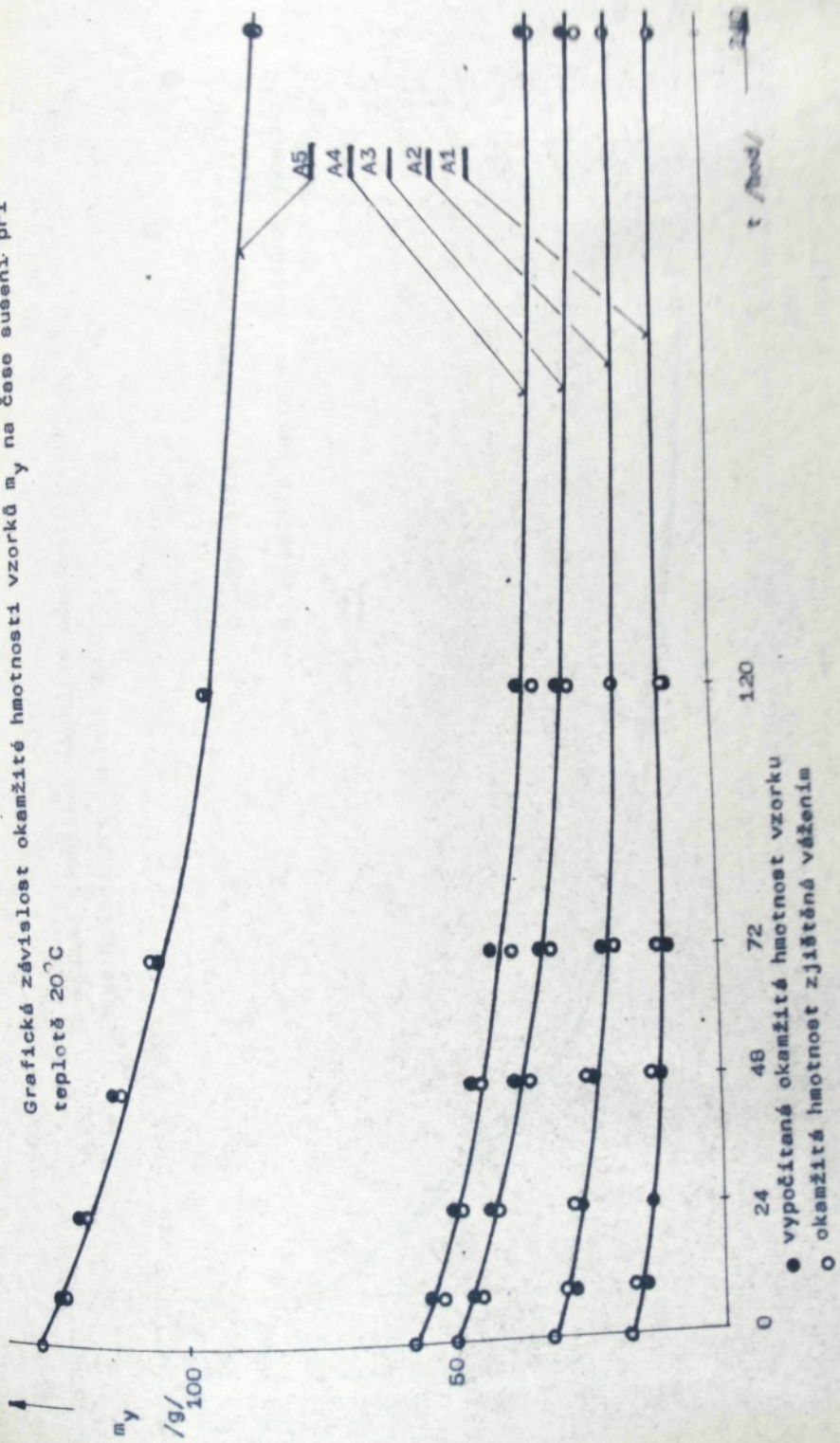
Sušení při teplotě v peci 200°C

| Označení vzorků  | A1           |                   | A2           |                   | A3           |                   | A4           |                   | A5           |                   | A6           |                   |
|------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|
|                  | $m_y$<br>/g/ | $m_y$ vyp.<br>/g/ | $m_y$<br>/g/ | $m_y$ vyp.<br>/g/ | $m_y$<br>/g/ | $m_y$ vyp.<br>/g/ | $m_y$<br>/g/ | $m_y$ vyp.<br>/g/ | $m_y$<br>/g/ | $m_y$ vyp.<br>/g/ | $m_y$<br>/g/ | $m_y$ vyp.<br>/g/ |
| Čas sušení / h / |              |                   |              |                   |              |                   |              |                   |              |                   |              |                   |
| 0,0              | 16,5         | 16,5              | 33,0         | 33,0              | 65,0         | 65,0              | 66,0         | 66,0              | 118,0        | 118,0             | 330,5        | 330,5             |
| 0,5              | 10,0         | 9,5               | 23,0         | 22,5              | 58,0         | 54,0              | 59,0         | 56,0              | 105,0        | 101,0             | 285,0        | 263,0             |
| 1,0              | 9,0          | 9,0               | 20,5         | 20,0              | 49,0         | 47,0              | 50,0         | 48,0              | 95,0         | 92,0              | 233,0        | 228,0             |
| 1,5              | 9,0          | 9,0               | 19,5         | 19,5              | 43,0         | 43,0              | 44,0         | 43,0              | 86,0         | 83,0              | 208,0        | 206,0             |
| 2,0              | 9,0          | 9,0               | 18,5         | 19,0              | 40,0         | 40,0              | 41,0         | 41,0              | 80,0         | 77,0              | 195,0        | 194,0             |
| 3,0              | 9,0          | 9,0               | 18,5         | 18,5              | 37,0         | 38,0              | 38,0         | 39,0              | 71,0         | 71,0              | 183,0        | 185,0             |
| 4,0              | 9,0          | 9,0               | 18,5         | 18,5              | 36,0         | 36,5              | 37,0         | 38,5              | 67,0         | 69,0              | 181,0        | 182,0             |
| 5,0              | 9,0          | 9,0               | 18,5         | 18,5              | 36,0         | 36,0              | 37,0         | 37,5              | 66,0         | 66,0              | 180,0        | 180,0             |

Poznamka hodnoty jsou zaokrouhleny na 0,5 g

Grafická závislost okamžité hmotnosti vzorků  $m_y$  na čase sušení při

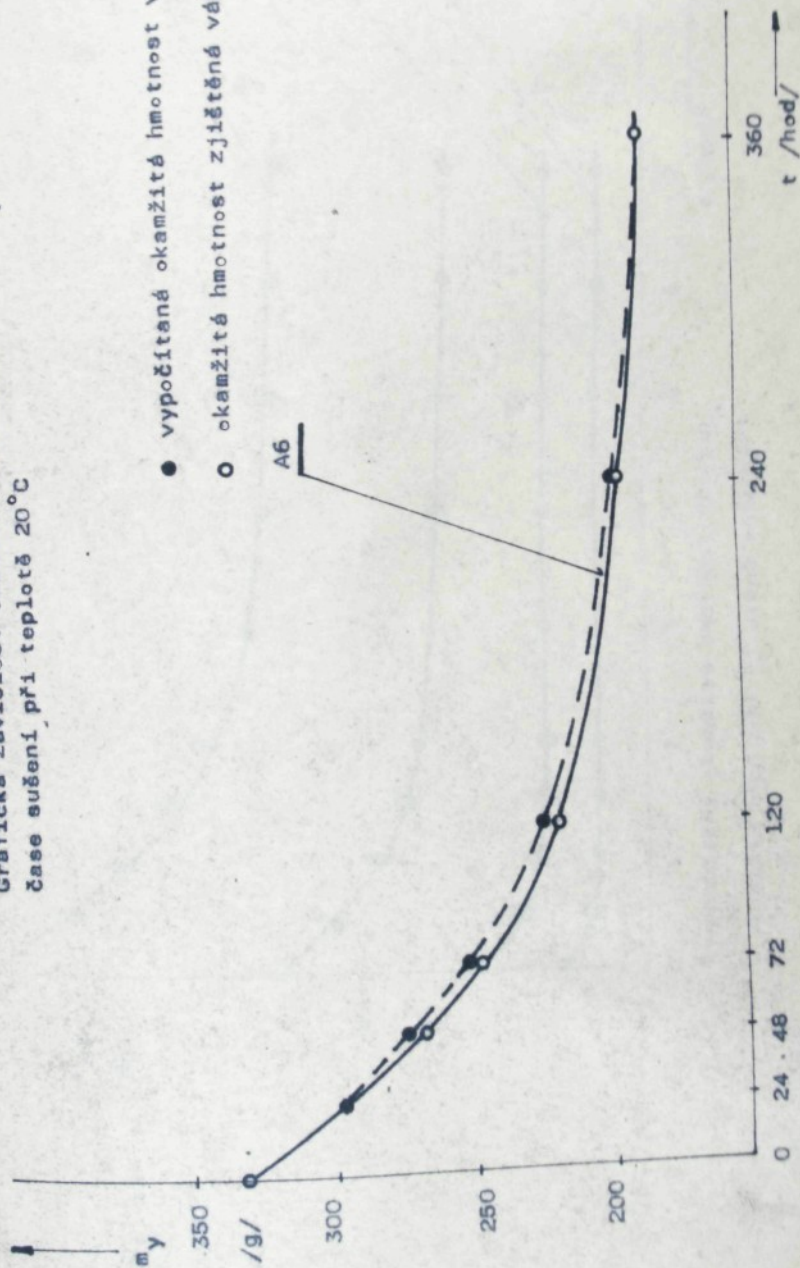
teplotě 20°C



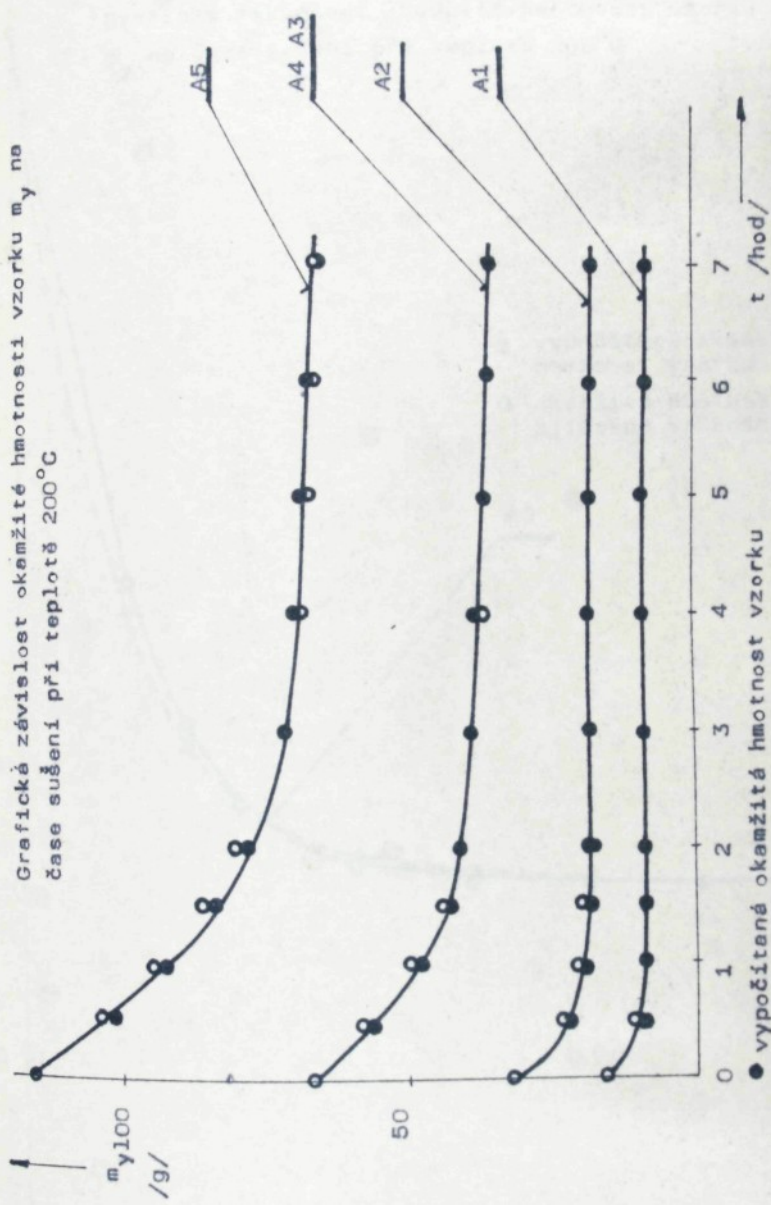


Grafická závislost okamžité hmotnosti vzorku  $m_y$  na  
čase sušení při teplotě  $20^\circ\text{C}$

- vypočítaná okamžitá hmotnost vzorku
- okamžitá hmotnost zjištěná vážením



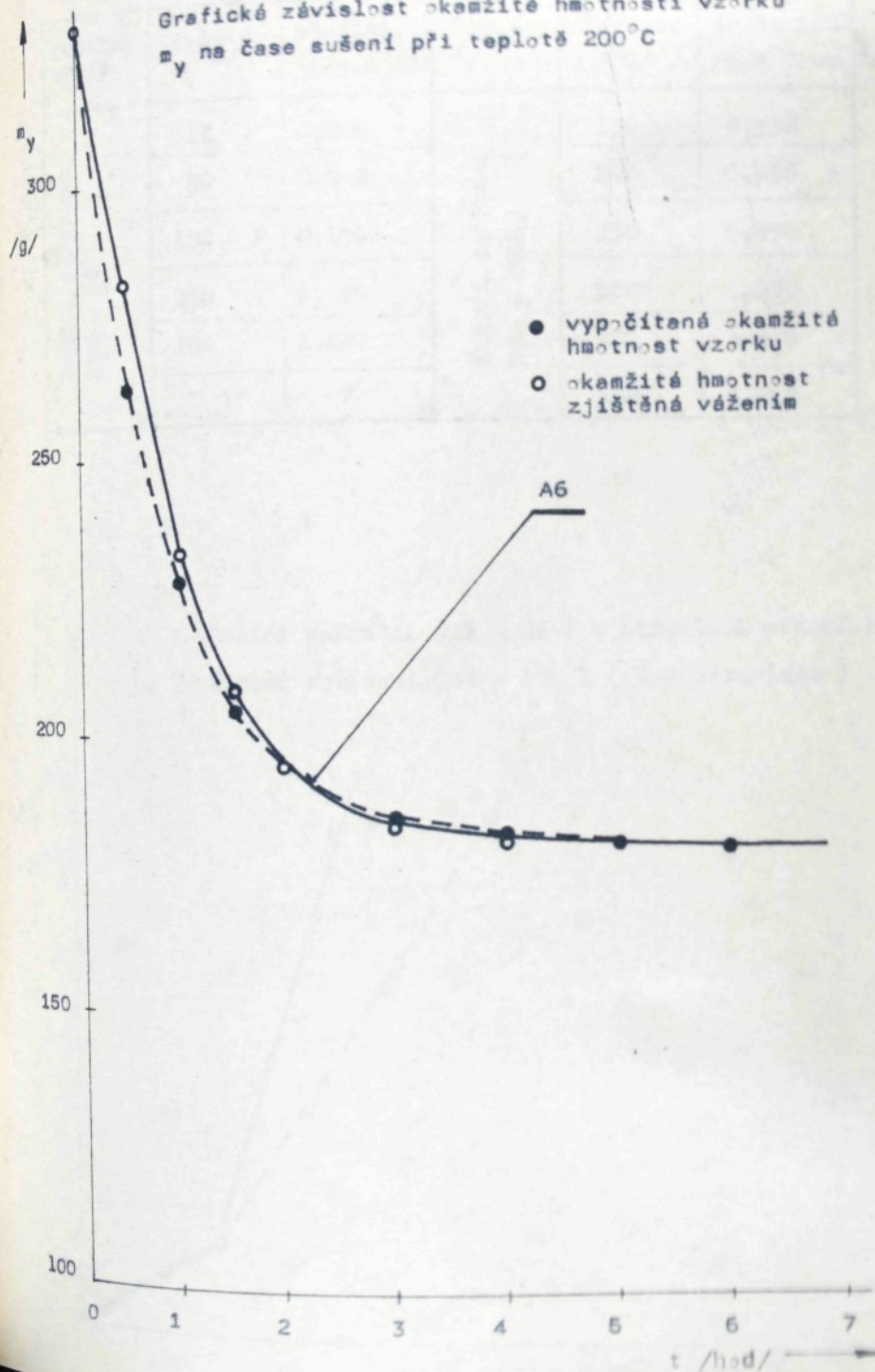
Grafická závislost okamžité hmotnosti vzorku  $m_y$  na  
čase sušení při teplotě 200°C



● vypočítaná okamžitá hmotnost vzorku  
○ okamžitá hmotnost zjištěná vážením

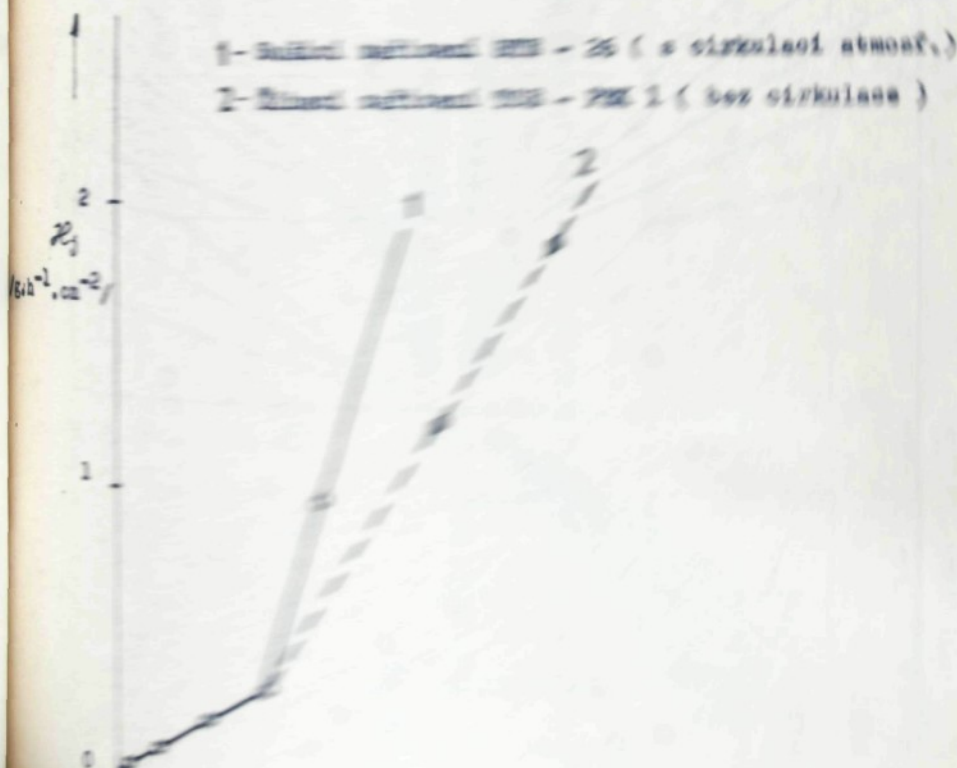


Grafická závislost okamžité hmotnosti vzorku  $m_y$  na čase sušení při teplotě 200°C



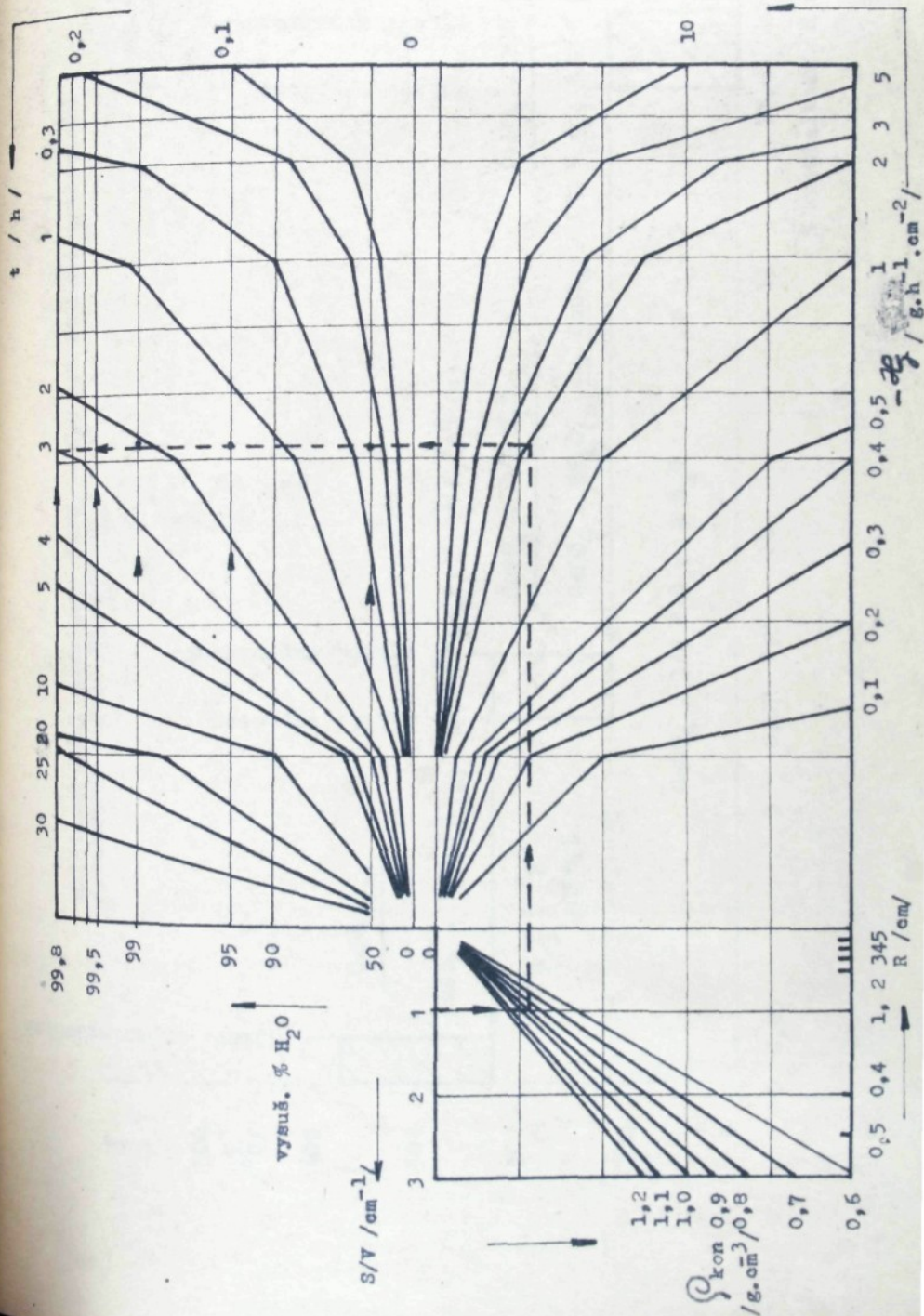
Tabulka hodnot  $\alpha_j$

| Tepelné<br>sprac.           | Teplota<br>/°C/ | Součinitel<br>$\alpha_j / \text{g.h}^{-1} \text{cm}^{-2} /$ | Tep. spr.                      | Teplota<br>/°C/ | Součinitel<br>$\alpha_j / \text{g.h}^{-1} \text{cm}^{-2} /$ |
|-----------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------|
| Sušící zařízení<br>STB - 26 | 20              | 0,009                                                       | Sušící zařízení<br>STB - PHE 1 | 150             | 0,338                                                       |
|                             | 50              | 0,040                                                       |                                | 200             | 0,630                                                       |
|                             | 100             | 0,150                                                       |                                | 250             | 0,950                                                       |
|                             | 150             | 0,520                                                       |                                | 300             | 1,280                                                       |
|                             | 200             | 1,020                                                       |                                | 400             | 1,910                                                       |
|                             | -               | -                                                           |                                | 500             | 2,560                                                       |

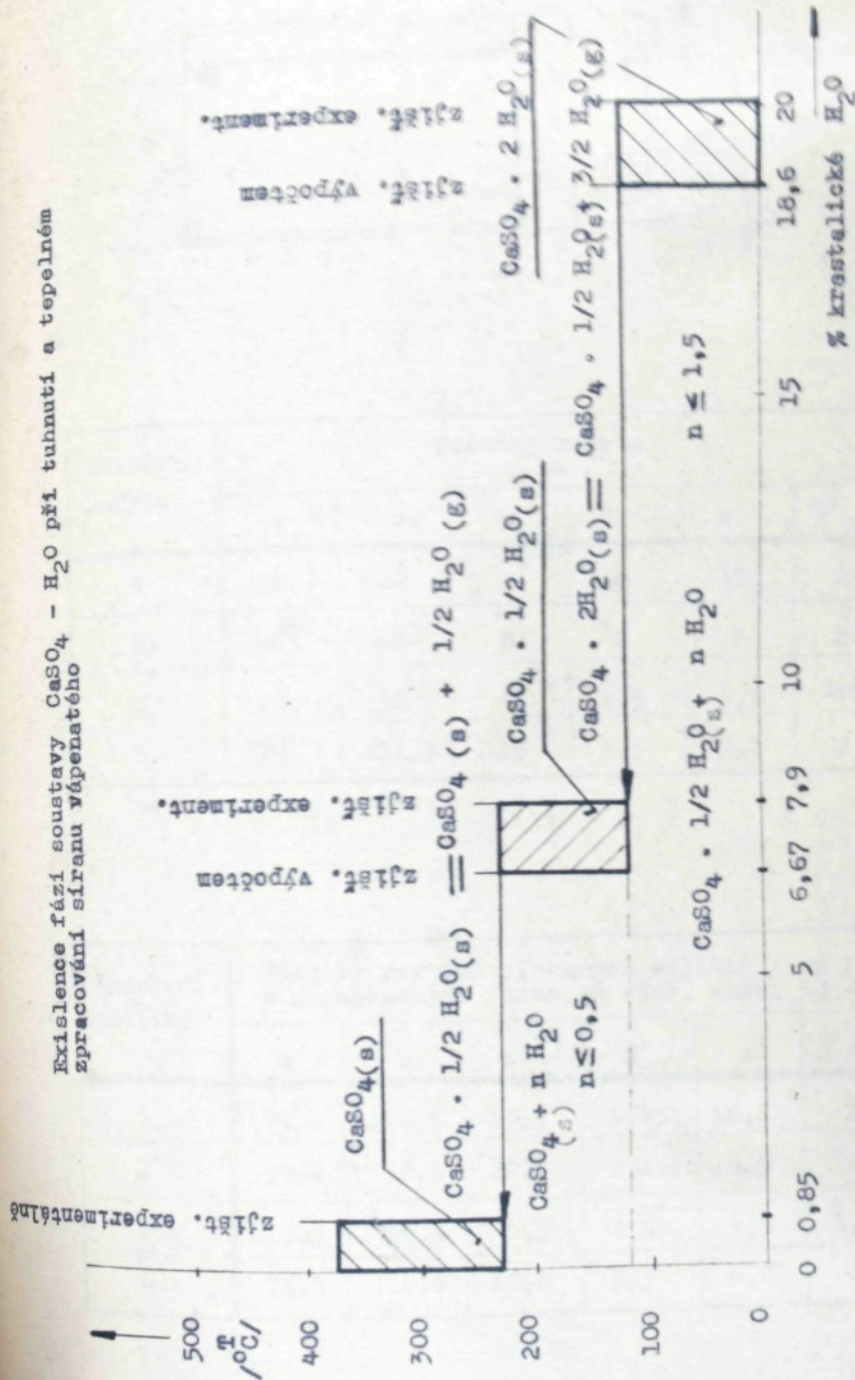




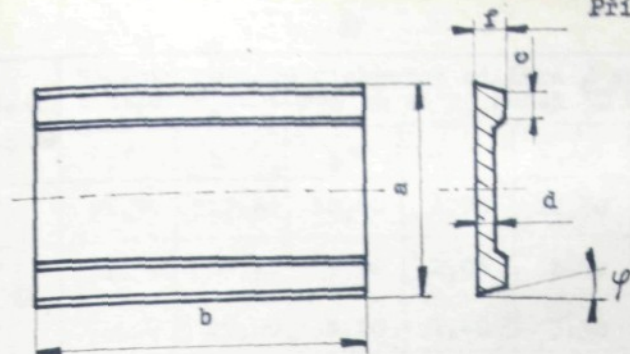
# Nomogram sušení



Existence fází soustav  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  při tuhnutí a tepelném zpracování síranu vápenatého



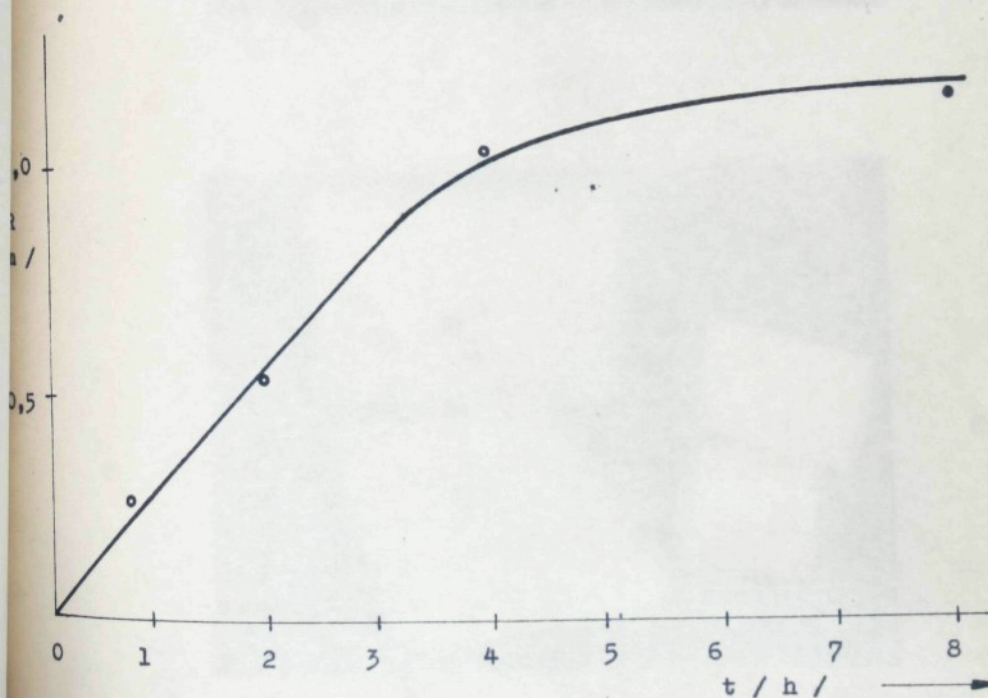




| Označení<br>modelů | Rozměry modelu<br>/ mm / |       |    |     |     |               |
|--------------------|--------------------------|-------|----|-----|-----|---------------|
|                    | a                        | b     | c  | d   | e   | $\varphi$ /°/ |
| A                  | 80                       | 119   | 20 | 4   | 17  | 2             |
| B                  | 40                       | 60    | 10 | 2   | 8   | 2             |
| C                  | 20                       | 30    | 5  | 1,5 | 3,7 | 1,5           |
| D                  | 79                       | 118,5 | 19 | 3,5 | 7,0 | 2             |

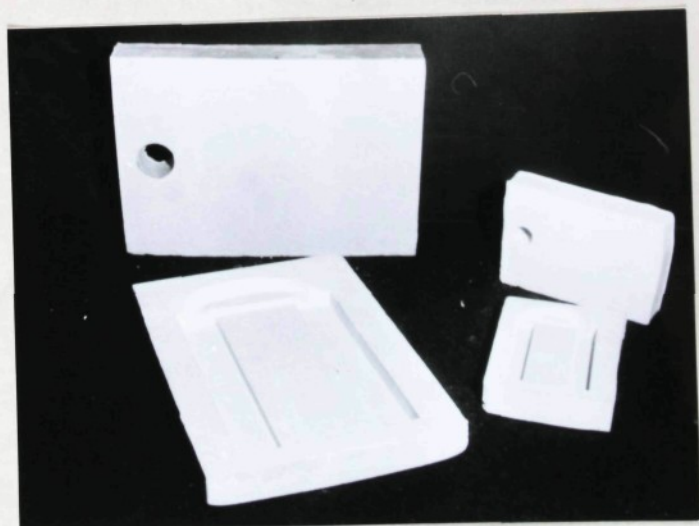
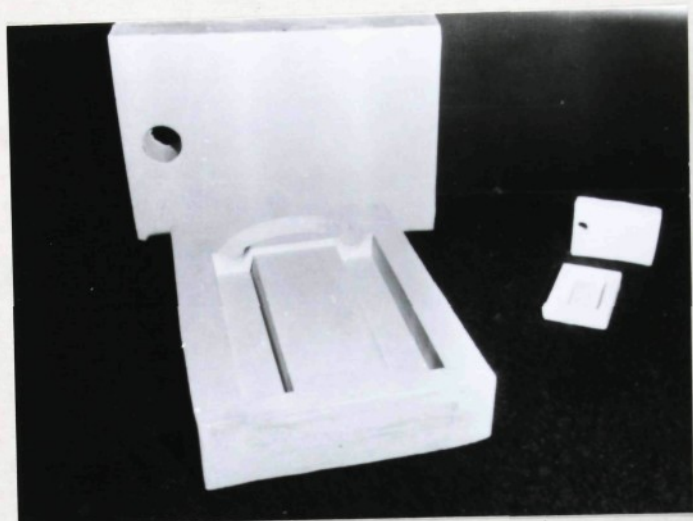
| Označení<br>odliték | Hodnoty rozměrů získaných odlitků / mm /<br>z nenapěněných forem ze sádr. směsí 50 - 50 |       |      |      |      |                |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|------|------|----------------|
|                     | a'                                                                                      | b'    | c'   | d'   | e'   | $\varphi'$ /°/ |
| A'                  | 79,1                                                                                    | 117,1 | 19,5 | 3,85 | 16,8 | 2              |
| B'                  | 39,2                                                                                    | 58,9  | 10,0 | 2,1  | 6,9  | 2              |
| C'                  | 19,5                                                                                    | 29,5  | 4,5  | 1,5  | 3,5  | 1,5            |
| D'                  | 78,3                                                                                    | 117,8 | 18,8 | 3,5  | 6,8  | 2              |

| Označení<br>odlitéků | Hodnoty rozměrů získaných odlitků / mm /<br>z napěněných forem ze sádr. směsí 50 - 50 N |        |       |      |       |                    |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|------|-------|--------------------|
|                      | a''                                                                                     | b''    | c''   | d''  | e''   | $\varphi''/^\circ$ |
| A''                  | 78,90                                                                                   | 117,60 | 18,60 | 3,70 | 16,50 | 2                  |
| B''                  | 39,30                                                                                   | 59,10  | 9,20  | 2,05 | 6,70  | 2                  |
| C''                  | 19,50                                                                                   | 29,60  | 4,20  | 1,40 | 3,30  | 1,5                |
| D''                  | 76,80                                                                                   | 117,80 | 18,10 | 3,40 | 6,70  | 2                  |

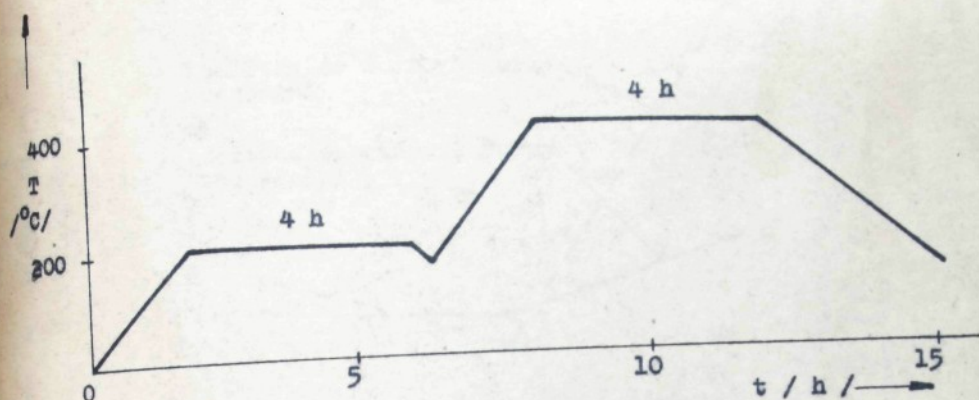


Závislost doby žíhání sádrových forem na redukované tloušťce formy při teplotě prodlevy v peci  $400^\circ\text{C}$  pro formy nenapěněné a pro formy napěněné při teplotě prodlevy  $200^\circ\text{C}$

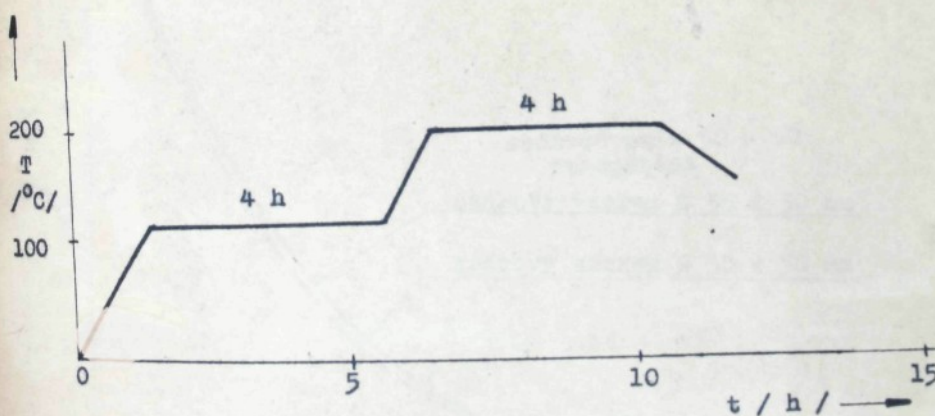




Sádrové formy ze směsi 50 - 50 a 50 - 50 N pro výrobu odlitků tvaru desky

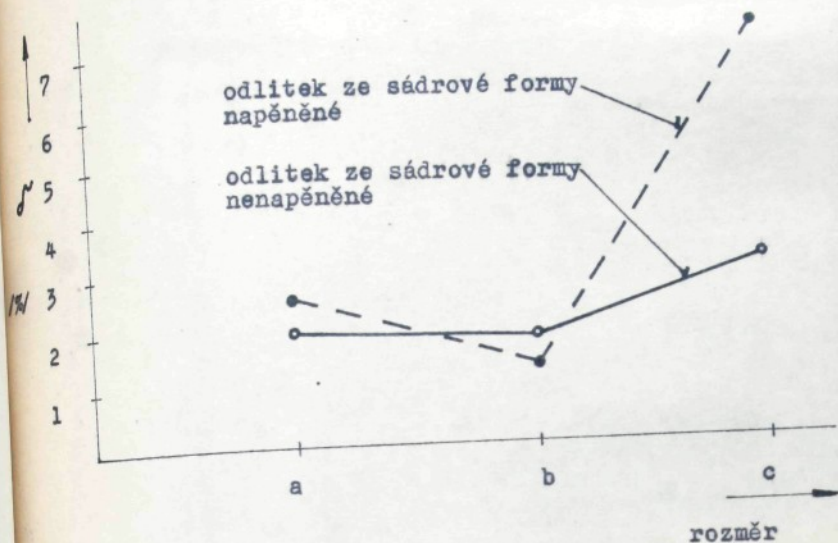


Režim tepelného zpracování forem nenapěněných ze sádrové směsi 50 - 50 velikosti 170 x 116 x 30 mm s vodním poměrem 0,72.

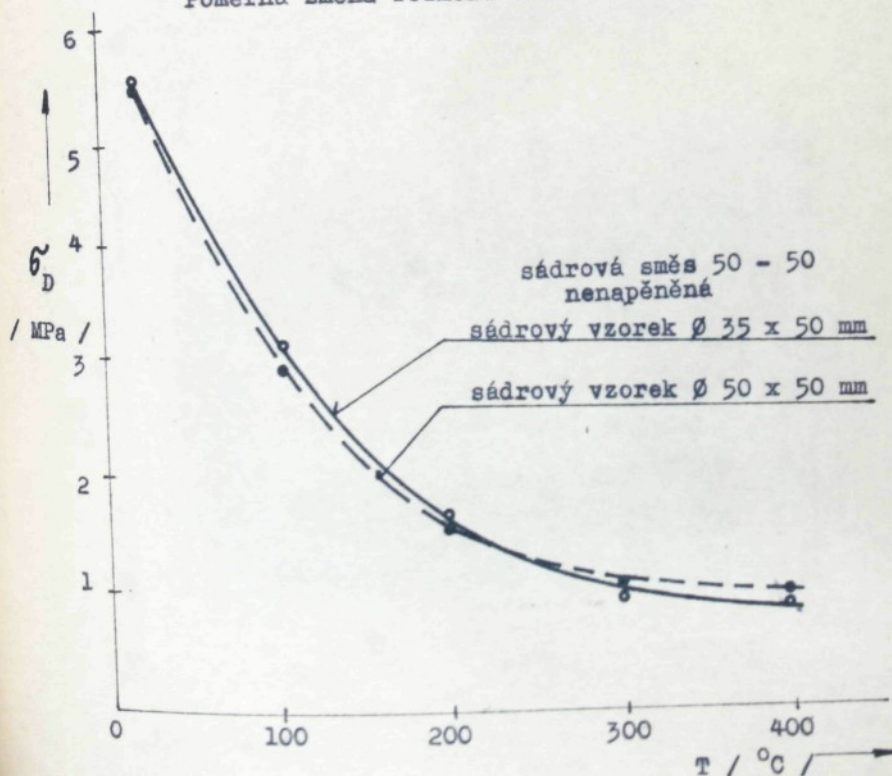


Režim tepelného zpracování forem ze sádrové směsi napěněné 50 - 50 N velikosti 170 x 116 x 30 mm s vodním poměrem 0,70





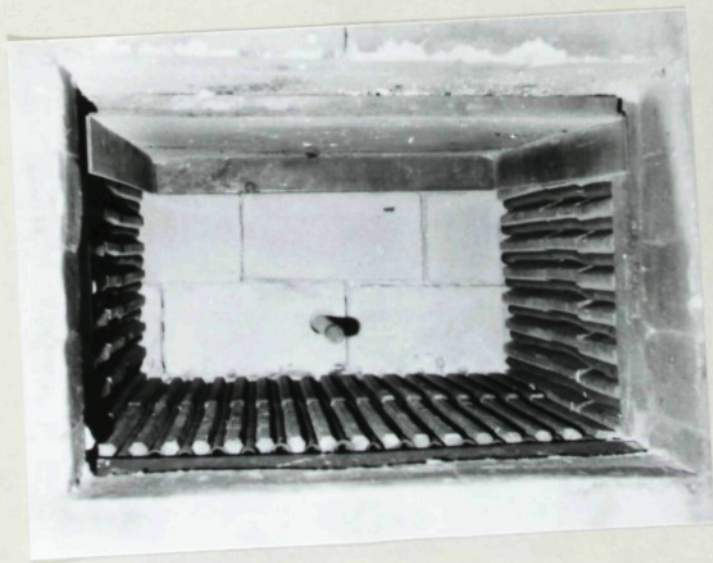
Poměrná změna rozměrů odlitků



Grafická závislost pevnosti v tlaku sádrového vzorku na teplotě

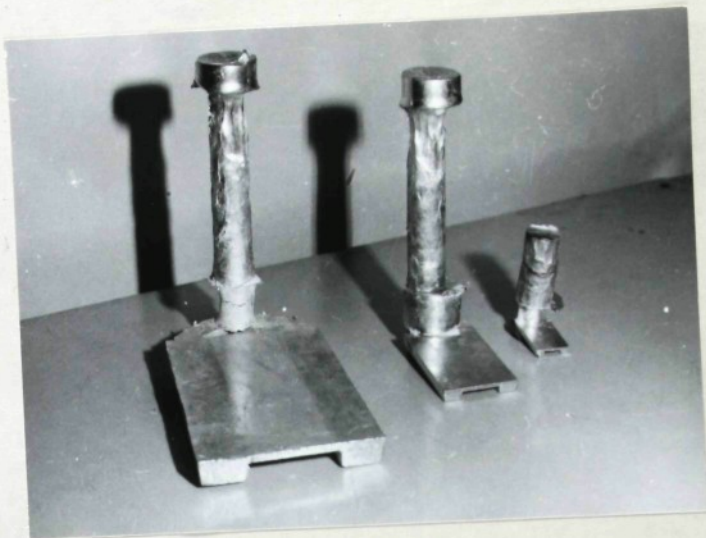


Sušárna STE s regulací do teploty 200°C

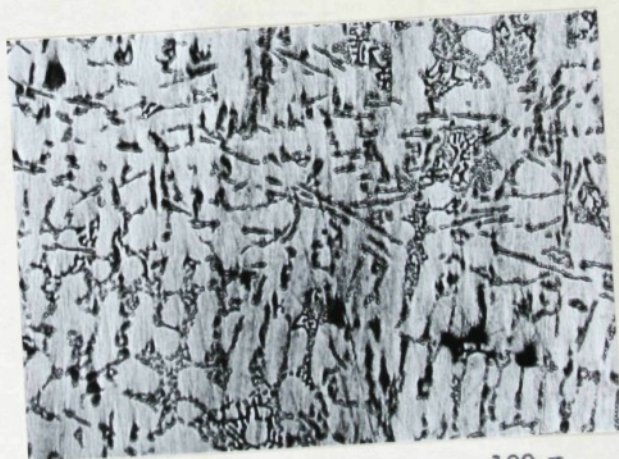


Žihací komorová pec TSE - PEK 1





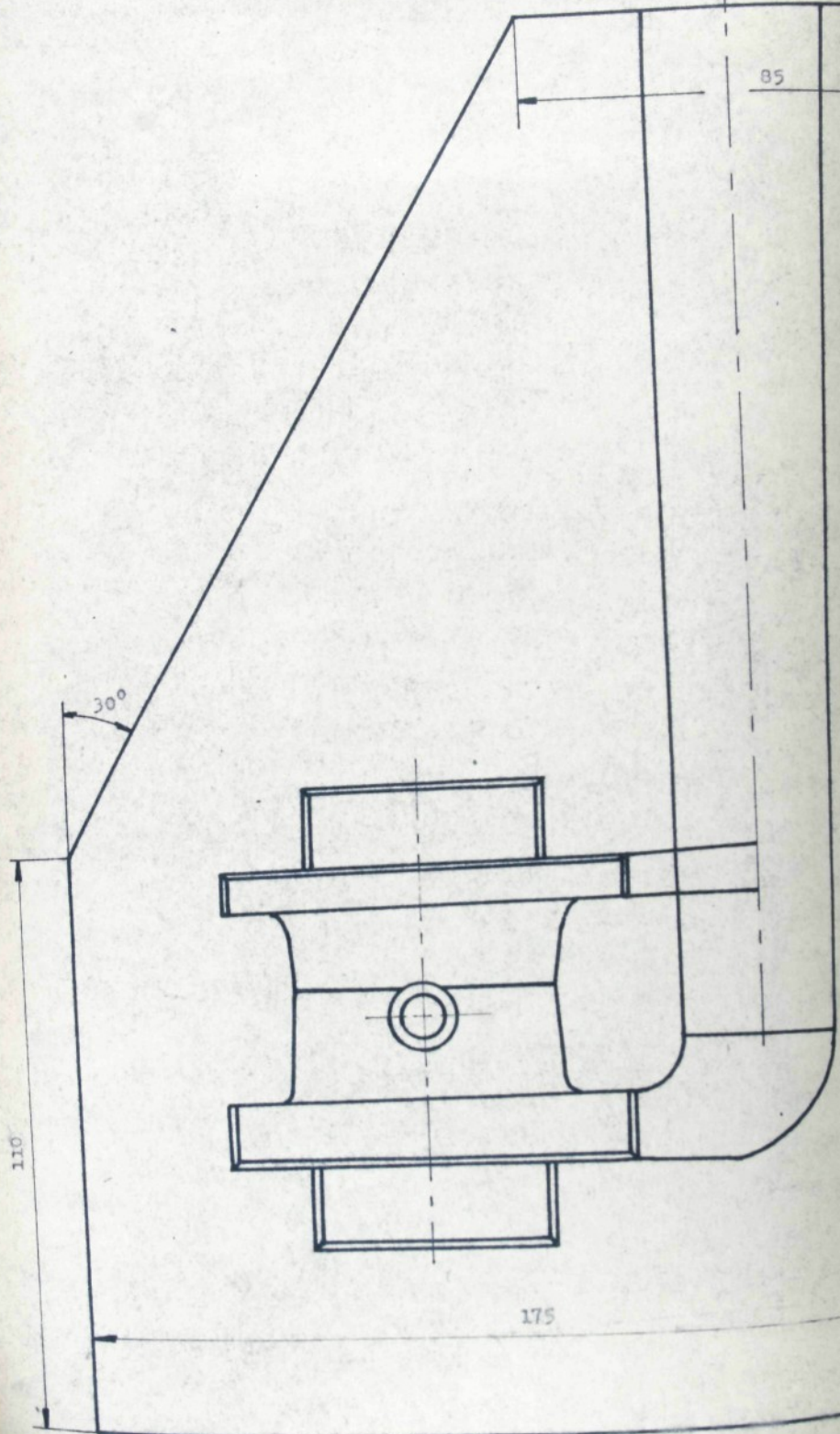
Získané odlitky tvaru desky



neleptáno

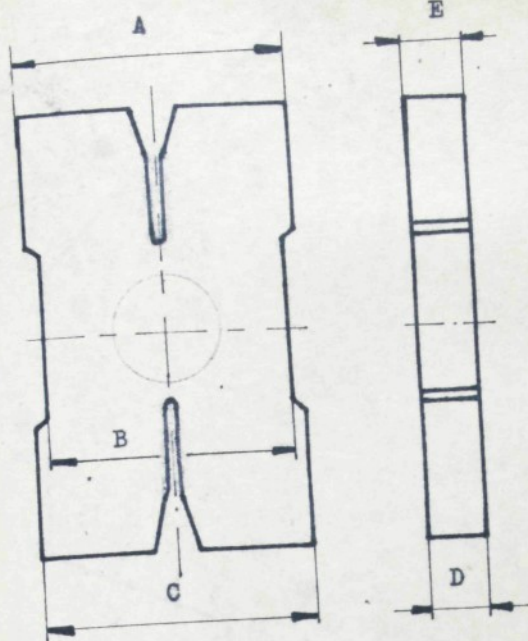
100 x

Mikrostruktúra odlitku materiálu  
ČSN 424331



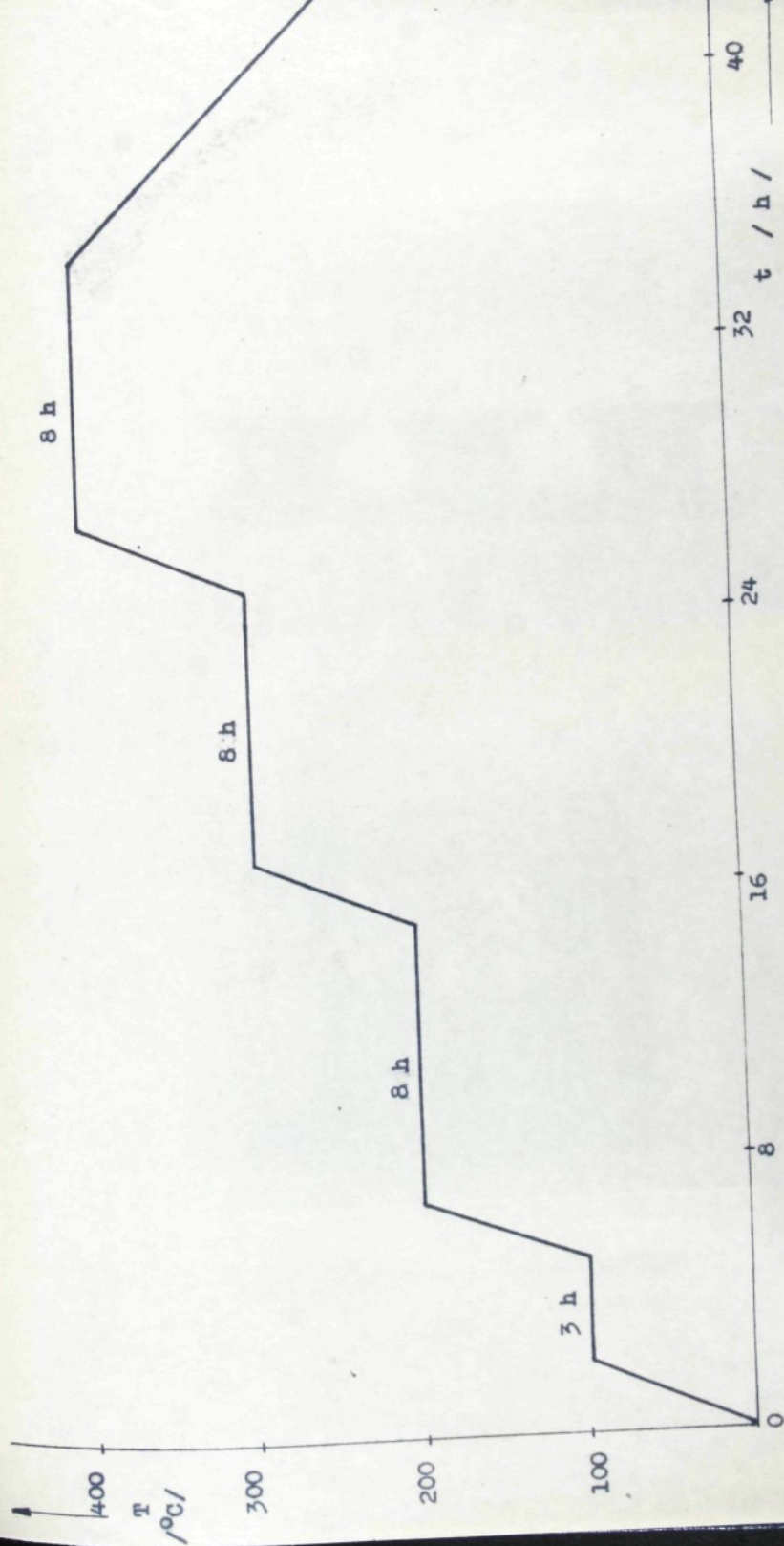


VTOK

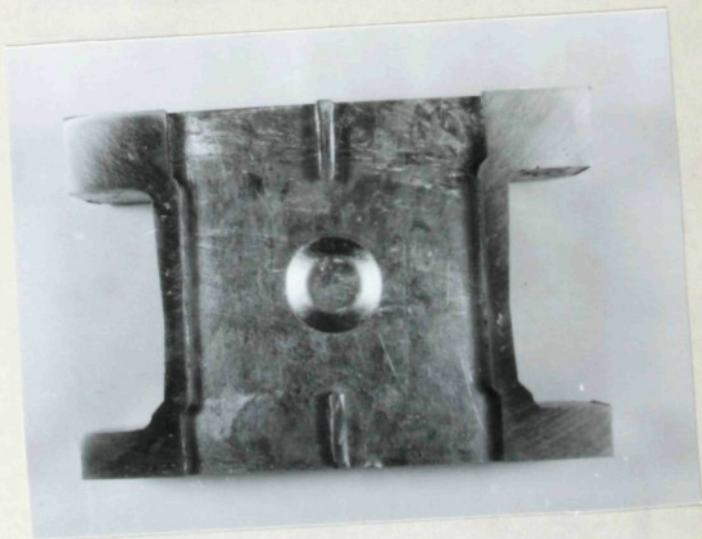
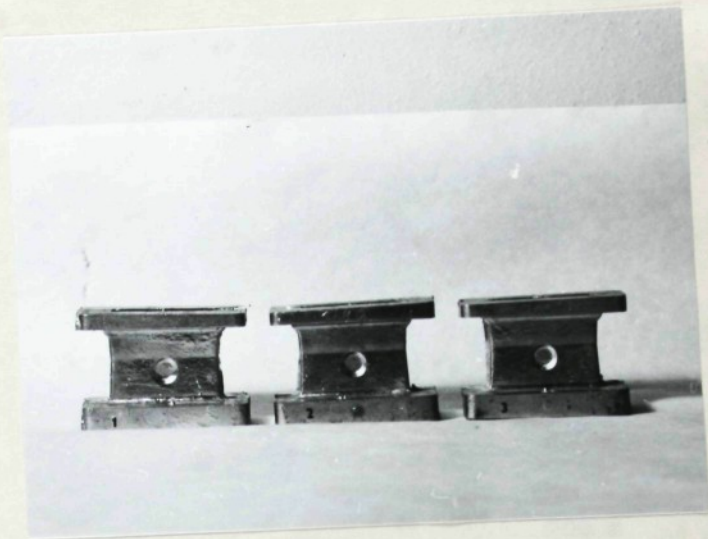


| Rozměry<br>/ mm /   |   |       |       |       |       |       |
|---------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| uvedeny (naměřeny): |   | A     | B     | C     | D     | E     |
| Výkres:             |   | 46,80 | 44,20 | 46,80 | 10,20 | 10,20 |
| Jaderník:           |   | 47,15 | 44,55 | 47,15 | 10,10 | 10,10 |
| Jádro:              | 1 | 47,30 | 44,70 | 47,28 | 10,25 | 10,23 |
|                     | 2 | 47,37 | 44,80 | 47,41 | 10,26 | 10,24 |
|                     | 3 | 47,42 | 44,82 | 47,41 | 10,24 | 10,22 |
| Odlietek:           | 1 | 46,75 | 44,40 | 46,80 | 10,25 | 10,05 |
|                     | 2 | 45,55 | 43,35 | 45,85 | 9,90  | 9,85  |
|                     | 3 | 46,70 | 43,45 | 46,75 | 10,15 | 10,20 |

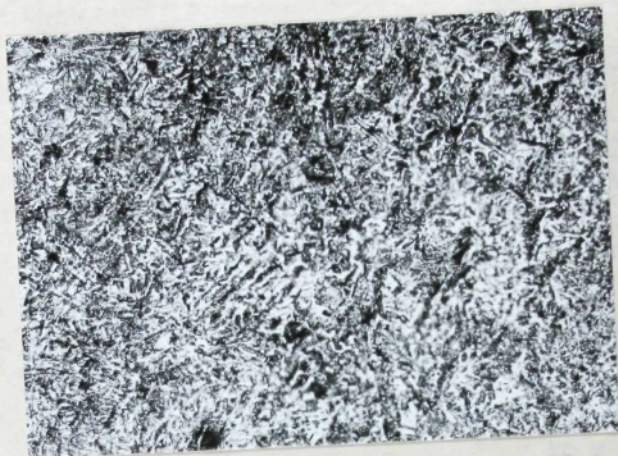
Režim tepelného zpracování sádrových forem pro zhotovení  
odlitéků určených k radiotechnickým účelům





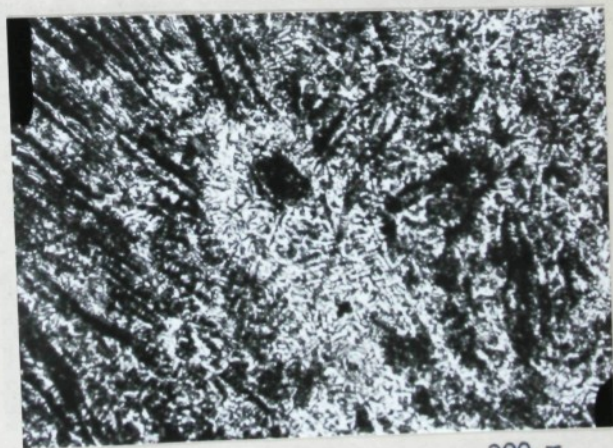


Odlitky používané v radiotechnice



200 x

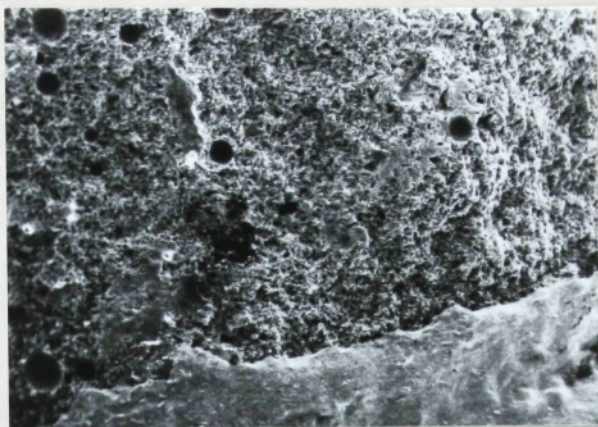
Povrch odlitku ze sádrové formy 50 - 50  
nenapěněné



200 x

Povrch odlitku ze sádrové formy 50 - 50 N  
napěněné

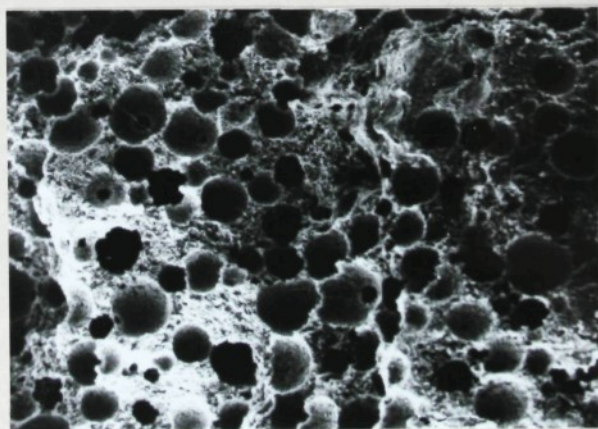




SEM

60 x

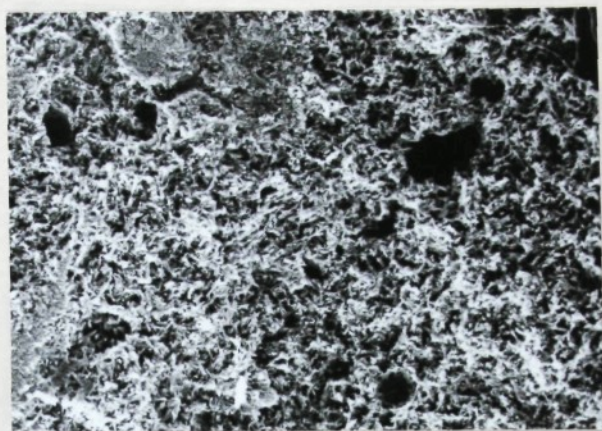
Struktura sádrové formy ze směsi 50 - 50  
nenapěněné po tepelném zpracování



SEM

60 x

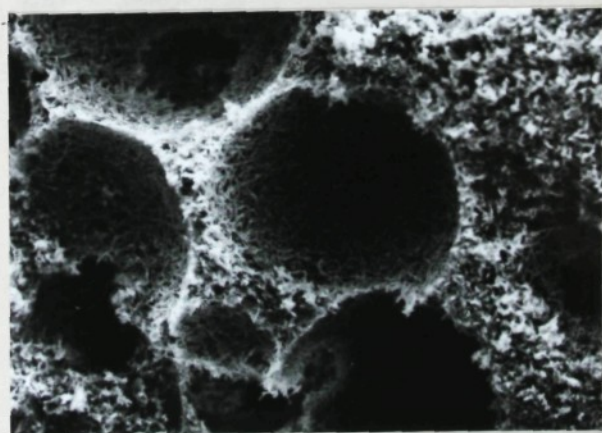
Struktura sádrové formy ze směsi 50 - 50 N  
napěněné po tepelném zpracování



SEM

250 x

Struktura sádrové formy ze směsi 50 - 50  
nenapěněné po tepelném zpracování

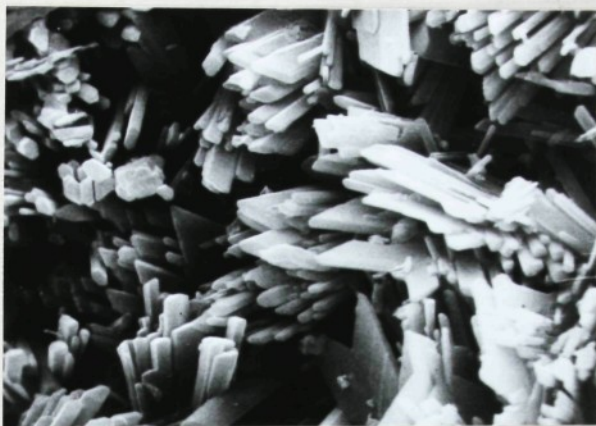


SEM

250 x

Struktura sádrové formy ze směsi 50 - 50 N  
napěněné po tepelném zpracování





SEM

5000 x

Struktura sádrové formy ze směsi 50 - 50  
nenapěněné po tepelném zpracování



SEM

5000 x

Struktura sádrové formy ze směsi 50 - 50 N  
napěněné po tepelném zpracování



SEM

15000 x

Struktura sádrové formy ze směsi 50 - 50  
nenapěněné po tepelném zpracování



SEM

15000 x

Struktura sádrové formy ze směsi 50 - 50 N  
napěněné po tepelném zpracování





SEM

300 x

Povrch odlitku ze sádrové formy 50 - 50  
nenapěněné



SEM

2000 x

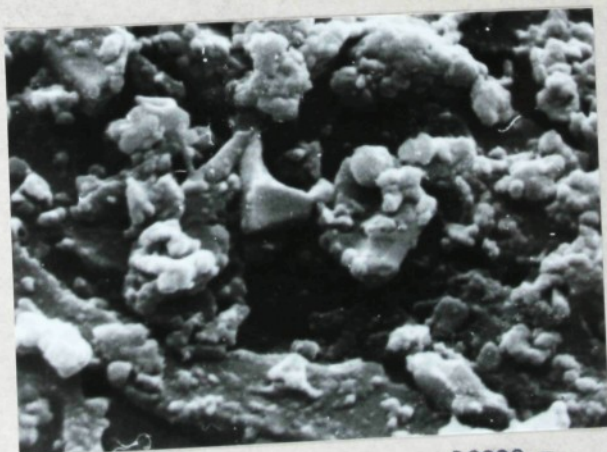
Povrch odlitku ze sádrové formy 50 - 50  
nenapěněné



SEM

5000 x

Povrch odlitku ze sádrové formy 50 - 50  
nenapěněné



SEM

10000 x

Povrch odlitku ze sádrové formy 50 - 50  
nenapěněné

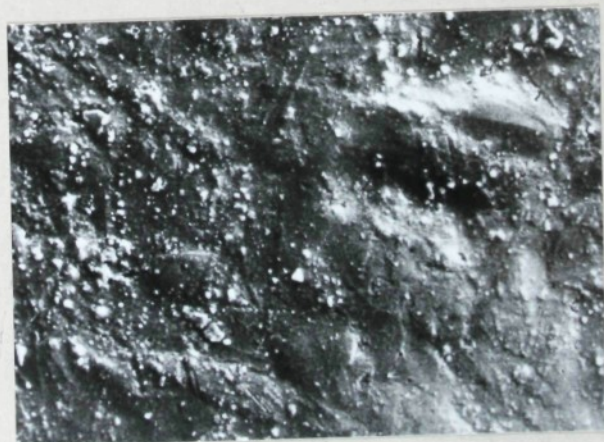




SEM

300 x

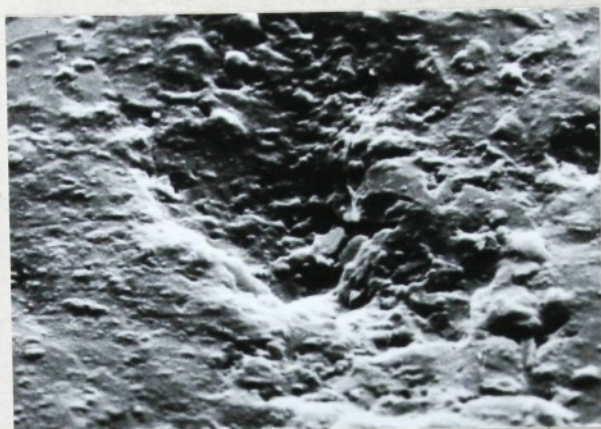
Povrch odlitku ze sádrové formy 50 - 50 N  
napěněné



SEM

2000 x

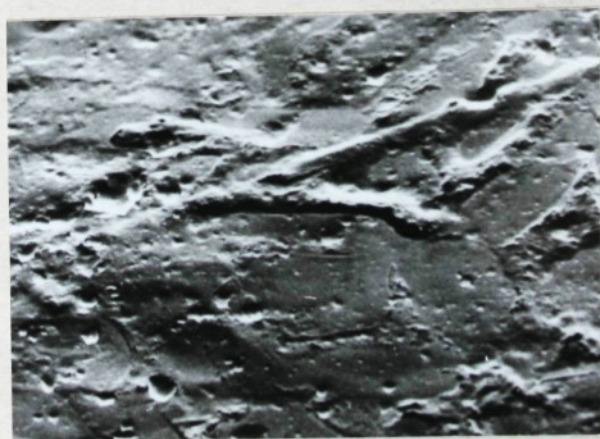
Povrch odlitku ze sádrové formy 50 - 50 N  
napěněné



SEM

3000 x

Povrch odlitku ze sádrové formy 50 - 50 N  
napěněné

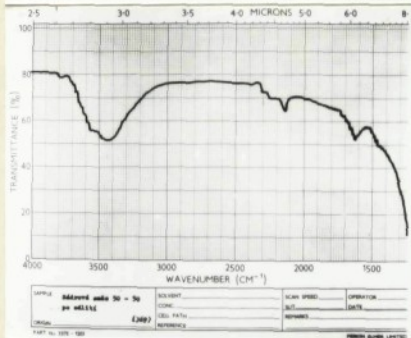
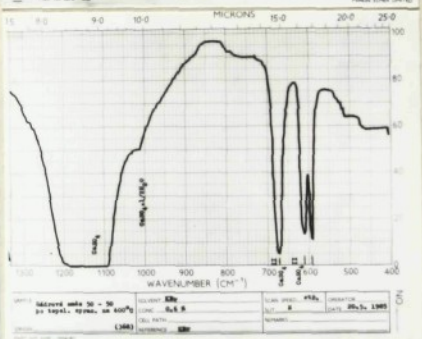
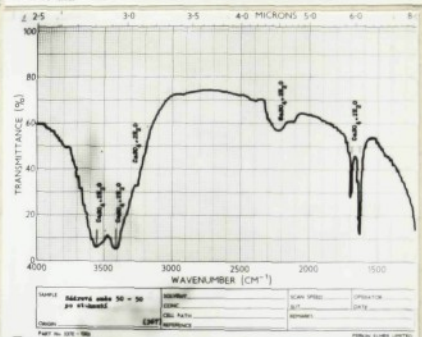
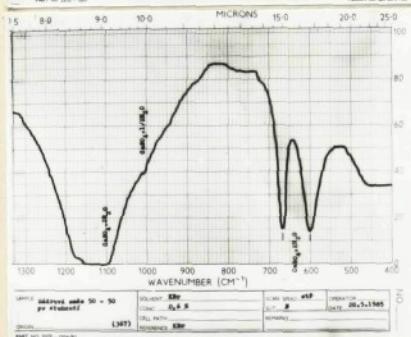
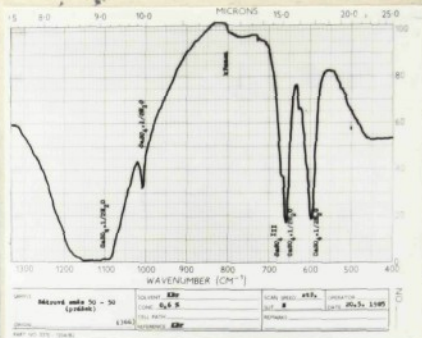
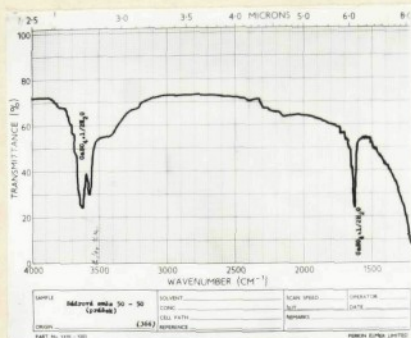


SEM

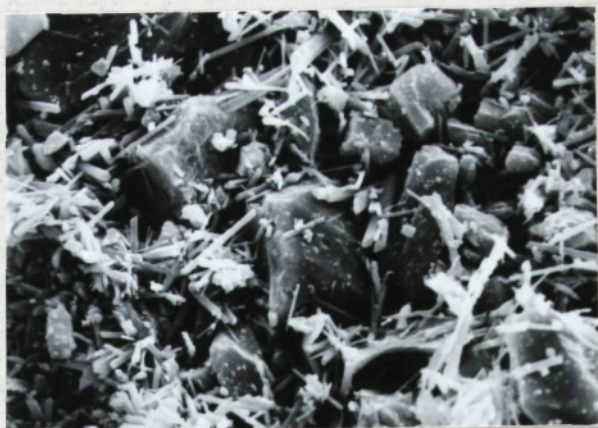
5000 x

Povrch odlitku ze sádrové formy 50 - 50 N  
napěněné



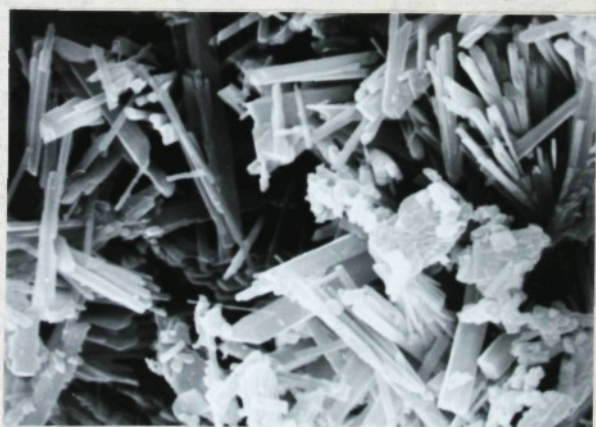


Spektrogramy sádrové směsi 50 - 50 práškové, po ztuhnutí, po tepelném zpracování, po odlití



SEM

60 x

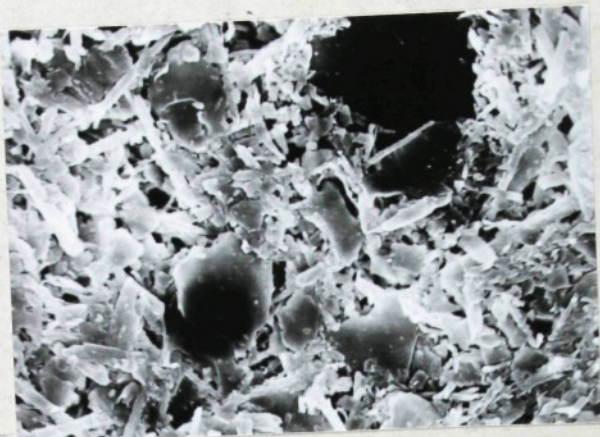


SEM

2300 x

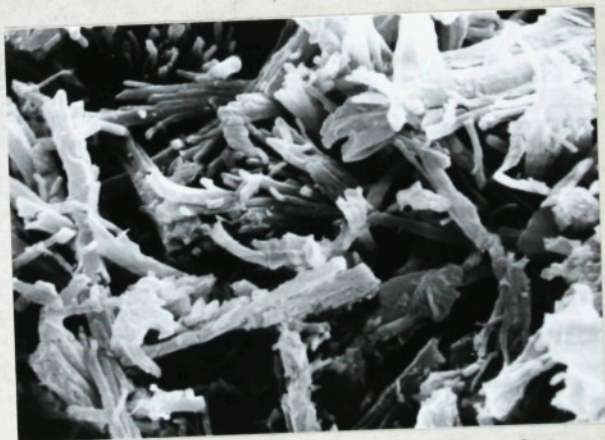
Krystalická struktura sádrové směsi 50 - 50 po ztuhnutí





SEM

1150 x



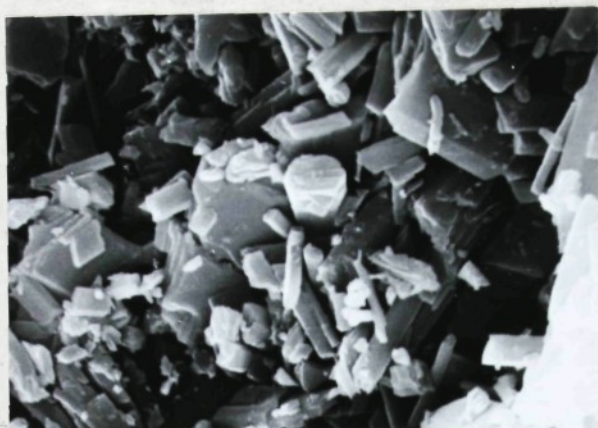
SEM

2600 x

Krystalická struktura sádrové směsi 50 - 50 po odlití  
slitiny hliníku

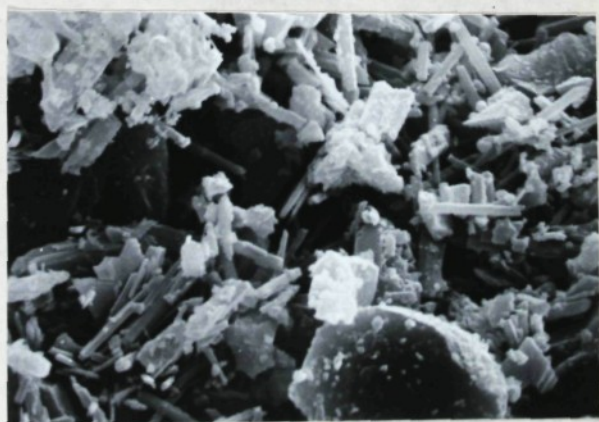






SEM

60 x



SEM

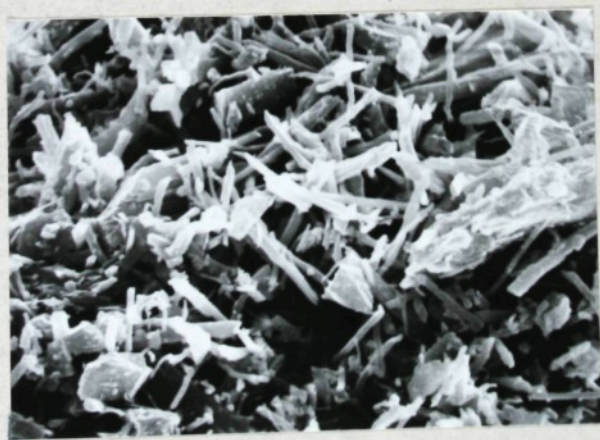
2400 x

Krystalická struktura sádrové směsi Gloria po ztuhnutí



SEM

1120 x

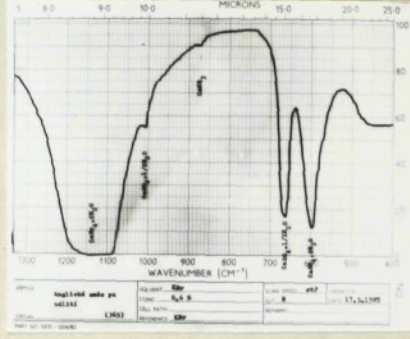
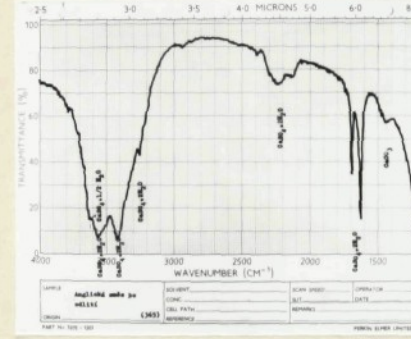
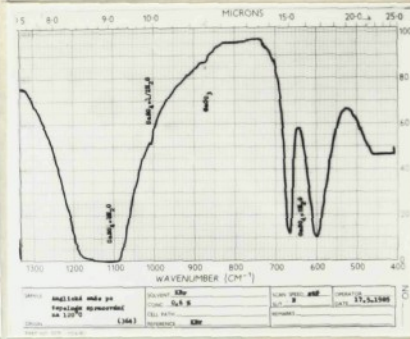
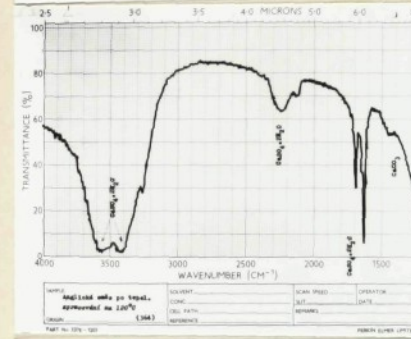
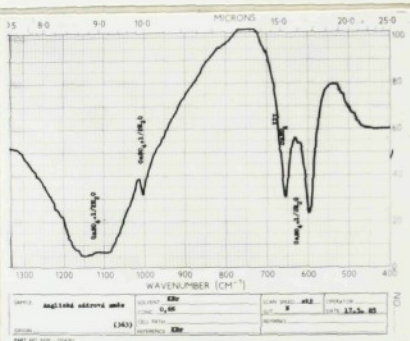
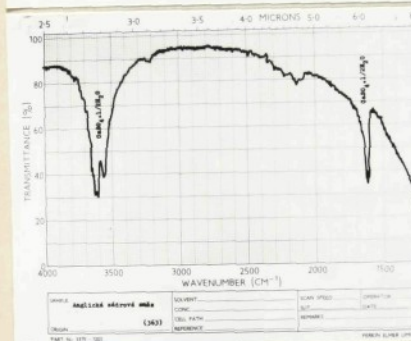
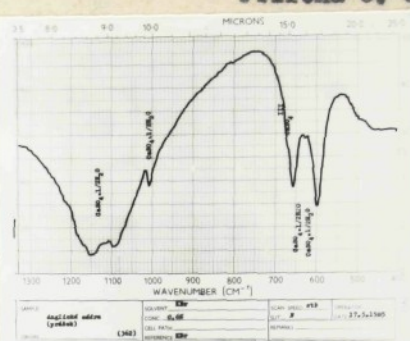


SEM

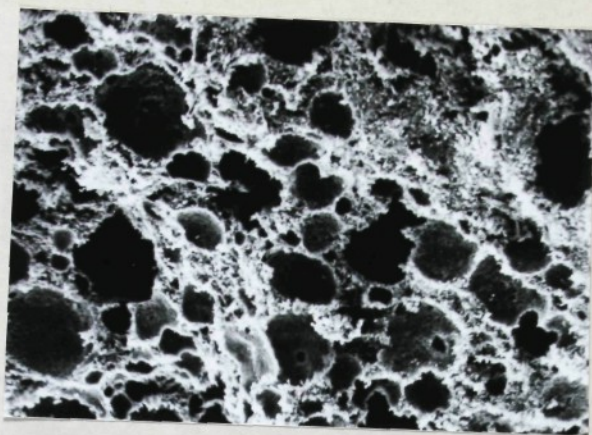
2200 x

Krystalická struktura sádrové směsi Gloria speciál  
po odlití slitiny hliníku



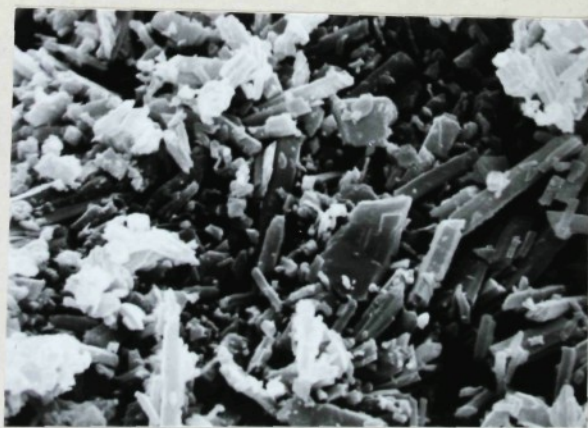


Spektrogramy anglické sádry práškové, anglické sádrové směsi práškové, po ztuhnutí, po odlití



SEM

60 x



SEM

1100 x

Krystalická struktura anglické sádrové směsi po odlití  
slitiny hliníku





SEM

2100 x



SEM

5400 x

Krystalická struktura anglické sádrové směsi po odlití  
slitiny hliníku