

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

MOŽNOSTI VÝROBY PŘESNÝCH ODLITKŮ ZE SLITIN
HLINÍKU V KOMBINOVANÝCH FORMÁCH "KOV-SÁDRA"

Kandidátská disertační práce

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146088267

Vědní obor: 23-07-9 strojírenská technologie

Aspirant: Ing. Pavel S i m o n

Odborné vedení: Doc. Ing. Zdeněk Holubec, CSc.

Liberec, prosinec 1988

O B S A H

1. ÚVOD	4
2. ROZBOR TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ KOVU VE FORMĚ	9
2.1. Krystalizace slévárenských slitin	9
2.2. Druhy tuhnutí	11
2.3. Rychlost tuhnutí	13
2.4. Konstanta tuhnutí	16
3. METODY ZJIŠŤOVÁNÍ RYCHLOSTI A DOBY TUHNUTÍ ODLITKU	20
3.1. Matematické řešení průběhu tuhnutí	20
3.1.1. Přestup tepla z roztaveného kovu do formy	20
3.1.2. Řešení dle Vejnika	24
3.1.2.1. Analýza změny stavu kovu	24
3.1.2.2. Rozložení teplot v odlitku	26
3.1.2.3. Přestup tepla z kovu do formy přes vzniklou mezeru	27
3.2. Aproximativní metody	28
3.3. Použití modelové techniky	29
3.4. Experimentální zjišťování průběhu tuhnutí	30
3.5. Zhodnocení jednotlivých metod	31
4. TEPELNĚ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI FORMOVÁČÍCH MATERIÁLŮ	33
4.1. Určování součinitele b_2	34
4.1.1. Určování k a b_2 podle Wlodawera	35
4.1.2. Určování b_2 podle Příbyla	36
4.1.3. Určování b_2 podle VSŽ n.p. Košice	38
4.1.4. Určování b_2 podle Vejnika	39
5. ZÁKLADNÍ ZÁKONITOSTI TUHNUTÍ ODLITKU V KOMBINO- VANÉ FORMĚ	43
6. CHARAKTERISTIKA FOREM ZE SÁDROVÝCH SMĚSÍ	47

6.1. Fyzikálně chemické vlastnosti sádry	47
6.2. Rozdělení sáder	49
6.3. Vlastnosti sádry pro slévárenské účely	50
6.4. Tuhnutí a tvrdnutí sádry	51
6.5. Sádrové směsi	54
6.6. Formy ze sádrových směsí	58
6.7. Výroba forem ze sádrových směsí	59
6.8. Tepelně fyzikální vlastnosti sádrových formo- vacích směsí a jejich ovlivňování	61
7. EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ SOUČiniteLE TEPELNÉ AKUMU- LACE, PROOYŠNOSTI A MEZE PEVNOSTI V TLAKU VYBRANÝCH SÁDROVÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍ	73
7.1. Návrh metodiky a zkušební formy	73
7.2. Popis zkušebního zařízení	74
7.3. Měření teploty	75
7.4. Použité formovací materiály	77
7.5. Příprava a zpracování sádrových zkušebních vzorků	78
7.5.1. Příprava suché sádrové směsi	78
7.5.2. Stanovení hodnoty vodního součinitele	79
7.5.3. Příprava sádrové kaše	80
7.5.4. Odlévání sádrové kaše do formy	80
7.5.5. Tepelné zpracování sádrových vzorků	81
7.6. Morfologie a rozložení aditiv na lomových plochách sádrových vzorků	82
7.7. Měření součinitele tepelné akumulace b_2	83
7.8. Postup vyhodnocování naměřených výsledků	85
7.8.1. Grafické zpracování naměřených hodnot	85
7.8.2. Výpočet exponentu n_2 a součinitele b_2	86
7.8.2.1. Základní výpočet dle Vejnika	86
7.8.2.2. Linearizace vzhledem k parametru n_2	87
7.8.2.3. Vyvážený linearizovaný vztah	88

7.8.2.4. Regrese mocnin	89
7.8.2.5. Program pro výpočet n_2 a b_2 na počítači	90
7.8.2.6. Zhodnocení metod výpočtu	90
7.9. Měření prodyšnosti sádrových směsí	92
7.10. Měření pevnosti v tlaku	93
7.11. Shrnutí a diskuse výsledků	94
8. ZJIŠŤOVÁNÍ PRŮBĚHU TUHNUTÍ DESKOVÉHO ODLITKU Z AL V KOMBINOVANÉ FORMĚ	99
8.1. Příprava zkušební formy	99
8.2. Vyhodnocování průběhu tuhnutí	100
8.3. Sledování průběhu tuhnutí podle makrostruktury	102
8.4. Shrnutí výsledků	102
9., POLOPROVOZNÍ ODLÉVÁNÍ ODLITKŮ NA NÍZKOTLAKÉM LICÍM ZAŘÍZENÍ	104
9.1. Popis zkušebního zařízení	105
9.2. Výroba jader ze sádrových směsí	106
9.3. Úprava jader před tepelným zpracováním	108
9.4. Tepelné zpracování sádrových jader	108
9.5. Příprava formy před litím	109
9.6. Úprava taveniny před litím	109
9.7. Vlastní odlévání	110
9.8. Vyhodnocení jakosti zkušebních odlitků	112
9.9. Návrh technologického postupu	114
10. SHRNUÍ VÝSLEDKŮ PRÁCE	116
10.1. Zhodnocení výsledků měření a výpočtu zá- kladních vlastností vybraných sádrových for- movacích směsí	116
10.2. Dílčí závěry ze zjišťování průběhu tuhnu- tí deskového odlitku v komb. formách	119
10.3. Zhodnocení výsledků poloprovozního odlévá- ní na nízkotlakém licím zařízení	120
11. ZÁVĚR	122
12. SEZNAM LITERATURY	124

1. ÚVOD

Úspěšné budování vyspělé socialistické společnosti je nemyslitelné bez neustálého rozvíjení a posilování materiálně technické základny. Pro podmínky ČSSR byly hlavní směry jejího rozvoje formulovány naposledy na XVII. sjezdu KSČ a v jeho závěrech. Ze závěrů XVII. sjezdu KSČ vyplývá, že hlavní důraz při rozvoji národního hospodářství je kladen na zavádění ekonomiky intenzivního typu založené na zvládnutí procesu vědeckotechnické revoluce. Tato dlouhodobá strategie je potřebná pro vytvoření podmínek realizace nových technologií vedoucích ke zvyšování technické úrovně výroby se snižujícími se náklady na spotřebu materiálů a energie.

Slévárenství, které je důležitou součástí celé strojírenské výroby, se musí orientovat na takové způsoby výroby odlitků, které umožňují snížit pracnost a spotřebu kovů ve strojírenské výrobě, což je spojeno s lepším využíváním a racionálnějším zhodnocováním kovů a snižováním kovového odpadu. To znamená, že všeobecná tendence stoupajících nároků na jakost průmyslových výrobků se ve slévárenství odráží ve zvýšených požadavcích na povrchovou a vnitřní jakost a rozměrovou přesnost odlitků.

Splnění tohoto náročného úkolu vyžaduje nejen cílevědomě rozvíjet stávající slévárenské metody, ale i hledat nové podstatně produktivnější a hospodárnější technologické postupy. Významnou úlohu v tom musí sehrát vědeckovýzkumná základna. Proto se na mnoha os. pracovištích v současné době řeší různé úkoly, jejichž cílem je na jedné straně upřesnění dosavadních poznatků a další hlubší poznání fyzikálního mechanismu

utváření požadovaných vlastností, tvaru a rozměru odlitků, na druhé straně pak odhalení nových metod a postupů, jimiž je možno těchto vlastností u odlitků dosáhnout. Zvýšení rozměrové přesnosti odlitků bylo dosaženo např. zavedením metody "C", horkých či studených jaderníků, metody "CT" atd. pro výrobu forem a jader. Kromě toho u všech těchto metod vzrostla proti klasickým formám z pískových formovacích směsí i produktivita práce. Jednou z metod, která zabezpečuje vyšší rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu, je odlévání do forem ze sádrových směsí. Součásti vyrobené touto technologií nevyžadují téměř další opracování a jejich tvarová a rozměrová přesnost bývá velmi dobrá. Tato perspektivní metoda se používá hlavně k výrobě tenkostěnných odlitků s vysokou jakostí povrchu a rozměrovou přesností.

Na katedře materiálu a strojírenské metalurgie VŠST v Liberci se již řadu let pracuje na řešení otázek, týkajících se výroby tzv. přesných odlitků. V letech 1970-85 byly řešeny úkoly P 15-124-001, 022 "Studium výroby odlitků litých do sádrových forem", V-124-001, 022 "Studium technologie a vlastností sádrových formovacích směsí" a V 119-203 "Technologie a vlastnosti forem ze sádrových směsí". V rámci těchto úkolů byla od roku 1979 věnována pozornost také problematice výroby odlitků ze slitin Al v kombinovaných formách "kovová forma - sádrové jádro".

Zásahy do krystalizace a tuhnutí odlitků jsou v současné slévárenské praxi již běžným způsobem aktivního ovládání vlastností odlitků. Může jít buď o zásahy metalurgické (ořkování, vliv tlaku apod.) nebo o ovlivňování teplotního pole odlitku a formy a tím i podmínek k dosažení požadované struktury odlitku.

Jedním z možných směrů aktivního ovládání výsledných vlastností odlitků je odlévání do tzv. kombinovaných forem. Kombinované formy jsou slévárenské formy vytvořené z několika částí, z nichž alespoň jedna se liší od ostatních použitým formovacím materiálem. V podstatě se jedná o formy, jejichž jednotlivé části jsou vyrobeny z materiálů s různými tepelně fyzikálními vlastnostmi /61/. Z velkého počtu možných kombinací jsou podle /41/ nejobvyklejší soustavy:

kovová forma - skořepinová forma;

skořepinová forma - forma na sádrové směsi;

forma ze směsi pro postup CO_2 - forma ze sádrové směsi;

kovová forma - forma ze sádrové směsi.

Zejména poslední z uvedených soustav, vyznačujících se již na první pohled značnými rozdíly ve vlastnostech použitých materiálů, je pro některé speciální případy odlitků s vysokými požadavky na rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu lákavá. Proto jsme se na katedře materiálu a strojírenské metalurgie VŠST v Liberci ve spolupráci s n.p. Tesla Pardubice ÚVR Opočíněk zaměřili na tuto problematiku s cílem vymezit podmínky a možnosti technologie a její ověření v laboratorních a poloprovozních podmínkách. Tato problematika je velmi rozsáhlá. Uplatňuje se tu celá řada materiálových, konstrukčních i technologických činitelů, s nimiž se musí při návrhu optimálních technologických podmínek počítat.

Předložená kandidátská práce, která byla zpracována jako součást řešení úkolu V-119/203, se zaměřuje na vývoj a ověření vhodné metodiky měření a návrh a ověření potřebného měřicího zařízení pro zjišťování tepelně fyzikálních vlastností (především součinitele tepelné akumulace) z různých formova-

cích materiálů, laboratorní ověření získaných výsledků na jednoduchých odlitcích tvaru desky a konkrétní poloprovozní ověření navrhované technologie na odlitku jednoduchého tvaru.

Při vlastním řešení uvedeného okruhu problémů byly vytýčeny tyto dílčí cíle:

1. provést podrobnější teoretický rozbor tuhnutí a chladnutí odlitku ve slévárenské formě a metod zjišťování rychlosti a doby tuhnutí odlitku;
2. navrhnout vhodnou metodiku měření, potřebné měřicí zařízení a postup zpracování výsledků k pokusnému určování součinitele tepelné akumulace forem;
3. výběr a odzkoušení vhodných aditiv do sádrových formovacích směsí a vhodných izolačních nátěrů kovových částí forem s cílem ovlivnit tepelnou akumulaci částí forem;
4. laboratorně ověřit nejvhodnější kombinace materiálů odléváním jednoduchého odlitku deskového tvaru;
5. prakticky ověřit dosažené výsledky při poloprovozním odlévání odlitku jednoduchého tvaru ze slitiny Al ve slévárně ÚVR Opočíněk.

Všechny tyto body jsou postupně rozpracovány v jednotlivých kapitolách předložené práce. Při jejich zpracování jsem vycházel jednak ze zkušeností a výsledků dosavadních prací prováděných na katedře, dále ze studia různých literárních podkladů (zejména sovětských) a z výsledků vlastního měření.

První část práce (kap. 2.-6.) je věnována shrnutí některých teoretických i praktických poznatků týkajících se tuhnutí a chladnutí odlitků ve slévárenských formách. Hlavní pozornost je zaměřena na rozbor tuhnutí odlitku v kombinované formě a na metody stanovení součinitele tepelné akumulace formovacích

materiálů. Vzhledem k tomu, že použití sádrových forem není v našich slévárnách běžnou záležitostí, je zde zařazena i kap. 6, ve které jsou shrnuty základní charakteristiky sádrových forem.

Těžiště vlastní práce je především v kap. 7. - 9., ve kterých je podrobně uveden princip a postup měření i zpracování výsledků, jeho ověření a zhodnocení. Tato část vyúsťuje v návrh technologického postupu výroby velmi přesných odlitků s hladkým povrchem ze slitin Al v kombinovaných formách "kovo-vá forma - sádrové jádro".

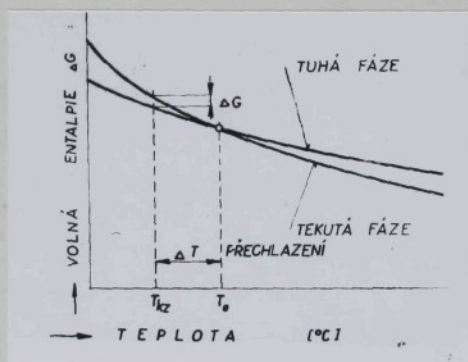
Práce byla v převážné míře řešena v podmínkách katedry materiálu a strojírenské metalurgie Vysoké školy strojní a textilní v Liberci.

2. ROZBOR TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ KOVU VE FORMĚ

2.1. Krystalizace slévárenských slitin

Při odlévání kovů a slitin kovů do forem musíme zabezpečit určité technologické pochody a operace, aby odlitek měl žádané mechanické a technologické vlastnosti. K tomu je nutné dokonale znát celý průběh přechodu odlitku z tekuté fáze do tuhé, protože je to jeden ze základních činitelů ovlivňujících velmi výrazně výsledné vlastnosti odlitku.

Krystalizace je fázová přeměna, při níž přechází tekutá fáze ve fázi tuhou. Příčinou tohoto složitého postupného děje je snaha látky dosáhnout při změně vnějších podmínek stavu, který odpovídá nejvyšší možné strukturní stabilitě. Tento stav je charakterizován minimální volnou entalpií ΔG (obr. 2.1).



Obr. 2.1. Termodynamické podmínky krystalizace /48/

Protože krystalizace je difuzní pochod s postupným zakládáním zárodků a jejich růstem, nemůžeme očekávat její započetí za teoretické teploty tuhnutí T_0 (teploty likvidu). Musí dojít k určitému přechlazení ΔT pod tuto teplotu, aby rozdíl

volné entalpie ΔG mezi fází nově vznikající a původní byl dostačující k podnícení krystalizace a aby byla zajištěna dynamika krystalizačního pochodu proti uvolňujícímu se skupenskému teplu krystalizace /48/.

Přechod taveniny v tuhou krystalickou fázi je možno ale-
dovat ze dvou hledisek: /82/ :

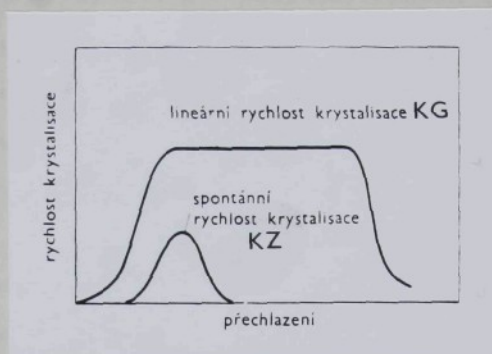
1. z hlediska rychlosti růstu nové fáze v závislosti na podmínkách odvodu tepla (tj. z hlediska přírůstku objemu vznikající tuhé fáze za daných podmínek ochlazování);
2. z hlediska mechanismu tuhnutí (tj. z fyzikálně chemického hlediska).

K otázkám rychlosti růstu nové fáze odvodil TAMMAN /23/ základní zákony krystalizace, které dávají obecný pohled na průběh krystalizace kovů. Tamman objevil vztahy mezi přechlazením taveniny, počtem vznikajících krystalizačních zárodků a rychlostí růstu krystalů. Podle těchto vztahů mají na velikost zrn vliv dva činitelé:

1. spontánní krystalizační schopnost KZ (počet krystalizačních center vznikajících za jednotku času v jednotce objemu);
2. lineární rychlost krystalizace KG (rychlost růstu krystalů v jednom směru).

Oba tyto činitelé závisí na teplotě a velikosti přechlazení taveniny. Obvykle se Tammanovy zákony uvádí v podobě diagramu (obr. 2.2).

Při velké krystalizační schopnosti KZ a malé krystalizační rychlosti KG je výsledná struktura tvořena jemnými zrny a naopak při malé KZ a velké KG vznikají hrubá zrna, popř. sloupkovité dendrity. Při velkém přechlazení řada látek schopnost spontánní krystalizace ztrácí a látky tuhnou amorfně jako



Obr. 2.2. Diagram krystalizace dle Tammana /23/

jako sklovitá hmota. Přesto, že Tamman zkoumal hlavně organické látky, mají tyto jeho závěry stále kvalitativní platnost.

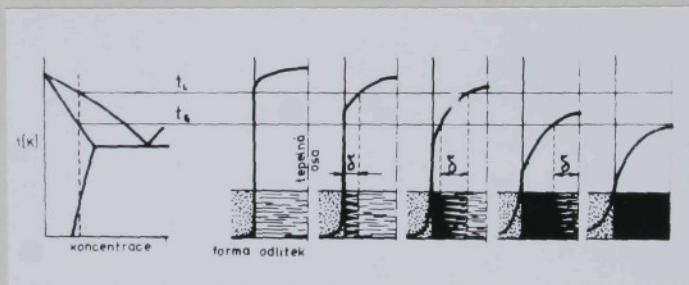
Dnes rozeznáváme dva typy tvorby zárodků: homogenní a heterogenní. Homogenní tvorbu zárodků můžeme definovat jako vytváření nové fáze bez pomoci cizích zárodků v tavenině. Při heterogenní nukleaci předpokládáme, že tuhá fáze krystalizuje na cizích zárodcích. Homogenní nukleace nastává při velkém přechlazení ΔT , ale jak udává VETIŠKA /82/ je tento způsob krystalizace možný jen za speciálních laboratorních podmínek. Za běžných podmínek nastává krystalizace tavenin při menším přechlazení, než je nutné pro homogenní nukleaci. Krystalizace je zde vyvolána přítomností různých vměstků, popř. stěn formy, které se stávají jejími iniciátory dříve, než může vzniknout přechlazení nutné k zahájení spontánní krystalizace.

2.2. Druhy tuhnutí

Zatímco pod pojmem krystalizace rozumíme tvoření zárodků, růst dendritů a tvorbu primární struktury odlitků, pod pojmem tuhnutí rozumíme vznik souvislé tuhé kovové vrstvy a její po-

stup směrem k tepelné ose odlitku. Průběh tuhnutí je dán teplotním polem v chladnoucím odlitku, které závisí na charakteristikách odlitku, tepelně fyzikálních vlastnostech slitiny a formy, podmínkách přestupu tepla z odlitku do formy, podmínkách odvodu tepla z formy a na celé řadě technologických podmínek.

V daném okamžiku je možno teplotní pole znázornit izotermami, což jsou plochy, jejichž body mají právě stejnou teplotu. Plocha, jejíž body mají v určitém okamžiku právě teplotu likvidu, se nazývá izolikvida a obdobně plocha, jejíž body mají právě teplotu solidu, se nazývá izosolida. Krystalizace slitiny probíhá mezi izolikvidou a izosolidou. Tato oblast se nazývá dvoufázové pásmo (pásmo tuhnutí). Okamžitá kolmá vzdálenost izolikvidy a izosolidy δ se nazývá šířka dvoufázového pásma (obr. 2.3) /49/.



Obr. 2.3. Postup tuhnutí odlitku dle /49/

V průběhu tuhnutí se všechny izotermy posouvají do středu odlitku. Místo, kde se setkávají izosolidy a kde tedy končí tuhnutí, se nazývá tepelná osa odlitku.

Tuhnutí charakterizované různě širokým dvoufázovým pásmem se označuje jako tuhnutí *n e p r o g r e s i v n í* (dvoufázové)

Toto tuhnutí je typické pro většinu technických slitin. Je-li šířka dvoufázového pásma tak velká, že po určitou dobu je v celém odlitku pouze směs krystalů a taveniny, mluvíme o tuhnutí o b j e m o v é m . U slitin eutektického složení a čistých kovů splývá izosolida s izolikvidou a tím vymizí i dvoufázové pásmo. Toto tuhnutí se označuje jako p r o g r e - s i v n í (vrstevnaté).

Při styku formy s tekutým kovem odvádí forma z kovu teplo, její teplota stoupá a teplota kovu klesá. Klesne-li teplota kovu na teplotu tuhnutí, nastává přechod kovu ze skupenství kapalného do skupenství tuhého a to postupně od stěny formy (jádra) směrem k tepelné ose odlitku. Čím rychleji odvádí forma z taveniny teplo, tím rychleji probíhá v tavenině krystalizační pochod, což se výrazně projeví na charakteru krystalizace a tím také na vlastnostech odlitku. Protože rychlost odvodu tepla z kovu formou je závislá na tepelně fyzikálních vlastnostech formy, plyne z toho závěr, že rychlost tuhnutí odlitku je limitována tepelně fyzikálními a geometrickými vlastnostmi formy /82/.

2.3. Rychlost tuhnutí

Podmínky pro přestup tepla z taveniny do formy během odlévání, tuhnutí a chladnutí odlitku se neustále mění. Při odlévání formy se uskutečňuje přechod tepla z taveniny do formy bezprostředně stykem tekoucího kovu se stěnami formy. Po odlití formy trvá určitou dobu ještě bezprostřední styk tekutého kovu se stěnami formy, ovšem s tím rozdílem, že kov je v klidu. Po čase se vytvoří určitá vrstva tuhého kovu (licí kůra) u stě-

ny formy (jádra) a tím se mění podmínky pro přestup tepla z odlitku do formy. Tato vrstva ztuhlého kovu neustále roste v závislosti na čase přibližně parabolicky. Vztah pro výpočet ztuhlé vrstvy v závislosti na čase odvodil CHVORINOV /23/:

$$\xi = k \cdot \sqrt{\tau} \quad (2.1)$$

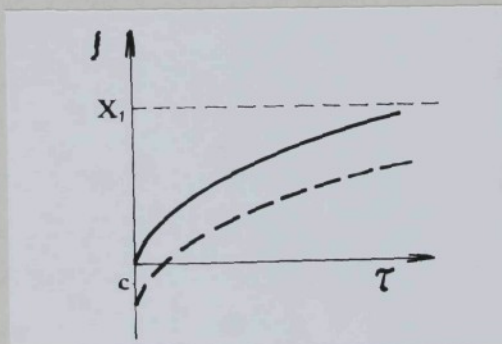
kde ξ - tloušťka ztuhlé vrstvy [m],

k - "konstanta" tuhnutí [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$],

τ - čas potřebný ke ztuhnutí vrstvy tloušťky ξ [s].

Při větších přehřátích taveniny nesouhlasí počátek tuhnutí s ukončením lití, ale je posunut o určitou dobu. Vztah (2.1) se pak mění na (2.2) /17, 50/ a křivka tuhnutí (obr. 2.4) se posouvá dolů.

$$\xi = -c + k \cdot \sqrt{\tau} \quad (2.2)$$



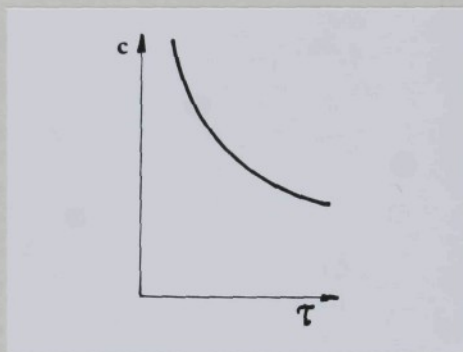
Obr. 2.4. Závislost tloušťky ztuhlé vrstvy na čase /50/

Vztah (2.2) platí všeobecněji pro všechny materiály a pro různé licí teploty. Přinese-li tavenina do formy větší teplo (je více přehřátá), chladne nejprve při stěnách, ale dokud nedosáhne teploty likvidu, potud její tuhnutí nezačne. Tuhnutí začne až po uplynutí doby od odlití.

S tím souvisí i okamžitá rychlost tuhnutí (je dána graficky tečnou ke křivce tuhnutí). Derivací vztahu (2.2) dle času dostaneme vztah (2.3) pro okamžitou rychlost tuhnutí c [m.s^{-1}]:

$$c = \frac{k}{2\sqrt{\tau}} \quad (2.3)$$

Grafické vyjádření této závislosti je na obr. 2.5.

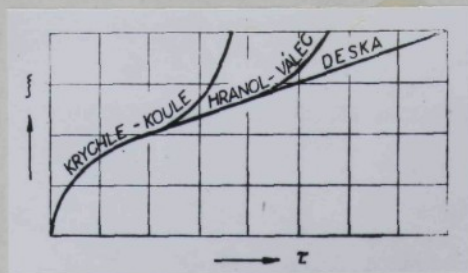


Obr. 2.5. Rychlost tuhnutí v závislosti na čase /50/

Na rychlost tuhnutí působí i některé další vlivy, které nejsou ze vztahů (2.1) a (2.2) patrné. Je to zejména tloušťka stěny odlitku. Čím silnější je stěna odlitku, tím později po odlití začne tuhnutí a tím pomalejší bude tuhnutí. U tenkostěnných odlitků je možno klást počátek tuhnutí i při určitém přehřátí do doby skončení lití. Také rychlost tuhnutí tenkostěnných odlitků je větší než u tlustostěnných. Na obr. 2.6 je graficky znázorněn průběh tuhnutí odlitku tvaru desky, válce a koule.

Z průběhu křivek je patrné, že na počátku tuhnutí je u všech tvarů stejná parabolická závislost, později se u odlitků tvarů válce a koule tuhnutí zrychluje.

Po vytvoření vrstvy tuhého kovu se v důsledku smršťování této tuhé vrstvy tvoří mezera mezi odlitkem a stěnami formy,



Obr. 2.6. Vliv tvaru odlitku na postup tuhnutí
/23, 50, 82/

takže odvod tepla z taveniny do formy se uskutečňuje jednak přes vrstvu tuhého kovu, jednak přes vzniklou mezeru. Tepelná vodivost mezery, která je vyplněna plyny, je menší než tepelná vodivost formy a tuhého kovu a tím se sníží intenzita odvodu tepla z taveniny. Tato mezera se neustále rozšiřuje v závislosti na smršťování odlitku a tepelných dilatacích formy. Její šířka je závislá na rozměrech odlitku a smrštění odlévaného kovu. Charakter odvodu tepla z odlitku se pak až do úplného vychladnutí odlitku nemění /82/.

2.4. Konstanta tuhnutí

Ze vztahů (2.1), (2.2) a (2.3) je vidět, že největší význam při tuhnutí má konstanta tuhnutí k . Čím je tato konstanta větší, tím rychlejší je tuhnutí a tím rychleji narůstá ztuhlá vrstva. Konstanta tuhnutí závisí na vlastnostech slitiny, formy, na konstrukci odlitku aj. Přesné stanovení konstanty tuhnutí výpočtem je velmi obtížné. Konstanty tuhnutí udávané různými autory se navzájem značně liší. Jako nejvhodnější se ukazuje stanovovat konstantu tuhnutí podle skutečně ztuhlé vrstvy kovu v jednotce času (tedy podle izosolidy). CHVORINOV

/23/ např. uvádí vztah, který je odvozen z diferenciální rovnice pro tepelnou rovnováhu v rovině tuhnutí:

$$l_{kr} \cdot \rho_l \cdot \frac{\pi}{2} \cdot k = b_s \cdot \frac{\frac{k^2}{e^{4a_s}}}{\frac{b_s}{b_2} + \operatorname{erf}\left(\frac{k^2}{4a_s}\right)} \cdot t_{kr} - (t_l - t_{kr}) b_2 \frac{\frac{k^2}{e^{4a_1}}}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{k^2}{4a_1}\right)} \quad (2.4)$$

kde k - konstanta tuhnutí $[m.s^{-1/2}]$,

l_{kr} - skupenské teplo tuhnutí $[J.kg^{-1}]$,

ρ_l - měrná hmotnost tekutého kovu $[kg.m^{-3}]$,

b_s - koef. tepel. akumulace tuhého kovu $[W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}]$,

b_1 - " " - tekutého kovu $[W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}]$

b_2 - " " - formy $[W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}]$,

t_l - teplota lití $[^{\circ}C]$,

t_{kr} - teplota tuhnutí $[^{\circ}C]$,

a_l - souč. teplotní vodivosti tavenina $[m^2.s^{-1}]$,

a_s - " " - tuhého kovu $[m^2.s^{-1}]$,

$\operatorname{erf}(x)$ - Gausův integrál chyb

Tato rovnice podle zvolených předpokladů platí pro polonekonečnou hmotu kovu a tak může řešení platit pro odlitky konečné tloušťky pouze pro začátek tuhnutí. Začáteční stav, pro který uvedená rovnice přesně platí, je však tak krátký, že činí pouze zlomek lici doby /23/.

Nejčastěji je uváděn a používán empirický vztah pro výpočet konstanty tuhnutí podle NECHENDZIHO /43/:

$$k = 1,158 \cdot \frac{t_s \cdot b_2}{l_{kr} + (t_l - t_s) \cdot c_s \cdot \rho_s} \quad (2.5)$$

kde t_s - teplota solidu litého kovu $[^{\circ}C]$,

b_2 - koeficient tep. akumulace formy $[W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}]$,

l_{kr} - skupenské teplo odlévání kovu $[J.kg^{-1}]$,

t_l - lici teplota $[^{\circ}C]$,

c_s - měrné teplo kovu při ztuhnutí [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],

ρ_s - měrná hmotnost kovu při ztuhnutí [$kg \cdot m^{-3}$].

Vztah (2.5) zahrnuje prakticky všechny činitele, kteří mají vliv na rychlost tuhnutí (teplota solidu, koeficient tepelné akumulace formy a ve jmenovateli tepelný obsah litého kovu). Hodnoty konstant $\underline{k}$ stanovené pro některé slitiny jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tab. 2.1. Hodnoty konstant tuhnutí $\underline{k}$ pro různé materiály odlitku a formy dle Přibyla /50/

Materiál odlitku	Materiál formy	$k \text{ m} \cdot \text{s}^{-1/2}$
šedá litina	písková forma	0,00067
	kokila	0,00280
hliník	kokila	0,00400
ocel	písková forma	0,00100
	kokila	0,00333

Častěji se stanovuje konstanta tuhnutí $\underline{k}$ experimentálně tzv. vylévacím pokusem. Výsledky takto získané jsou poměrně přesné u slitin tuhoucích progresivně, kde lze dobře proměřovat tloušťku ztuhlé vrstvy. Princip metody spočívá v tom, že se do několika forem odlévá odlitek tvaru polonekonečné desky (délka a výška musí být min. 6x větší než tloušťka desky) z jedné slitiny o stejné lící teplotě. V předem určených časových intervalech se pak postupně z jednotlivých forem vylévá tekutý kov a měří se tloušťka vrstvy kovu, která za tuto dobu ztuhla. Ze vztahu (2.1) se potom vypočítává konstanta tuhnutí $\underline{k}$ /80,82/. Konstanta tuhnutí může být v průběhu tuhnutí stejná nebo proměnná. To platí jak pro tuhnutí progresivní, tak i dvoufázové.

Protože se ztuhlá kůra vlitého odlitku obtížně a někdy i s malou přesností dá proměřit, je nutné zkoušky opakovat. Takto lze stanovit nejen konstantu tuhnutí, ale současně i určit její změnu v průběhu tuhnutí s přehřátím, s odléváním do forem z různých materiálů apod.

3. METODY ZJIŠŤOVÁNÍ RYCHLOSTI A DOBY TUHNUTÍ ODLITKU

Zjišťování rychlosti a doby tuhnutí odlitku je důležitým úkolem taprie tuhnutí. Cílem je najít řešení, jehož pomocí by bylo možné jednak v každém časovém okamžiku určit tloušťku ztuhlé vrstvy kovu, jednak určit okamžik, kdy tuhnutí odlitku skončilo. Tímto problémem se zabývalo mnoho autorů, kteří vypracovali různé metody řešení. Používané metody je možno dle VETLIŠKY /82/ rozdělit do 4 skupin:

- a) matematické řešení rychlosti tuhnutí,
- b) aproximativní metody,
- c) použití modelové techniky,
- d) experimentální zjišťování průběhu tuhnutí.

3.1. Matematické řešení průběhu tuhnutí

3.1.1. Přestup tepla z roztaveného kovu do formy

Odvádění tepla roztaveného kovu formou je nestacionární tepelný pochod. Teplota jednotlivých bodů soustavy odlitek - forma se s časem mění. Rychlost tepelného děje při nestacionárním průběhu průtoku tepla je závislá na teplotní vodivosti a tělesa

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \varrho} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (3.1)$$

kde λ - tepelná vodivost $[J \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,

c - měrné teplo $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$,

ϱ - měrná hmotnost $[kg \cdot m^{-3}]$.

Koeficient teplotní vodivosti a je pro výpočty nestacionárních dějů stejně významný jako koeficient tepelné vodivosti při dě-

jích stacionárních. Při řešení nestacionárního tepelného děje je nutno najít závislost teploty a množství sdíleného tepla podle času a pro libovolný bod tělesa. Tyto závislosti dávají diferenciální rovnice vedení tepla.

Pro průtok tepla jakoukoli pevnou látkou, tedy i tuhým kovem a formou platí při třírozměrném teplotním poli Fourierova diferenciální rovnice průtoku tepla [82/:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = a \cdot \nabla^2 t \quad (3.2)$$

kde $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ je Laplaceův operátor

τ - čas

t - teplota.

Matematické řešení rovnice (3.2) se zjednodušuje tím, že se uvažuje průtok tepla jen jedním směrem. Rovnice se tím upraví na tvar

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (3.3)$$

Někdy se mohou při řešení problému vyskytovat kladné či záporné zdroje tepla (uvolňování krystalizačního tepla, vypařování vlhkosti apod.). Toto teplo musíme k akumulovanému teplu buď připočítat, jde-li o kladný zdroj, anebo od něho odečíst, jde-li o záporný zdroj. Rovnice (3.2) pak bude mít tvar

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 t + \frac{L}{c \cdot \varphi} \quad (3.4)$$

kde L - množství tepla, buď vzniklého zdrojem tepla, nebo pohlceného za jednotku času v jednotce objemu.

Přenos tepla v tavenině je složitější než v látce tuhé, protože teplo se zde sdílí také konvencí (prouděním), což znamená, že uvažovaný elementární objem se pohybuje. Uvažujeme-li změnu teploty (nebo jiné fyzikální veličiny) v závislosti na

čase a zároveň změny způsobené přemístěním elementu z jednoho bodu prostoru do jiného bodu, dostaneme vztah /82/:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial t}{\partial x} + v_y \frac{\partial t}{\partial y} + v_z \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha \cdot \nabla^2 t \quad (3.5)$$

kde v_x, v_y, v_z - rychlost přemísťování elementu ve směru os x, y, z

Rovnice (3.5) je Fourier-Kirchhoffova diferenciální rovnice vedení tepla pro tekutý kov.

Při proudění taveniny ovšem vzniká také tření, které rovněž musíme při řešení průtoku tepla taveninou uvažovat. Je vidět, že sdílení tepla v tavenině je podmíněno nejen tepelnými, ale též hydrodynamickými pochody a že v tomto případě nestačí k řešení jedna diferenciální rovnice, ale celá soustava diferenciálních rovnic.

Proto se musí při řešení průběhu tuhnutí zavést celá řada okrajových podmínek, které obvykle udávají:

1. geometrické podmínky, charakterizující tvar a rozněr tělesa, v němž děj probíhá;
2. fyzikální podmínky, které charakterizují fyzikální vlastnosti tělesa a prostředí;
3. mezní podmínky, které popisují zvláštnosti pochodu v mezní vrstvě povrchu tělesa;
4. časové podmínky, které charakterizují časový průběh pochodu.

Tyto okrajové podmínky nám určují jednoznačnost řešení rovnice (3.3) pro daný případ. Dále se řešení usnadňuje tím, že se připouští zjednodušující podmínky. Výsledek matematického řešení diferenciální rovnice má dát takovou funkci, která by zároveň vyhovovala diferenciální rovnici a okrajovým podmínkám. VETIŠKA /82/ uvádí celou řadu matematických řešení dané rovnice.

Jednotlivé způsoby řešení jsou nazvány podle autorů, kteří uvedené řešení vypracovali (řešení podle Carlslaw-Jaegera, řešení podle Neumana, řešení dle Lighfoota, řešení dle Schwarze a další).

Dnes všeobecně rozšířené je řešení dle Schwarze, které tvoří základ různých poloempirických řešení /82/. Z tohoto řešení vychází rovněž CHVORINOV /23/, který dále experimentálně zjistil, že pomocí tzv. střední konstanta tuhnutí lze vypočítat dobu tuhnutí odlitků konečných rozměrů, libovolných tvarů a libovolné velikosti, jestliže se do výpočtu zavede tzv. relativní tloušťka odlitku

$\underline{R}$:

$$R = \frac{V}{P} \quad [m] \quad (3.6)$$

Doba tuhnutí libovolného odlitku pak je dle CHVORINOVA /23/

$$\tau_s = \left(\frac{R}{k} \right)^2 \quad (3.7)$$

Za předpokladu, že hodnota $\underline{R}$ není jen charakteristickou veličinou pro určení celkové doby tuhnutí τ_s , nýbrž i pro libovolný okamžik během tuhnutí, dá se pomocí rovnice

$$\xi = R = k \cdot \sqrt{\tau} \quad (3.8)$$

určit postup roviny tuhnutí.

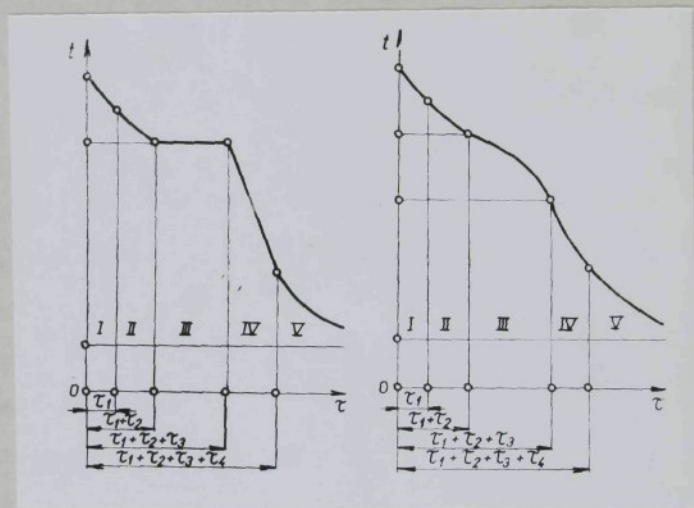
Jak uvádí HORÁČEK a RUSÍN /21/, je označení hodnoty $\underline{R}$ jako relativní (redukovaná) tloušťka odlitku nesprávné, protože tomuto názvu z hlediska rozměrové analýzy neodpovídá rozměr $[m]$, který výše definovaná veličina má. Správnější je tedy z tohoto hlediska pojem modul $\underline{M}$ zavedený pro stejnou veličinu WŁODAWEREM /84/. Určování doby tuhnutí tepelných uzlů pomocí jejich modulů věnovala značnou pozornost celá řada autorů. U nás to byli hlavně PŘIBYL /51,53/, HORÁČEK a RUSÍN /21/ a další /59 aj./.

3.1.2. Řešení podle Vejníka

Práce VEJNIKA o problematice tuhnutí jsou velmi rozsáhlé a zasahují téměř do všech způsobů odlévání odlitků [74,73,75, 76,77,78/]. Vejník vypracoval řešení pro tuhnutí odlitků nej-různějších tvarů v pískových formách, kokilách, odlitků litých pod tlakem, odstředivě, určil vliv nátěrů forem na tuhnutí apod.

3.1.2.1. Analýza změny stavu kovu

Vejníkův způsob řešení problémů tuhnutí je odlišný od ostatních metod v tom, že odvod tepla z kovu rozděluje do pěti stádií (obr. 3.1).



Obr. 3.1. Průběh chlazení kovu ve formě dle VEJNIKA [75/

- a) kov tuhnoucí při jedné teplotě,
- b) kov tuhnoucí v intervalu teplot.

1. stádium τ_1 - je doba odvádění tepla z kovu během odlévání formy (doba lití), která je závislá na velikosti formy a na hydromechanických podmínkách lití.

2. stádium τ_2 - doba odvádění tepla přehřátí kovu. Toto stádium končí v okamžiku, kdy poslední část tekutého kovu dosáhne teploty likvidu. Toto stádium ovlivňuje více nebo méně probíhající přirozená konvekce, která má vliv na tepelnou podle odlitku.
3. stádium τ_3 - doba odvádění skupenského tepla tuhnutí. Toto stádium končí v okamžiku, kdy teplota naposledy tuhnoucí části taveniny klesne pod teplotu solidu. Toto stádium má největší význam, protože v této době probíhá tuhnutí odlitku a formují se nejdůležitější vlastnosti odlitku.
4. stádium τ_4 - doba chladnutí ztuhlého odlitku ve formě. Toto stádium začíná v okamžiku ztuhnutí veškerého kovu ve formě. Probíhají zde fázové i strukturální přeměny, vznikají tepelná pnutí apod.
5. stádium τ_5 - doba chladnutí odlitku mimo formu.

Při vlastním procesu odlévání a tuhnutí se v jednotlivých případech mohou některá stádia krýt nebo i zanedbat. Např. při rychlém lití do malých forem můžeme zanedbat dobu lití, nebo při malém přehřátí, nebo při dlouhém odlévání, kdy kov ztratí své přehřátí ještě v průběhu odlévání, je možno zanedbat stádium odvádění tepla přehřátí. Nebo v případě, kdy se odlitek nechá vychladnout ve formě až do teploty okolí, můžeme zanedbat páté stádium atd. /75/.

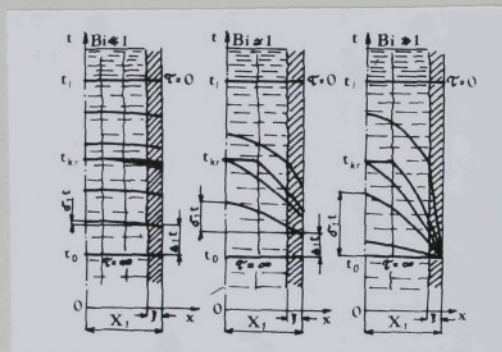
Analýza dále ukázala, že jednotlivá stádia ochlazování odlitku se mohou vzájemně více či méně ovlivňovat. Často proces tuhnutí (3. stádium) začíná již v průběhu lití kovu (stádium 1. a 2.) a současně může dojít k poklesu teploty povrchové vrstvy odlitku pod teplotu solidu (4. stádium). S tím vším se musí počítat při řešení dané úlohy.

3.1.2.2. Rozložení teplot v odlitku

Na obr. 3.2 je znázorněno všech pět stádií chlazení odlitku v závislosti na intenzitě výměny tepla mezi odlitkem a formou. Za hlavní charakteristiku intenzity odvodu tepla kovu formou volí VEJNÍK /75,76 aj./ tzv. Biotovo kritérium Bi ve tvaru:

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda_1} \cdot X \quad (3.9)$$

kde α - součtový součinitel přestupu tepla [$W.m^{-2}.K^{-1}$],
 λ_1 - součinitel tepelné vodivosti kovu [$W.m^{-1}.K^{-1}$],
 X - charakteristický rozměr odlitku [m].



Obr. 3.2. Rozložení teplot v průřezu odlitku při různé intenzitě odvodu tepla odlitku formou dle VEJNÍKA /75/. Kov tuhne při konstantní teplotě t_{kr} .

Jak je vidět z obr. 3.2, tak při střední $Bi \approx 1$) a velké ($Bi \gg 1$) intenzitě odvodu tepla se teplota kovu nestačí po průřezu odlitku vyrovnávat a v odlitku se vytvoří strmý příčný teplotní gradient $\delta_x t$, tzn., že v určitém časovém okamžiku se překrývá několik stádií odvodu tepla z kovu. V případě malé intenzity odvodu tepla ($Bi < 1$) se vytvoří v odlitku mírný teplotní gradient, tzn., že překrývání jednotlivých stádií můžeme zanedbat /75/.

3.1.2.3. Přestup tepla z kovu do formy přes vzniklou mezeru

Pro přestup tepla z kovu do formy přes vzniklou mezeru mezi odlitkem a formou zavádí VEJNIK /76/ součtový součinitel přestupu tepla β a místo Biotova kritéria Bi kritérium K :

$$K = \frac{\beta}{\lambda} \cdot x \quad (3.10)$$

Pomocí tohoto kritéria vyjadřuje Vejnik jak vliv odlitku na intenzitu výměny tepla

$$K_1 = \frac{\beta}{\lambda_1} \cdot x_1 \quad (3.11)$$

tak i vliv formy

$$K_2 = \frac{\beta}{\lambda_2} \cdot x_2 \quad (3.12)$$

kde $\beta = \frac{\lambda_m}{X_m}$ - součtový součinitel přestupu tepla přes vzniklou mezeru $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$,

λ_1 - tepelná vodivost kovu $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,

x_1 - charakteristický rozměr odlitku $[m]$,

λ_2 - tepelná vodivost formy $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,

x_2 - charakteristický rozměr formy $[m]$.

Kritéria K_1 a K_2 mají stejný význam jako Biotovo kritérium Bi. Dále Vejnik předpokládá, že příčný teplotní gradient v odlitku má tvar paraboly o exponentu n, který může mít různou hodnotu v závislosti na tepelně fyzikálních vlastnostech formy.

V dalších pracích uvádí VEJNIK /75,76,77 a další/ řešení problému tuhnutí odlitků různých geometrických tvarů litých za různých podmínek. Ukazuje také, jak při navrženém způsobu řešení respektovat změnu tepelně fyzikálních parametrů v závislosti na změně teploty. Zjednodušující podmínky jsou v podstatě stejné jako u jiných metod. Určitým nedostatkem této metody

je, že stupeň přesnosti výpočtu závisí na správném určení stupně paraboly n_s .

3.2. Aproximativní metody

Aproximativní metody řešení problému tuhnutí si na rozdíl od analytických metod nekladou za cíl přesné matematické řešení, ale snaží se pomocí jednoduchého řešení dospět k co nejpřesnějším výsledkům. VETIŠKA /80/ řadí mezi aproximativní metody:

- a) poloempirické řešení průběhu tuhnutí,
- b) grafické metody řešení průběhu tuhnutí,
- c) numerické metody,
- d) analogické metody,

Poloempirické řešení se liší od teoretického v tom, že se snaží určovat konstantu tuhnutí k z jednoduché rovnice, vytvořené na základě zjednodušujících předpokladů a tím se vyhýbá obtížnému a pilouhavému řešení příslušných diferenciálních rovnic.

Z grafických metod je neznámější Schmidtova metoda konečných rozdílů. Její podstatou je náhrada diferenciální Fourierovy rovnice průtoku tepla při jednorozměrném teplotním poli rovnicí diferenční ve tvaru:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \alpha \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (3.13)$$

Mezi grafické metody patří také řešení tuhnutí odlitků pomocí různých nomogramů.

Řešení průběhu tuhnutí numerickými metodami se dají získat výsledky, které s dostatečnou přesností odpovídají skutečnému průběhu tuhnutí. Běžným základem numerického řešení je metoda elementárních tepelných bilancí. Při tomto řešení není nutné

zavádět zjednodušující předpoklady a je možno uvažovat i změnu hodnot tepelně fyzikálních vlastností v závislosti na teplotě. Nevýhodou numerického řešení je velká pracnost, a proto se používá ve spojení se samočinnými počítači /82/.

Podstatou analogických metod je formální shoda (podobnost) mezi rovnicemi průtoku tepla a rovnicemi popisujícími některé podobné fyzikální jevy. Přitom musí být zachována i podobnost počátečních a okrajových podmínek a podobnost geometrická. Pro sledování tepečných dějů ve slévarenské formě tuto metodu u nás rozpracovali KAVIČKA a ŠIMONÍK /27,28,29/ a VETIŠKA /81/. Tito autoři považují analogovou metodu za jednu ze dvou výhledových metod (vedle numerické) k provádění komplexní analýzy teplotního pole formy a odlitku při tuhnutí.

3.3. Použití modelové techniky

Podstata této metody je v tom, že se na modelech zjišťuje průběh tuhnutí a naměřené výsledky se pak aplikují na průběh tuhnutí reálných odlitků. Modelování rozeznáváme fyzikální a matematické /66/. Modelováním procesu tuhnutí rozumíme:

- a) napodobení tohoto děje nějakým jiným dějem, který lze popsat stejnou diferenciální rovnicí, jaká platí i pro vedení tepla (princip hydraulické a el. analogie);
- b) sledování tuhnutí na látkách, které mají podobné vlastnosti jako slévarenské kovy a slitiny. Při výběru materiálu musíme dbát na to, aby průběh izoterm byl stejný u modelu i u skutečného odlitku. Z literatury je známé použití stearinu a jeho směsí s parafinem, příp. naftalenem /12,23,69/. V práci GULAJEVA /12/ je rozebrán další způsob modelování v podmín-

kách trojrozměrného tuhnutí - přerušované tuhnutí stearinu. Výsledky prací /12,23/ však nejsou podloženy teoretickým zdůvodněním možnosti aplikace výsledků na skutečný odlitek. Tato aplikace je možná pouze v případě plné podobnosti mechanismu tuhnutí. K tomu je třeba získat řadu kritérií použitím teorie podobnosti /48/.

3.4. Experimentální zjišťování průběhu tuhnutí

Při experimentálním zjišťování průběhu tuhnutí se používá přímého měření rychlosti postupu tuhé vrstvy kovu v závislosti na čase. Z naměřených hodnot se pak vypočítává hodnota konstanty tuhnutí k , která se pak dosahuje do vztahu (2.1). Tento vztah vychází z potvrzeného předpokladu, že průtok tepla v tuhých tělesech má parabolický průběh, a že tedy i průběh tuhnutí se musí řídit tímto parabolickým zákonem. CHVORINOV /23/ a VETIŠKA /82/ uvádějí celou řadu způsobů experimentálního zjišťování průběhu tuhnutí, z nichž nejznámější jsou:

- a) metoda vylévací zkoušky, která byla podrobněji popsána v kap. 2.4. Vylévací zkouška není vhodná tehdy, když se při tuhnutí tvoří široké dvoufázové pásmo (slitiny s velkým intervalem tuhnutí) příp. v případech formy s malou schopností odvodu tepla, protože v takových případech není možno přesně měřit ani tloušťku ztuhlé vrstvy kovu, ani není možno přesně určit počátek a konec tuhnutí /6/;
- b) metoda přímého měření teplotního pole odlitku a formy. Měří se pomocí termočlánků zabudovaných jak do odlitku, tak do formy. Tato metoda usnadňuje analýzu teplotního pole odlitku i formy, ovšem je proveditelná jen za určitých předpokladů

(druh použité formy, druh použitých termočlánků) a při nedokonalém měření se získají poměrně velmi zkreslené výsledky;

- c) metoda přímého měření teploty odlitku a stanovení konce tuhnutí odlitků různých velikostí a tvarů. Tato metoda nám umožňuje stanovit podle prodlevy na křivce teplota-čas dobu tuhnutí odlitku a tak i vztah mezi dobou tuhnutí a rozměry (modulem) odlitku. Je to zkouška velmi účelná, která dovoluje stanovit jak průměrnou konstantu tuhnutí, tak i vliv různých faktorů (vliv přehřátí kovu na dobu tuhnutí, vliv tepelně fyzikálních vlastností formy na konstantu tuhnutí apod.) nemůže však přímo zjistit prostorový a časový postup tuhnutí a tvoření kůry odlitku během tuhnutí;
- d) metoda sledování průběhu tuhnutí podle makrostrukturních vrstev. Tato metoda má několik modifikací:

1. přidáváním nějakého stopovacího prvku (síry, radioaktivní prvky apod.) do taveniny během tuhnutí lze vymezit oblast taveniny proti ztuhlé fázi;
2. vibrací formy během tuhnutí vzniknou ve struktuře vrstvy, podle nichž lze usuzovat na průběh tuhnutí.

Při experimentálních metodách zjišťování průběhu tuhnutí mohou vzniknout různé okolnosti v prováděcí technice i metodě, které způsobují odchylky nebo i systematické a metodické chyby. Základním požadavkem proto je kontrola pokusů různými metodami /23/.

3.5. Zhodnocení jednotlivých metod

Podrobnější popis a zhodnocení metod zjišťování průběhu tuhnutí byl proveden v práci /62/. Při posuzování jednotlivých

metod, řešících problém tuhnutí odlitku, je možno za nejvýhodnější považovat numerické metody použité v kombinaci s počítačem. Matematické metody hledají řešení Fourierovy diferenciální rovnice průtoku tepla v soustavě odlitek-forma. Protože tento děj je ovlivněn celou řadou činitelů, zavádí se při řešení celá řada zjednodušujících předpokladů, které nutně vedou k nepřesným výsledkům /82/. Poloempirické metody používají jednodušší postupy oproti matematickému řešení a za určitých podmínek dávají zhruba stejné výsledky. Analogické metody nahrazují řešení matematických rovnic fyzikálními pochody. Jejich nevýhodou však je pracné a nákladné potřebné zařízení, ale jinak ve spojení s počítačem dávají velmi dobré výsledky. Význam použití modelové techniky záleží v tom, že můžeme jak na základě měření, tak i vizuálního posouzení průběhu tuhnutí na modelu usuzovat na průběh tuhnutí v důležitých tepelných uzlech reálného odlitku, na vznik staženin atd. Z experimentálních metod má v současné době největší význam metoda přímého měření teplotních polí odlitku a formy, která při pečlivém provedení dává poměrně přesné výsledky i na složitějších odlitcích.

4. TEPELNĚ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI FORMOVACÍCH MATERIÁLŮ^o

Intenzita, s jakou forma pohlcuje teplo z odlitku, se může značně lišit se změnou materiálu formy. Ochlazovací účinek formy spočívá nejen v přímém pohlcování tepla, ale i v určitém rozptýlení tohoto tepla sáláním a konvekcí. Rozptýl bude tím větší, čím vyšší je teplota formy a intenzivnější cirkulace okolního prostředí. Ochlazovací účinek formy závisí na její tepelné vodivosti a na jejím objemu. Čím větší je tepelná vodivost materiálu formy, tím intenzivnější je ochlazovací účinek, protože dojde k vyššímu zahřátí stěn formy a větší množství tepla je tím akumulováno a rozptýleno po celé formě /1/.

Čím větší je objem formy, připadající na jednotku povrchu odlitku, tím větší množství tepla, za jinak stejných podmínek, může být ve formě akumulováno. Při ochlazování však nezáleží jen na teple akumulovaném, ale i na teple rozptýleném. Tak např. tenkostěnná forma je schopna odvést větší množství tepla z odlitku než forma tlustostěnná v případě, že tenkostěnná forma je intenzivně ochlazována a rozptýluje tak větší množství tepla, než může akumulovat forma tlustostěnná /75/.

Ke stanovení ochlazovacího účinku formy je nutné znát její tepelnou vodivost λ_2 , měrné teplo C_2 , měrnou hmotnost ρ_2 . Jejich kombinací dostáváme hlavní charakteristiku ochlazovacího účinku formy tzv. součinitel tepelné akumulace b_2 :

$$b_2 = \sqrt{\lambda_2 \cdot C_2 \cdot \rho_2} \quad (4.1)$$

a součinitel teplotní vodivosti a :

$$a_2 = \frac{\lambda_2}{C_2 \cdot \rho_2} \quad (4.2)$$

Konkrétních hodnot b_2 potřebných pro výpočty doby tuhnutí je v literatuře poměrně málo a jsou udávány v širokém rozmezí. Hodnoty b_2 některých formovacích materiálů jsou uvedeny v tab. 4.1.

Tab. 4.1. Součinitel tepelné akumulace různých materiálů

Materiál	Teplota [°C]	$b_2 [W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}]$	lit.:
ocel uhlíková	100-1500	14518 - 12784	/82/
		11883	/1/
litina 3% C	100-1300	14518 - 13400	/82/
	100	14520	/75/
železo	100-1538	22964 - 27222	/58/
písčito-hlinitá směs sušená s 10% hlíny	20-1500	1400 - 1750	/82/
	20-1500	1395	/75/
sádra	80-120	384 - 740	/32/
chrommagnezit s vodním sklem	20-1500	3500 - 3850	/82/
šamotová směs	20-1500	2100 - 2450	/58/
měď	100-1083	36714 - 37203	/58/
mosaz (10% Zn)	100-1050	19753 - 25919	/58/
směs CT - SiO ₂		1493 - 1880	/51/
směs CT - CrMg		2265 - 3600	/51/
asbest listový		908	/51/
vazná směs s vodním sklem		110 - 1377	/51/

4.1. Určování součinitele b_2

Jak již bylo dříve řečeno, je v současné literatuře nedostatek jak hodnot tepelně fyzikálních součinitelů formovacích materiálů, tak i konstant odlévavých kovů a slitin kovů. Jsou-li

tyto hodnoty uvedeny, značně se od sebe liší v závislosti na použité metodě jejich zjišťování. ANISOVIČ /1/ uvádí, že v mnoha případech byly tyto součinitele zjišťovány metodami, které dávají nesprávné představy o procesech probíhajících ve formě. Při určování tepelné fyzikálních součinitelů je dále nutné vzít v úvahu rozměry zkušebních odlitků. Např. deskovité odlitky tuhnou rychleji v nekonečné formě, která předává teplo pouze čelní plochou. Termočláanky určující teplotní pole formy musí být umístěny proti středu odlitku. Průměr drátů termočláanků nemá být větší než 0,5 mm a průměr hlaviček teplých spojů ne větší než 0,7-0,8 mm. Větší průměry hlaviček zkreslují pole formy a způsobují omyly společně s chybami odměření vzdáleností teplých spojů termočláanků od odlitku /1/.

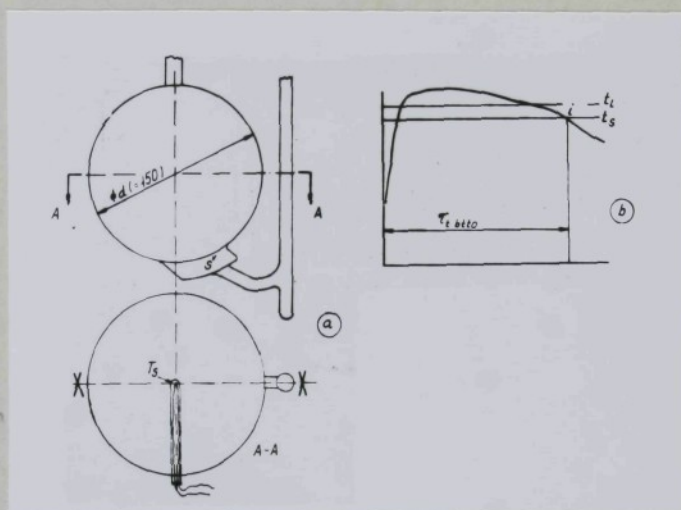
Při určování součinitele tepelné akumulace b_2 se nejčastěji používá metod přímého měření teplotních polí odlitku a formy, neboť při pečlivém provedení dávají nejpřesnější výsledky /52, 62/.

4.1.1. Stanovení k a b_2 podle WLODAWEŔA /84/

Wlodawer vychází ze skutečnosti, že různá tělesa o stejném modulu tuhnou stejnou dobu (za předpokladu, že tuhnutí probíhá za stejných podmínek daných slitinou a formou). Základním odlévaným tělesem je koule - forma o průměru $d = 150$ mm, jejíž modul $M = d/6 = 0,025$ m. Do tepelného středu odlitku (který uvažuje za totožný s geometrickým středem) je zabudován spoj termočláanku T_s . Uspořádání pokusu je patrné z obr. 4.1. Pomocí tohoto termočláanku se získá křivka chladnutí ve středu odlitku a z ní okamžik konce tuhnutí. Ze známé hodnoty modulu M a naměřené celkové doby tuhnutí T_1 se ze vztahu (4.3) vypočítá sou-

šinitel tepelné akumulace b_2 :

$$\tau_3 = \left(\frac{M}{K} \right)^2 = \left[\frac{M \cdot \rho_L [l_r + C_L (t_L - t_{rr})]}{1,158 \cdot b_2 (t_{kr} - t_{zp})} \right]^2 \quad (4.3)$$



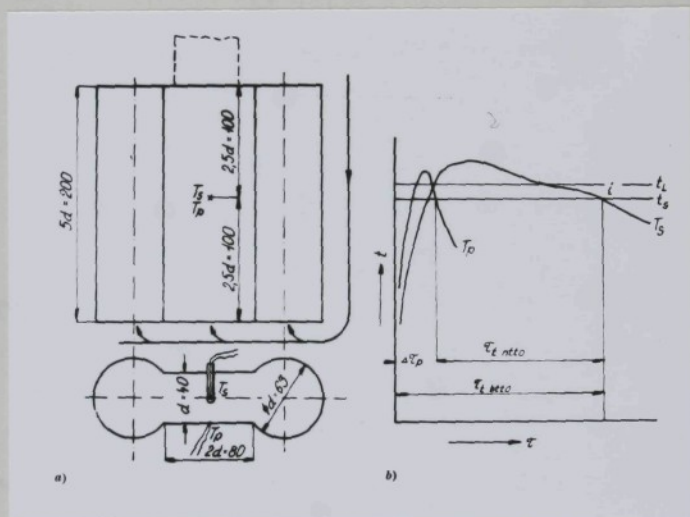
Obr. 4.1. Schema měření b_2 dle Wlodawera /52/

- a) základní těleso se zakreslenou polohou termočládku,
- b) křivka chlazení středu koule

4.1.2. Stanovení b_2 podle PŘIBYLA /52/

Přibyl kriticky zhodnotil metodu stanovení b_2 podle Wlodawera a navrhl vlastní metodu. Z rozboru nedostatků předchozí metody vychází jako vhodnější zkušební těleso deska o tloušťce d , která je uměle vytvořena jako nekonečná připojením svislých válcovitých okrajů, které mají stejný modul jako deska, tj. $d/2$. Průměr těchto válcovitých okrajů vychází $1,56 d$. Tvar a rozměry pokusného odlitku jsou znázorněny na obr. 4.2. Jeden spoj termo-

článek se umístí do středu (tepelné osy) desky a to ve vodorovném i svislém směru. Tepelný střed odlitku bude totožný s geometrickým středem i za předpokladu, že se tavenina při tuhnutí přemísťuje. Křivka chladnutí středu desky ukáže i konec tuhnutí a tedy i celkovou dobu tuhnutí, která odpovídá zvolené lici teplotě. Na povrch desky je umístěn spoj druhého termočlánku, rovněž v polovině výšky desky. Tento termočlánek přímo měří dobu

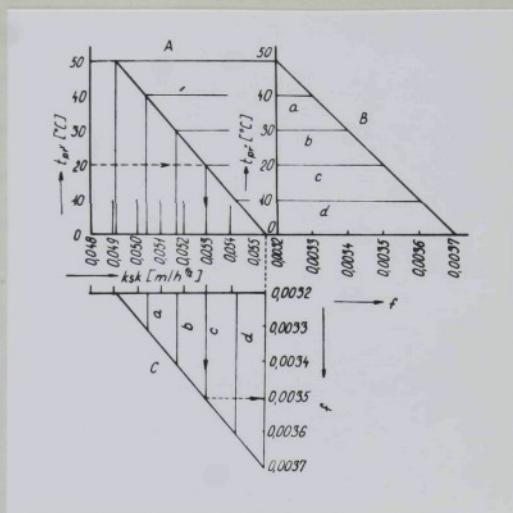


Obr. 4.2. Znárodnění zkoušky dle PŘIBYLA /52/

- a) základní těleso - "quasikonečná" deska
- b) záznam termočlánků a z něj vyplývající hodnoty

odvádění tepla přehřátí od povrchu odlitku. Z naměřené celkové doby tuhnutí a doby odvádění tepla přehřátí pak za pomoci vlastních odvozených závislostí (obr. 4.3) určí skutečný koeficient tuhnutí $\underline{k}_{sk}$ a faktor $\underline{f}$, který se dosadí do vztahu

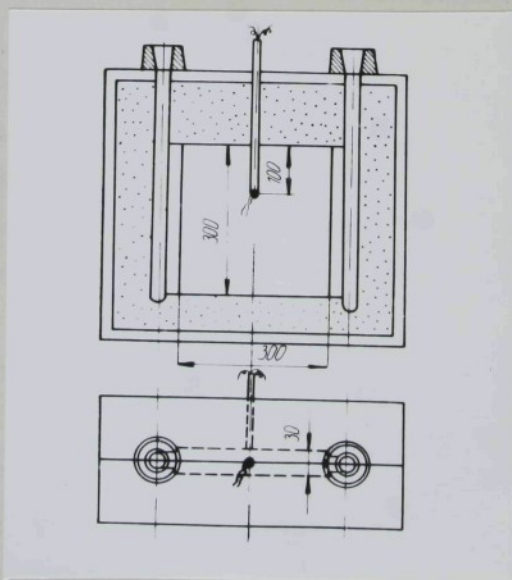
$$b = \frac{k_{sk}}{f} \quad [\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2} \cdot ^\circ\text{C}] \quad (4.4)$$



Obr. 4.3. Zjištěné závislosti u ocelové desky o tloušťce 60 mm /52/

4.1.3. Stanovení b_2 podle VSŽ Košice /10/

Jako pokusný odlitek byla zvolena deska tloušťky s . Aby deskový odlitek splňoval podmínky rozměrově nekonečné desky, při které střed odlitku není ovlivněn jeho bočními plochami, má mít



Obr. 4.4. Uspořádání zkoušky dle VSŽ Košice /10/

délku a výšku 6-10x větší, než je jeho tloušťka. Velikost a uspořádání pokusného odlitku ve formě je vidět z obr. 4.4.

Spoj jednoho termočlánku byl umístěn v tepelné ose odlitku, druhý termočlánek byl umístěn ve stejné výšce jako první na rozhraní forma-kov. V průběhu tuhnutí byly měřeny následující veličiny: teplota tuhnutí t_{kr} , doba tuhnutí τ_3 a teplota rozhraní t_1 . Z naměřených hodnot a z daných tepelně fyzikálních vlastností použitých slitin se hodnota b_2 počítá dle vztahu

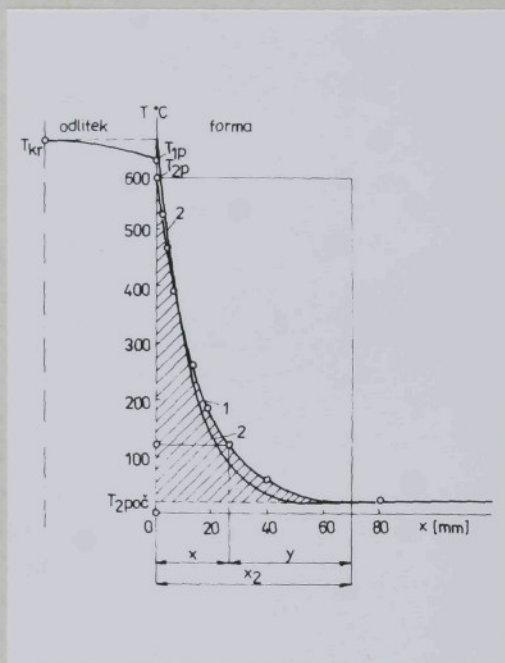
$$b_2 = \frac{5 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \rho_1 \cdot [k_r \cdot C_1 (t_r - t_{kr})]}{4 t_{kr} \sqrt{\tau_3}} \quad (4.5)$$

4.1.4. Stanovení b_2 podle VEJNIKA /1, 58, 77/

Autor vypracoval technologickou lící metodu stanovení součinitele tepelné akumulace b_2 pomocí vyhodnocení teplotního gradientu jako paraboly n-tého řádu. Tímto způsobem lze přesněji analyticky popsat teplotní pole formy a současně získat mnohem přesnější hodnoty tepelně fyzikálních koeficientů než u jiných metod.

Do formy ze zkoušeného materiálu se odlévá kov se známými tepelně fyzikálními vlastnostmi. Odlitek má tvar nekonečné desky (např. 20x200x200 mm) ve svislé poloze, teplota se měří ve středu odlitku, u povrchu odlitku (na lící formy) a rovněž v několika místech formy (termočlánky se umísťují v odstupňovaných vzdálenostech od líce formy směrem k povrchu formy). Teplotní pole formy se sestavuje v okamžiku τ_3 úplného ztuhnutí odlitku (obr. 4.5).

Teplotní pole formy lze popsat různými funkcemi. Přesnost výsledků bude záviset na stupni přesnosti nahrazení teplotního



Obr. 4.5. Schéma průběhu teplotních gradientů v odlitku a ve formě dle VEJNIKA /77/

- 1 ... hodnoty naměřené
2 ... hodnoty vypočtené

pole formy určitou jednoduchou funkcí. VEJNIK používá jako náhradní funkce paraboly n -tého řádu nebo sinusovky. Pro zvýšení přesnosti měření je žádoucí odlévat kov s minimálním přehřátím.

a) nahrazení teplotního pole formy parabolou n -tého řádu:

$$\vartheta = \vartheta_{kr} \cdot \left(1 - \frac{x}{x_2}\right)^{n_2} \quad (4.6)$$

kde $\vartheta = t - t_{2p} \quad [^{\circ}\text{C}]$,
 $\vartheta_{kr} = t_{kr} - t_{2p} \quad [^{\circ}\text{C}]$;

součinitel b_2 se pak vypočítá ze vztahu:

$$b_2 = \sqrt{\frac{n_s + 1}{2n_s}} \cdot \frac{x_1 \cdot \rho_1 \cdot l_{kr}}{g_{kr}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_3}} \quad (4.7)$$

b) nahrazení teplotního pole formy sinusovkou:

$$g = g_{kr} \cdot \left(1 - \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{x_2}\right) \quad (4.8)$$

a součinitel b_2 se pak vypočítá ze vztahu:

$$b_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi - 2}} \cdot \frac{x_1 \cdot \rho_1 \cdot l_{kr}}{g_{kr}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau_3}} \quad (4.9)$$

kde t - naměřená teplota [$^{\circ}\text{C}$],
 t_{kr} - teplota tuhnutí [$^{\circ}\text{C}$],
 t_{2p} - počáteční teplota formy [$^{\circ}\text{C}$],
 x_2 - hloubka prohřátí formy v okamžiku ztuhnutí
odlitku [m],
 x - vzdálenost naměřené teploty od líce formy [m],
 n_2 - stupeň paraboly,
 $n_s = \frac{\sum_{i=1}^m n_{2i}}{m}$ - střední hodnota stupně paraboly,
 $x_1 = 1/2$ tloušťky odlitku [m],
 l_{kr} - skupenské teplo odlitku [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$],
 ρ_1 - měrná hmotnost odlitku [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 τ_3 - doba tuhnutí odlitku [s].

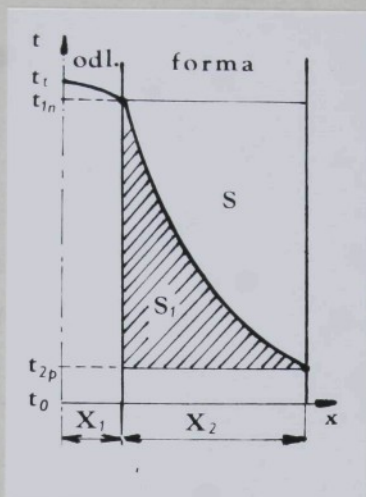
Jak uvádí ANISOVIČ /1/, který vycházel z prací Vejníka, je možno zjednodušeně určit stupeň paraboly podle vztahu (4.10) viz obr. 4.6.

$$n_s = \frac{S}{S_1} \quad (4.10)$$

Pro nekovové formy pro odlévání Al byl experimentálně /1/ stanoven empirický vzorec:

$$n_s = 3 - 1,67 \cdot \frac{g_{kr} - g_1}{g_{kr}} \quad (4.11)$$

který ovšem platí pouze při splnění podmínky, že:



pro kokily ...

$$t_{1n} = (0,5 - 0,7) \cdot t_1$$

pro nekovové formy ...

$$t_{1n} = 0,97 \cdot t_1$$

Obr. 4.6. Tepelné pole odlitku a formy dle ANISOVIČE [1/

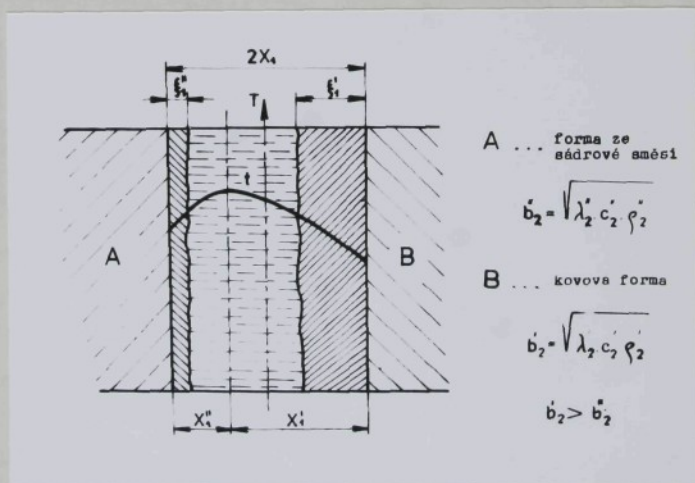
$$\frac{\vartheta_{kr} - \vartheta_t}{\vartheta_{kr}} \leq 0,8$$

kde $\vartheta_{kr} = t_{kr} - t_{2p} [^{\circ}\text{C}]$,

$$\vartheta_t = t_1 - t_{kr} [^{\circ}\text{C}]$$

5. ZÁKLADNÍ ZÁKONITOSTI TUHNUTÍ ODLITKU V KOMBINOVANÉ FORMĚ

Základní představa o tuhnutí a jeho průběhu lze získat u odlitku deskového tvaru, jehož délka a výška značně převyšuje třetí rozměr - tloušťku (nekonečná deska). Odlitek je ochlazován ve formě, jejíž stěny jsou zhotoveny ze dvou různých materiálů, např. kovu (s hodnotou součinitele tepelné akumulace b_2') a sádrové směsi (s hodnotou součinitele tepelné akumulace b_2''). Tuhnutí probíhá nesouměrně, tloušťka ztuhlé vrstvy v určitém časovém okamžiku je rovna ξ_1' , resp. ξ_1'' obr. 5.1. Tepelná osa odlitku se posouvá vždy k části formy s menší schopností akumulace tepla (b_2''). Hodnoty X_1' a X_1'' závisejí pouze na tepelně fyzikálních vlastnostech částí forem /75,76/. Proto při studiu podmínek tuhnutí lze odlitek tuhnoucí v kombinované formě nahradit dvěma ekvivalentními odlitky:



Obr. 5.1. Průběh tuhnutí a poloha tepelné osy odlitku v kombinované formě /61/

první o tloušťce $2X_1'$ tuhne ve formě s vyšší tepelnou akumulací, druhý o tloušťce $2X_1''$ tuhne ve formě s nižší tepelnou akumulací. Toto myšlené rozdělení odlitku na dvě části a předpoklad, že každá část tuhne ve vlastní symetrické formě, umožňuje z poměrně jednoduchých vztahů určit veličiny důležité pro stanovení podmínek tuhnutí odlitku v kombinované formě.

Za předpokladu, že k výměně tepla mezi odlitkem a formou dochází od okamžiku zaplnění dutiny formy taveninou o lici teplotě, ustaví se poloha tepelné osy odlitku již při odvodu tepla z taveniny (tzv. tepla přehřátí). Pro odvod tepla přehřátí do části formy ze sádrové směsi pak můžeme podle /76/ použít vztah

$$Q_{pr}' = \frac{2}{\sqrt{\pi}} b_2' S_1' (t_{1s} - t_{2p}'') \sqrt{\tau_2} \quad [J] \quad (5.1)$$

kde b_2'' - součinitel tepelné akumulace sádrové formy $[W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$,

S_1'' - plocha styku odlitku s formou ze sádry $[m^2]$,

$$t_{1s} = \frac{t_l + t_{kr}}{2} \quad [^{\circ}C],$$

t_{2p}'' - počáteční teploty sádrové formy $[^{\circ}C]$,

τ_2 - doba odvodu tepla přehřátí $[s]$.

Odvod tepla přehřátí do kovové části formy je limitován podmínkami přestupu tepla na rozhraní odlitek - kovová forma, proto zde platí podle /76/ Newtonův vztah

$$Q_{pr}' = \alpha_1' S_1' (t_{1s} - t_{2p}') \cdot \tau_2 \quad [J] \quad (5.2)$$

kde α_1' - součinitel přestupu tepla mezi odlitkem a kovovou formou $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$,

S_1'' - plocha styku odlitku s kovovou formou $[m^2]$

t_{2p}' - počáteční teplota kovové části formy $[^{\circ}C]$.

V případě, že kovová část formy je na lici opatřena vrstvou izolačního nátěru, platí pro odvod tepla přehřátí dle /76/ vztah

$$Q_{pr} = \beta'_n S_1 (t_{1s} - t_{2p}) \cdot \tau_2 \quad [J] \quad (5.3)$$

kde $\beta'_n = \frac{\lambda_n}{X_n}$ - součinitel přestupu tepla přes vrstvu nátěru $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$,

λ_n - součinitel tepelné vodivosti nátěru $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,

X_n - tloušťka vrstvy nátěru $[m]$.

Ze vztahů (5.1) a (5.3) lze dle /76/ po dosazení a úpravě získat přibližný výraz pro určení X'_1 ve tvaru

$$X'_1 = \frac{2X_1}{1 + \frac{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot b''_2 (t_{1s} - t_{2p})}{\beta'_n (t_{1s} - t'_{2p}) \sqrt{\tau_2}}} \quad [m] \quad (5.4)$$

Vypočítaná část tloušťky odlitku X'_1 předává teplo kovové části formy, zvyšující část tloušťky odlitku $X''_1 = 2X_1 - X'_1$ předává teplo sádrové části formy. Rozhodující vliv na velikost těchto parametrů mají tepelně fyzikální vlastnosti užitých materiálů částí formy b''_2 , b'_2 , resp. β'_n a dále technologické podmínky odlévání (t_1 , t_{2p} , t'_{2p}).

Pro případ tuhnutí deskového odlitku tloušťky $2X_1 = 20$ mm z čistého Al (ČSN 424103) v kombinované formě složené ze sádrové směsi ($b''_2 \approx 500 - 700 W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) a ocelové části (ČSN 11373, $b'_2 \approx 10000 W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), předehřáté na $300^\circ C$, vychází poloha tepelné osy ve vzdálenosti $X'_1 = 19$ mm (tedy 1 mm od sádrové části formy). Tato hodnota byla potvrzena pokusně /36/. Důsledkem této značné odchylky tepelné osy oproti geometrické ose odlitku je soustředění slévárenských vad, především staženin k povrchu, který je tvořen sádrovou částí formy, a tím i zhoršení jeho kvality.

Úsilí našich výzkumných prací bylo proto zaměřeno na zajištění pokud možno souměrného tuhnutí odlitku v kombinované formě,

které nastane v případě, že hodnota X'_1 se přiblíží hodnotě poloviční tloušťky odlitku X_1 . Ze vztahu (5.4) vyplývá, že toho lze dosáhnout, bude-li se hodnota zlomku ve jmenovateli blížit 1, tedy

$$\frac{2 b_2'' (t_{15} - t_{1p}) X_n}{\sqrt{\pi} \lambda_n (t_{15} - t_{1p}) \sqrt{t_2}} \approx 1 \quad (5.5)$$

Uvedená podmínka dovoluje vymezit možné směry technologie, kterými lze realizovat výrobku odlitků v kombinovaných formách při zabezpečení jejich požadované jakosti. Jsou to především:

1. zvyšování hodnoty součinitele tepelné akumulace části formy ze sádrové směsi přidáváním vhodných přísad (aditiv) do směsi.
2. snižování schopnosti odvodu a akumulace tepla kovovou částí formy především nanesením vrstvy izolačního nátěru s nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti λ_n a o větší tloušťce X_n ,
3. Zvyšování počáteční hodnoty teploty kovové části formy t'_{2p} , tzn. předehřátí formy;
4. snižování počáteční teploty sádrové formy t_{2p} , tzn. podchlazení, ev. zmrazení sádrové části formy;
5. snížení lící teploty taveniny a tím zkrácení doby odvodu tepla přehřátí t_1 ; v tomto směru se jako schůdná cesta ukazuje použití nízkotlakého lití k plnění kombinovaných forem.

Rozbor vlivů a podmínek, které se uplatňují při tuhnutí odlitků v kombinovaných formách, byl proveden při zavedení určitých zjednodušujících předpokladů. Při tak složitých dějích, které při výrobě odlitků ve slévárenských formách probíhají, je to však postup opodstatněný. Při současném doplnění vhodnými experimenty umožňuje postupně řešit konkrétní praktické příklady.

6. CHARAKTERISTIKA FOREM ZE SÁDROVÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍ

6.1. Fyzikálně chemické vlastnosti sádry /14, 60, 68/

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 (obr. 6.1). Do teploty asi 42°C je stálý, při zvýšení teploty postupně ztrácí vodu. Zahřátím na teplotu 110°C ztrácí sádrovec krystalicky vázanou vodu a postupně přechází na nižší formy až bezvodý síran vápenatý. Při teplotě asi 1400°C se sádrovec rozkládá na oxid vápenatý a sírový. Teplota rozkladu se snižuje přítomností oxidu křemičitého, železitého až na teplotu 700°C /56/.

Množství krystalické vody, které zbývá po zahřátí sádrovce, má vliv na vlastnosti vyrobené sádry. Zahříváním na teploty $110\text{--}130^\circ\text{C}$ se uvolní $3/2$ krystalické vody a vznikne polohydrát síranu vápenatého, který je hlavní složkou každé sádry. Při ztrátě vody při teplotě vyšší než 200°C začíná postupně vznikat anhydrit, při teplotách vyšších než 400°C bezvodý anhydrit čili "mrtvá sádra".

Podle způsobu odvodnění můžeme získat dvojí druh polohydrátu. Pálením sádrovce na vzduchu při $120\text{--}130^\circ\text{C}$ se získává β - polohydrát, jehož mikroskopické částice jsou vločkovité, pórovité a poněkud nepravidelné. Odvodněním sádrovce v autoklávu se při tlaku $0,13 \text{ MPa}$, teplotě 125°C po dobu 7-8 hodin se vyrábí α - polohydrát s dobře vyvinutými hranolovitými krystaly o délce $0,1\text{--}1 \text{ mm}$ (obr. 6.2).

Sled přeměn při zahřívání sádrovce za různých podmínek je na příl. s. 1. a přehled fází soustavy " CaSO_4 - voda" na příl. s. 2.



Obr. 6.1. Morfologie sádrovce /18/
zvětšení 2200x



Obr. 6.2. Morfologie polohydrátu $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ /18/
zvětšení 2200x



Obr. 6.3. Morfologie anhydritu III /38/
zvětšení ~ 2000x

Produkty tepelného rozpadu sádrovce dělí HARMÁČEK /14/ na:

1. α - polohydrát $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$, který vzniká částečným odvodněním sádrovce v prostředí přesyceném vodní parou při teplotě $115-125^\circ\text{C}$. α - polohydrát je krystalický, má zřetelně rozeznatelné obrysy krystalů (při pozorování mikroskopem).
2. β - polohydrát $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ vzniká odvodněním sádrovce při teplotě 100°C nebo při teplotách poněkud vyšších. Struktura je vločkovitá, šupinkovitá, rozeklaná. Při pozorování mikroskopem (ani při velkém zvětšení), nejsou rozeznatelné obrysy krystalů. Protože má β -polohydrát větší povrch krystalu, je energeticky méně stabilní a ve vodě lépe rozpustný.
3. Anhydrit CaSO_4 III (rozpustný anhydrit) vzniká úplným odvodněním sádrovce nebo polohydrátu ve vakuu při 100°C , nebo při 110°C za normálního tlaku (obr. 6.3).
4. Anhydrit CaSO_4 III vzniká rovněž úplným odvodněním ve vakuu při teplotě blízké 100°C nebo žíháním za normálního tlaku při teplotě $140-300^\circ\text{C}$.
5. Anhydrit CaSO_4 II vzniká úplným odvodněním sádrovce při teplotě vyšší než 300°C za normálního tlaku. Při teplotách převyšujících 800°C se rozkládá na oxid vápenatý a oxid sirový.
6. Anhydrit CaSO_4 I vzniká žíháním sádrovce nebo předchozích produktů při teplotě $1225-1230^\circ\text{C}$ za normálního tlaku.

6.2. Rozdělení sáder

V praxi rozdělujeme sádry podle mnoha hledisek (např. podle stupně pálení sádrovce, podle doby tuhnutí, podle jemnosti mletí atd.). V podstatě se dělí sádry do 4 skupin /14/:

- a) sádra rychletuhnoucí,

- b) sádra pomalutuhnoucí,
 - c) vysokopevnostní sádra,
 - d) anhydritové pojivo.
- a) Sádra rychlētuhnoucí - získává se pálením sádrovce při teplotě 107-200°C. Jde prakticky o polohydrát CaSO_4 a určité množství anhydritu, který způsobuje rychlé tuhnutí nerozloženého sádrovce a cizích příměsí. Dále se dělí na:
- 1) sádru modelářskou, která obsahuje asi 90 % polohydrátu;
 - 2) sádru alabastrovou, která obsahuje 90 % polohydrátu, 4 % anhydritu a 2 % dihydrátu;
 - 3) sádrovou omítku, která je tvořena pouze polohydrátem.
- b) Sádra pomalutuhnoucí - sádra stavební, je tvořena anhydritem II, který tvoří hlavní složku, dále anhydritem I a 2-4 % CaO . Označuje se také jako sádra hydraulická a vyrábí se pálením sádrovce při teplotě 800-1000°C.
- c) Vysokopevnostní sádra je tvořena v podstatě α -polohydrátem.
- d) Anhydritové pojivo je v podstatě tvořeno anhydritem a obsahuje malé množství přísad, které zlepšují konečné vlastnosti.

6.3. Vlastnosti sádry pro slévárenské účely /4,19,60/

Nejdůležitější mechanickou vlastností sádry je pevnost v tlaku, která se pohybuje od 50-70 MPa /4/. Důležitá je závislost hodnot pevnosti v tlaku na vodním poměru v/s (poměr množství rozdělovací vody a práškové sádry). Povrchová pevnost kvalitních sáder dosahuje podle /19/ až 130 MPa. Po ztuhnutí narůstá tvrdost rychleji než pevnost, protože povrchové vrstvy sádry rychleji vysychají. Reprodukční schopnost některých druhů sáder dosahuje až 50 μm drsnosti povrchu.

Vlastnosti sáder značně kolísají podle způsobu výroby a jejího účelu, a proto je jejich rozmezí velmi široké. Vlastnosti některých druhů sáder jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Tab. 6.1. Zákl. vlastnosti některých druhů sáder

Vlastnost	Druh sádry		
	rychletuhnoucí	pomalutuhnoucí	anhydrit, pojivo
měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	2,7.10 ⁻³	2,9.10 ⁻³	2,9.10 ⁻³
sypká hmotnost [kg.m ⁻³]	1,1.10 ⁻³	1,2.10 ⁻³	1,0.10 ⁻³
velikost částic [mm]	0,2	0,2	0,09
počátek tuhnutí [s]	240-480	18000	15000
množství rozdělávací vody [hmot. %]	40-80	25-35	25-35
pevnost v tlaku R _{mt} [MPa]	130	30	28
objemová změna při tuhnutí [obj. %]	1	nepatrné smrštění	nepatrné smrštění

6.4. Tuhnutí a tvrdnutí sádry /19, 60/

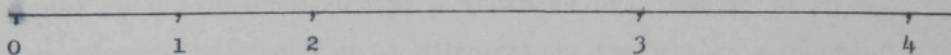
Při výkladu zpevňování sádrových pojiv je nutno nejdříve uvážit poměr rozpustnosti jednotlivých fází systému $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ve vodě. Hlavní děje, které probíhají při tuhnutí a tvrdnutí sádry jsou:

- rozpouštění polohydrátu,
- nukleace dihydrátu,
- růst krystalů dihydrátu.

Tyto děje limitují rychlost hydratace a tím izpevňování, které 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, zatímco 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 tuhnutí.

Při zpracovávání sádry rozeznáváme (obr. 6.4):

- rychlost míchání,
- začátek míchání,
- dobu míchání,
- začátek tuhnutí,
- konec tuhnutí,
- dobu tuhnutí,
- dobu tvrdnutí,
- dobu odlévání sádrové kaše,



- 0 - začátek míchání
- 1 - konec míchání
- 2 - počátek tuhnutí
- 3 - konec tuhnutí
- 4 - konec tvrdnutí

- 01 - doba tuhnutí
- 13 - doba tuhnutí

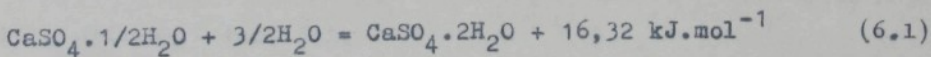
Obr. 6.4. Časové schéma zpracování sádry

Za dobu tuhnutí se považuje interval mezi koncem míchání a úplným ztuhnutím. Doba, která uplyne od rozmíchání sádrové kaše do okamžiku, kdy již není možno sádrovou kaši volně vylít z kelmku, se nazývá doba lití. Na rychlost tuhnutí sádrové kaše (směs práškové sádry a vody) má vliv řada činitelů:

- vlastní výrobní postup,
- poměr mezi vodou a sádrou (v/s);
- teplota rozdělovací vody;
- 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 β -polohydrátu přijímají vodu více a rozpouštějí se rychleji než celistvé krystaly α -polohydrátu. Čím více se míchá sádrová kaše, tím rychleji tuhne. Mícháním se podporuje rozpouštění sádry ve vodě a tím i celkové tuhnutí.

Sádra rozmíchaná s potřebným množstvím vody (které je dáno 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 (6.1)



Jedná se o exotermní proces a sádra se při tuhnutí zahřívá. Pro přeměnu polohydrátu na dihydrát je teoreticky zapotřebí 18,6 % vody. Ve skutečnosti se jí však přidává mnohem více, aby se jednotlivé částice sádry mohly ve vzniklé 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 722301.

6.5. Sádrové směsi

Sádrové směsi mají dnes významné uplatnění ve slévárenství při výrobě forem určených k výrobě přesných odlitků, nejčastěji ze slitin hliníku, zinku, popř. jiných vhodných kovů. Tímto způsobem odlévání byly vyřešeny mnohé výrobní těžkosti při výrobě drobných odlitků, např. centimetrových dílů používaných v radiolokační technice /32, 34, 35/.

Vlastnosti sádrových formovacích směsí určuje nejen jakost sádry, ale i množství dalších přísad do formovacích směsí. Sádra tvoří v sádrové směsi hydraulické (hydratační) pojivo. Sádrou se obvykle váže směs křemičitého písku (který je ostřivem) a dalších přísad (např. slídy, jemné mletého asbestu, mastku apod.).

Obsah sádry ve formovací směsi se pohybuje od 25-65 hmot.% /70 a další/. K vázání dochází tím, že sádra je zčásti dehydrovaným 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 směsí lze v omezené míře měnit jejich technologické příp. tepelně fyzikální vlastnosti. Sádrové směsi mohou dle /56/ obsahovat např. tyto přísady - tab. 6.2.

Azbest zvyšuje pórovitost a zlepšuje mechanické vlastnosti sádrových forem. Křemenná moučka zmenšuje objemové změny sádrové směsi při tuhnutí. Mastek, vápno a cement 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 např. kyselina boritá (1-2 %), vodní sklo alkalické, které zvyšuje pevnost a odolnost forem proti otěru, hlinitan vápenatý

Tab. 6.2. Přehled přísad do sádrových směsí podle /56/

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

(2,5 - 12 %) a oxid zinečnatý, které zpomalují tuhnutí a zvyšují pevnost formy. Směs, která se dle /32/ nejvíce osvědčila pro odlévání drobných odlitků ze slitin Al má následující složení (hmotnostní podíly):

65 % alabastrová prášková sádra

28 % křemenná moučka FF

2 % jemně mletá křemelina

5 % jemně mletý mastek.

Nejčastěji se pro přípravu sádrových směsí u nás používá prášková sádra MODELGIPS, MG 11, II., podle TGL 21843 (výrobce Gipswerk Stadtoldendorf - NDR) - tato sádra se nazývá alabastrová. Dále se používá sádra tuzemského původu, která je známá pod názvem stavební (výrobce SCSD n.p. Ostrava, záv. Kobeřice u Opavy). Kromě směsí vyrobených z uvedených sáder se ještě používají některé zatmelovací hmoty (běžně používané v dentální technice), označované obchodními názvy GLORIA aj., jejichž složení výrobce n.p. Dental Jičín neuvádí.

Sádrové směsi je možno podle přípravy a zhotovování sádrové kaše dělit na sádrové směsi nenapěněné a napěněné. Nenapěněné sádro-

vé směsi se připravují přímo smícháním s vodou v příslušném poměru podle časového rozpisu přípravy /12/:

1. sypání sádrové směsi do vody (15 s);
2. míchání sádrové směsi s vodou (30 s);
3. poklepávání nádoby se sádrovou kaší, čímž se docílí odstranění vmíchaného vzduchu (35 s);
4. homogenizační míchání (20 s);
5. odlévání sádrové kaše do připravené formy (ve 110 s od počátku přípravy).

Napěněné sádrové směsi jsou připravovány dle metody Gypson-Hydropem. Připravují se přidáním malého množství povrchově aktivní látky - pěnidla, které způsobí při rozdělávání s vodou její napěnění. Pěnidla jsou látky, které chemickou reakcí uvolňují plyn. Pěnidla se přidávají buď do suché směsi (pokud se jedná o suchá napěňovadla) nebo do sádrové kaše ve formě předem připravené pěny. Podle toho, jakým způsobem se pěnidla přidávají do sádrové kaše, dělíme pak technologickou přípravu napěněné sádrové směsi na přípravu jednofázovou a dvoufázovou. Po ztuhnutí vyrobené sádrové směsi je vzniklá hmota prostoupena jemnými bublinkami a vyznačuje se poměrně vysokou prodyšností, která odpovídá 150 n.j.p.

Jednofázová příprava - do nádoby s příslušným množstvím vody se přidá určité množství napěňovadla. Do takto připraveného roz-toku následuje:

1. sypání sádrové směsi (15 s);
2. míchání sádrové směsi (30 s);
3. napěňování směsi vhodným míchadlem (110 s);
4. odlévání napěněné sádrové kaše do připravené formy se provádí ve 155. s.

Dvoufázová příprava - v první fázi se připraví saponátová emulze a provede se její napěnění. Ve druhé fázi se přidává určitě množství pěny do sádrové kaše, která se homogenizuje. Tím se získá napěněná sádrová kaše. Dvoustupňová metoda dává lepší výsledky v kvalitě napěnění. Jako vhodné pěnidlo se používá ETOXON EPA, ze kterého se vytvoří hustá pěna, která se vmíchává do sádrové kaše /34/.

6.6. 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 dodržením postupu tepelného zpracování sádrových forem. Na závalu je také sklon sádrových forem k nařínání. Navlhnutí forem ze sádrových směsí má za následek odvařování a tím podstatné zhoršení kvality odlitků. Proto se do sádrových směsí přidávají přísady, které umožňují regulovat dobu tuhnutí, roztažnost při tuhnutí a tvrdnutí, zvyšovat prodyšnost forem.

Od sádrových forem vyžadujeme tyto vlastnosti:

- dostatečnou prodyšnost,
- dostatečnou pevnost a odolnost proti zborcení při lití,
- minimální změnu rozměrů,
- při ohřevu na vyšší teploty se nesmí tvořit výrazné praskliny na líci formy.

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

6.7. Výroba forem ze sádrových směsí

Formy ze sádrových směsí se vyrábějí odléváním modelu sádrovou kaší. Tato kaše je dosti lehká a dodává formám lesklý a hladký povrch. Zvětšování objemu sádry při tuhnutí má za následek lepší zaplnění formy a dobré kopírování modelu. Sádrová kaše vytvořená promícháním práškové sádrové směsi ve vodě tuhne, přičemž doba tuhnutí závisí na:

- a) druhu sádry,
- b) množství roztéplávací vody,
- c) teplotě roztéplávací vody,
- d) jemnosti sádry,
- e) přípravě kaše.

Při malém obsahu roztéplávací vody se směs špatně odlévá, značně houstne, rychle tvrdne a vylučuje větší množství tepla za současného zvětšování objemu. Se vzrůstající teplotou vody se prodlužuje doba tuhnutí směsi. Proto se pro přípravu sádrové kaše má podle /32/ používat voda teplota 18°C.

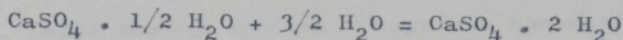
Při odlévání tekutého kovu do formy ze sádrové formovací směsi dochází na rozhraní forma-tavenina k intenzivnímu odpařování vlhkosti obsažené ve formě nebo k uvolňování některých plynných podílů formovací směsi, které vznikají jejím tepelným rozkladem. Z toho důvodu je třeba sádrové formy před litím tepelně zpracovávat. V zahraničí se používá pro komplexní výrobu sádrových forem metoda ANTIOCH nebo BENDIX /39,57/.

Metoda ANTIOCH

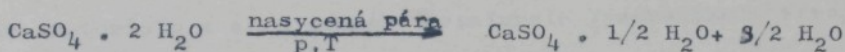
je proces výroby prodyšných sádrových forem s fázovou přeměnou síranu vápenatého, který je znám pod názvem Antioch Process a byl vyvinut v Antioch College Rellow Springs, Ohio, USA r. 1930

Z fyzikálněchemického hlediska se dá tento proces rozdělit do 4 stádií:

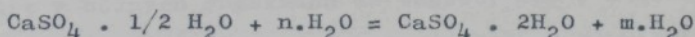
1. pojení - spočívá v tom, že spojením polohydrátu síranu vápenatého a vody získáme dihydrát síranu vápenatého



2. autoklávování - zahřívání dihydrátu síranu vápenatého v atmosféře nasycené páry při teplotě 110-117°C - vzniká opět polohydrát síranu vápenatého, protože dihydrát je při této teplotě termodynamicky nestabilní



3. vlhčení - po době 6-8 pobytu formy v autoklávu se forma ochlazuje ve vlhké atmosféře a probíhá chemická reakce



Povrch formy se ochladí rychleji než vnitřek, proto se vylučují ve vrstvách na povrchu jemné krystalky dihydrátu síranu vápenatého a ve vnitřku stěny formy hrubé krystaly. Vznikne forma s jemnozrnným povrchem a pórovitým vnitřkem, což má za následek zvýšení její prodyšnosti (50-150 n.j.p.).

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

Metoda Antioch představuje dvoufázový proces komplexní výroby sádrových forem, při kterém se snižuje obsah vody ve formě a získává se vysoká prodyšnost. V první fázi se forma napařuje v autoklávu po dobu asi 6-8 hodin v prostředí syté páry o tlaku 0,18 MPa. Ve druhé fázi se forma ponořuje do vody a nechá se 16 hodin v klidu, přičemž proběhne překrystalizace polohydrátu síranu vápenatého na dihydrát. Pak se forma vysušuje pomalým ohřevem na teploty 100, 150, 200-300°C po dobu 10-15 hodin a pak se ihned provádí odlévání.

Metoda BENDIX

Další metodou výroby sádrových forem je metoda Bendix. Forma se po ztuhnutí nechá 24 hodin odstát na vzduchu za normální teploty 20°C . Za tuto dobu proběhnou některé hydratační dilatace. Další postup spočívá v tepelném zpracování nejrozličnějšími cykly v rozmezí teplot $230 - 400^{\circ}\text{C}$ po dobu 16 hodin, lišícími se zkušenostmi výrobců. Takto tepelně zpracovaná forma se nechá pomalu vychladnout a je připravena k odlévání.

Studium technologie výroby sádrových forem prováděná na katedře materiálu a strojírenské metalurgie Vysoké školy strojní a textilní v Liberci /32,33,34,35/ vycházelo z metody Bendix. Ukázalo se, že připravované sádrové formy je nutno tepelně zpracovávat sušit v běžných sušárnách do teploty 200°C a žíhat v komorové 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 výroby sádrových forem se pohybuje v rozmezí od 24 do 72 hodin podle velikosti a členitosti, příp. podle obsahu rozdělovací vody použité při přípravě formy. Podrobně se otázkou sušení sádrových forem zabývala NOVÁ /45/. Jak výzkumy na KMM VŠST, tak měření Nové ukázaly, že správně stanovený režim tepelného zpracování nahrazuje technologicky i energeticky náročný proces výroby sádrových forem metodou Antioch ev. Bendix.

6.8. Tepelné fyzikální vlastnosti sádrových formovacích směsí a jejich ovlivňování

Sádrová formovací směs je z teoretického hlediska disperzním materiálem. Disperzní materiál je systém tvořený dvěma případně

více fázemi, rozdělenými mezifázovým povrchem. Přitom jedna z fází je ve druhé rozložena v podobě částic velmi malých rozměrů. Příkladem dvoufázového disperzního materiálu je suchý křemenný písek. Třífázový disperzní materiál je např. formovací směs s vodním sklem nebo pryskyřicí (ostřivo + pojivo + vzduch) /9/. Disperzní systém sestává ze skeletu (tuhá fáze) - částic oddělených mezerami, vyplněnými plynem, kapalinou apod. Vlastnosti skeletu podmiňují vlastnosti disperzního materiálu. Proto bude v dalším proveden rozbor tepelně fyzikálních vlastností disperzních materiálů.

Termínem tepelně fyzikální vlastnosti označujeme komplex parametrů charakterizujících pochody sdílení tepla a hmoty. Patří k nim především:

- tepelná vodivost λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
- teplotní vodivost a [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
- tepelná kapacita $\varphi \cdot c$ [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$],
- tepelná akumulace b [$\text{W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

Sdílení tepla se uskutečňuje třemi současně probíhajícími pochody: vedením, konvekcí a radiací, přičemž dochází k:

1. vedení tepla přes jednotlivé částice;
2. přestupu tepla z jedné částice do druhé v místě jejich kontaktu;
3. molekulárním vedení tepla v prostředí vyplňujícím prostor mezi zrny;
4. přestupu tepla na rozhraní tuhých částic a okolního prostředí;
5. sálání z částice na částici;
6. proudění plynu nebo kapaliny obsaženého mezi částicemi.

Obecný tvar diferenciální rovnice, která popisuje sdílení tepla všemi uvedenými způsoby, za předpokladu toku tepla v jednom

směru je

$$-C \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial q}{\partial x} \quad (6.2)$$

kde $C=c \cdot Q$ tepelná kapacita [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$];
 t teplota [$^{\circ}C$],
 τ čas [s];
 Q tepelný tok [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$];
 x délkový rozněr [m],

celkový tepelný tok q je pak

$$q = q_v + q_k + q_r \quad (6.3)$$

kde q_v tepelný tok vedením;
 q_k tepelný tok konvekcí;
 q_r tepelný tok radiací.

Konvekce může v disperzním materiálu nastat podle charakteru proudění média vyplňujícího póry dvojí:

- a) přirozená konvekce,
- b) vynucená konvekce.

Jak uvádí ČUDNOVSKIJ /5/, může se přirozená konvekce v disperzním materiálu rozvinout jedině v tom případě, že rozměry pórů jsou větší než 10 mm a rozdíl teplot (částice a média) je vyšší než 15 K. Vynucená konvekce má u sádrových směsí malý význam (sádrová forma se používá vysušená a neobsahuje v podstatě žádnou vodu). Vzhledem k tomu, že póry v sádrové formě jsou velmi malé (viz obr. 6.2, 6.3) dá se předpokládat, že v sádrové formě přenos tepla konvekcí nenastane a nebo bude zanedbatelně malý.

Podle dnešních poznatků závisí radiace v disperzní soustavě na velikosti pórů a na teplotě. Při nízkých teplotách je podíl radiace na celkovém vedení tepla zanedbatelný, při teplotách asi $900^{\circ}C$ činí asi 10 % z celkového tepelného toku /8/. V našem případě sádrových forem má radiace rovněž malý význam, protože se

v podstatě jedná o jemně disperzní materiál, kde je rozměr pórů malý.

Budeme-li tedy uvažovat, že $q_k = q_r = 0$, přechází rovnice (6.2) ve výraz pro vedení tepla dle Fouriera

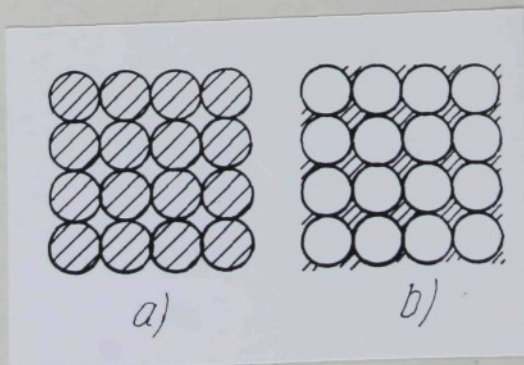
$$q_v = -\lambda_v \frac{\partial t}{\partial x} \quad (6.4)$$

Jako hlavní způsob sdílení tepla v jemně disperzních materiálech se jeví vedení tepla. Spolupůsobí při tom:

- 1) vedení tepla v částici tuhé fáze,
- 2) přestup tepla z jedné částice do druhé,
- 3) vedení tepla prostředím vyplňujícím póry.

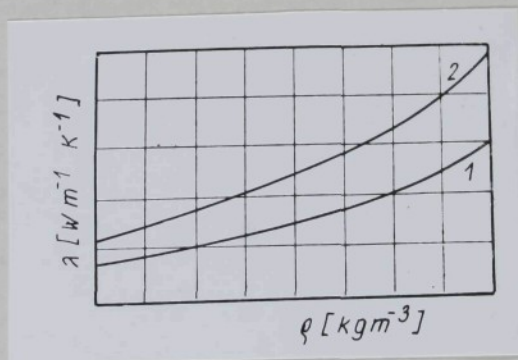
Vedení tepla ovlivňuje:

1. struktura systému - rozumí se struktura skeletu. Disperzní materiál může být zrnitý nebo buněčný (obr. 6.5). Toto rozdělení není úplné, ve skutečnosti se vyskytují i materiály se strukturou vláknitou a s kombinacemi všech uvedených druhů. Teoreticky jsou však zatím částečně zpracovány pouze první dva typy /8/. Nahradí-li se u zrnitého materiálu zrna koulemi, mohou se k popisu struktury použít poznatky z mineralogie - krystalové mřížky. Obvykle se vystačí se soustavou kubickou s různou těsností uspořádání.



Obr. 6.5. Schema struktury disperzního materiálu
a) struktura zrnitá, b) struktura buněčná

2. Materiál skeletu je dalším důležitým činitelem ovlivňujícím tepelné vlastnosti disperzního materiálu. Jeho vliv se však více projevuje u tepelné kapacity, méně u tepelné vodivosti. ČUDNOVSKIJ /5/ např. uvádí, že při asi 60 % pórovitosti je tepelná vodivost vrstvy železných kuliček stejná jako vodivost vrstvy kuliček z křemene, přestože tepelná vodivost železa je až 50x vyšší než u křemene.
3. Velikost zrn a pórů - čím menší budou rozměry zrn a pórů, tím méně se uplatňují v celkovém sdílení tepla konvekce a radiace. Při malých rozměrech pórů klesá tepelná vodivost plynu v nich obsaženého. Na obr. 6.6 je znázorněna obecná závislost tepelné vodivosti disperzního materiálu na objemové hmotnosti při různé zrnitosti.

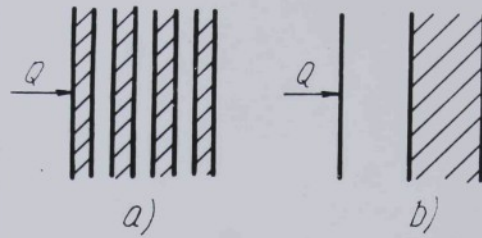


Obr. 6.6. Závislost λ na objemové hmotnosti /8/

- 1 - pro jemnozrný materiál
2 - pro hrubozrný materiál

Tato skutečnost je možné vysvětlit na modelu disperzního materiálu podle KRISCHERA /39/, názorněného na obr. 6.7.

V případě podle obrázku 6.7 a) se prakticky nemůže uplatnit ve větší míře tepelná vodivost skeletu, protože je silně narušen přítomností druhé fáze - špatného vodiče. V případě dle obr. 6.7 b) jsou příznivější podmínky pro sdílení tepla v mezizrno-



Obr. 6.7. Model disperzního materiálu podle KRISCHERA /37/

a) jemnozrnného, b) hrubozrnného

(šrafované pruhy značí tuhou fázi, bílé pruhy plyn).

vém prostoru a také se výrazněji uplatní tepelná vodivost materiálu skeletu.

4. Nestejná velikost částic - v tomto případě hrubá složka tvoří skelet, složka jemnozrnná představuje druhou fázi, která vyplňuje póry skeletu.

Je-li V_1 ... objem hrubozrnné frakce [m^3];

V_2 ... objem jemnozrnné frakce [m^3];

V_3 ... objem vzduchu [m^3];

V ... celkový objem disperzní soustavy [m^3];

pak platí, že celkový objem je roven součtu parciálních objemů:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (6.5)$$

Celková pórovitost soustavy

$$m = \frac{V_3}{V} \quad (6.6)$$

Pórovitost skeletu (hrubozrnné složky) je dána vztahem

$$p = \frac{V - V_1}{V} = \frac{V_2 + V_3}{V} \quad (6.7)$$

Jemnozrnná složka má vlastní pórovitost

$$n = \frac{V_3}{V_2 + V_3} \quad (6.8)$$

Pro celkovou pórovitost pak platí

$$m = p \cdot n \quad (6.9)$$

Ze vztahu (6.9) plyne, že smícháním nejméně dvou různých frakcí zrnitého materiálu získáme soustavu, která má celkovou pórovitost menší než obě složky, což se nutně příznivě projeví na velikosti tepelné vodivosti.

5. Tvar částic a způsob jejich kontaktu má vliv na objemovou hmotnost disperzního materiálu a tím i na tepelnou vodivost. S rostoucím koeficientem hranatosti W_k (poměr skutečného a teoretického měrného povrchu) se zvyšuje počet neobsazených míst v prostorové mřížce skeletu, tím roste pórovitost a klesá tepelná vodivost.

Důležitou součástí tepelné kapacity disperzního materiálu je objemová hmotnost. Platí, že

$$\rho = (1-m) \cdot \rho_1 \quad (6.10)$$

kde ρ_1 ... měrná hmotnost materiálu skeletu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];
 ρ ... objemová hmotnost systému [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];
 m ... pórovitost systému.

Pro směs dvou frakcí je možno použít vztah //8/

$$v = v_1 N_1 + v_2 N_2 - K_s \cdot (N_1 \cdot \log N_1 + N_2 \cdot \log N_2) \quad (6.11)$$

kde v ... měrný objem směsi [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$];
 v_1 ... měrný objem hrubozrné frakce [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$];
 v_2 ... měrný objem jemnozrné frakce [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$];
 N_1 ... hmotnostní podíl hrubé frakce;
 N_2 ... hmotnostní podíl jemné frakce;
 K_s ... empirická konstanta.

Podle tohoto vztahu je možné najít nejvhodnější poměr frakcí ve směsi, kdy objemová hmotnost bude maximální a pórovitost minimální. Vytvoříme-li takovou směs, bude mít nejvyšší tepelnou vodivost, protože pórovitost bude minimální.

Další důležitou složkou tepelné kapacity disperzní soustavy je měrné teplo. Z tepelné bilance je možné pro měrné teplo odvodit vztah //8/

$$C = C_1 + m \cdot \frac{\varrho_2}{\varrho} \cdot C_2 \quad (6.12)$$

- kde c ... měrné teplo soustavy [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];
 c_1 ... měrné teplo tuhé složky [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];
 c_2 ... měrné teplo plynné složky [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];
 ϱ ... objemová hmotnost soustavy [$kg \cdot m^{-3}$];
 ϱ_2 ... objemová hmotnost plynu [$kg \cdot m^{-3}$];
 m ... pórovitost systému.

Z rovnice (6.12) plyne, že měrné teplo disperzního materiálu se rovná měrnému teplu materiálu skeletu, zvětšenému o tepelný obsah plynu v pórech.

Z hlediska ochlazovacích účinků je vhodnější uvažovat o tepelné kapacitě disperzního systému. Je definována vztahem

$$C = \varrho \cdot c \quad (6.13)$$

- kde C ... tepelná kapacita [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$],
 ϱ ... objemová hmotnost [$kg \cdot m^{-3}$],
 c ... měrné teplo [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$].

Tepelná kapacita udává, jaké množství tepla pojme daný objem směsi na rozdíl od měrného tepla, vztaženého na 1 kg. Měrné teplo prakticky nezávisí na pórovitosti systému.

Z provedeného rozboru tepelně fyzikálních vlastností disperzních materiálů vyplývá, že:

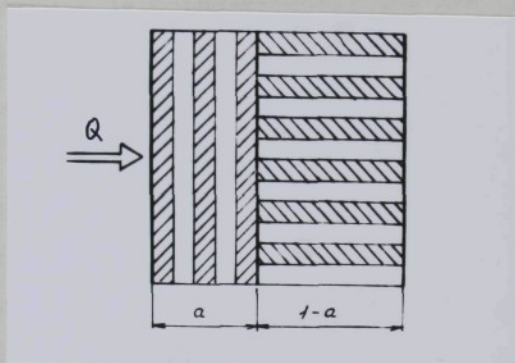
1. Zvýšeného ochlazovacího účinku formy lze dosáhnout zvýšením tepelné vodivosti a tepelné kapacity.
2. Tepelná vodivost formy závisí na tepelné vodivosti materiálu skeletu, avšak nepřímě a nedá se v širokých mezích ovlivňovat pouze změnou materiálu skeletu.
3. Pro tepelnou vodivost disperzního materiálu jsou rozhodující především jeho dispergитní vlastnosti (pórovitost, velikost a tvar zrna, způsob kontaktu) a druh média vyplňujícího póry.
4. Tepelnou vodivost disperzního materiálu lze zvýšit volbou tepelně vodivějšího materiálu skeletu, volbou vhodné velikosti

a tvaru zrna a dosažením minimální pórovitosti.

5. Objemovou hmotnost lze zvyšovat za předpokladu minimální pórovitosti jedině použitím materiálu s vyšší měrnou hmotností.
6. Měrné teplo disperzního systému závisí především na měrném teple materiálu skeletu.

Jak již bylo řečeno dříve, je možné sádrovou směs považovat za disperzní materiál. Po ztuhnutí sádrové kaše je skelet formy tvořen krystalickým dihydrátem síranu vápenatého. Mezery mezi jednotlivými krystaly jsou vyplněny vodou (viz str. 53). Po vysušení formy je tato tzv. volná voda odstraněna, mezi jednotlivými krystaly vzniknou vzduchové póry a po vyžihání se částečně odstraní i voda vázaná a proběhne překrystalizace sádry. Struktura sádrových forem na rozdíl od forem z pískových formovacích směsí není zrnitá, ale je tvořena neuspořádaným síťovým hranolovitých krystalů (viz obr. 6.2, 6.3). Jak uvádí PETZOLD /47/ je sádrový materiál spojitě pórovitý a jeho poresita činí 40 - 50 %. Tyto póry jsou velmi malé a proto se dá předpokládat, že v sádrových formách se přenos tepla děje pouze vedením a v podstatě vůbec se neuplatní konvekce a radiace. Protože i velikost krystalů je velmi malá, můžeme sádrovou považovat za jemně disperzní materiál. Z hlediska tepelné vodivosti by fyzikální model byl stejný jako na obr. 6.7a). To znamená, že ochlazovací účinky sádry jsou dány pouze její tepelnou kapacitou, a proto jsou velmi malé (sádra se používá spíše jako tepelný izolátor). Z toho plyne, že pokud chceme zvýšit ochlazovací účinky sádrových forem, je třeba do nich přidávat aditiva (přísky) s vyšší tepelnou vodivostí a tepelnou kapacitou. Z teoretického hlediska je sádrová formovací směs s aditivem polydisperzním materiálem. Nahradíme-li zrna aditiva koulemi, pak si můžeme strukturu takového materiálu představit tak, že zrna aditiva jsou rozložena v uzlech tělesně

středěné krychlové mřížky a jsou mezi sebou spojena tyčovitými krystaly sádry /67/. Z hlediska tepelné vodivosti si sádrovou směs s aditivem můžeme vysvětlit na modelu /37,67/, znázorněném na obr. 6.8.



Obr. 6.8. Model sádrové formovací směsi s aditivem

V části a , která nám nahrazuje sádro, je tok tepla kolmý na vrstvy a platí /67/

$$\frac{1}{\lambda_2} = \frac{(1-m)}{\lambda_s} + \frac{m}{\lambda_v} \quad (6.14)$$

V části $(1-a)$, která nahrazuje přísadu, je tok tepla rovnoběžný s vrstvami a platí /67/

$$\lambda_1 = (1-m) \lambda_p + m \lambda_v \quad (6.15)$$

kde λ_s ... tepelná vodivost sádry $[W.m^{-1}.K^{-1}]$,
 λ_p ... tepelná vodivost přísady $[W.m^{-1}.K^{-1}]$,
 λ_v ... tepelná vodivost média v pórech $[W.m^{-1}.K^{-1}]$,
 $(1-m)$... objem tuhé fáze,
 m ... objem pórů.

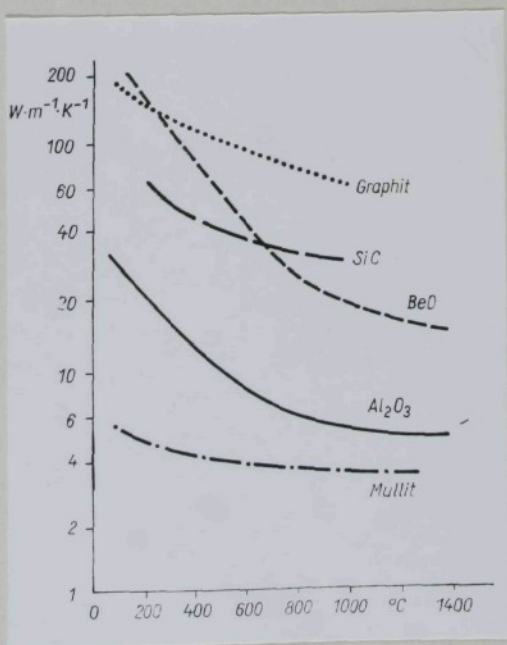
Celková vodivost soustavy dle KRISCHERA /37/ pak je

$$\lambda = \frac{1}{\frac{(1-a)}{\lambda_1} + \frac{a}{\lambda_2}} \quad (6.16)$$

- kde λ tepelná vodivost soustavy [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 λ_1 tepelná vodivost modelové soustavy pro část (1-a),
 (obr. 6.8)
 λ_2 tepelná vodivost modelové soustavy pro část a
 (obr. 6.8)
a bezrozměrný faktor struktury.

Hodnoty faktoru a je nutno získávat zpětným výpočtem z hodnot naměřených. Tak např. TUREK /71/ kalorimetrickou metodou změřil, že tepelná vodivost sádrové směsi 70 % alabastrová sádra a 30 % SiC je $\lambda = 0,4536 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Po dosazení do vztahu (6.16) pak vychází velikost faktoru a rovna 0,5224.

Z provedeného rozboru tepelně fyzikálních vlastností sádrových formovacích směsí vyplývá, že je možno tepelnou vodivost (příp. tepelnou kapacitu) sádrové formovací směsi zvýšit přidáním vhodného aditiva s vyšší tepelnou vodivostí a měrným teplem, než má sádra. Závislost λ na teplotě pro některé z přísad přicházejících v úvahu je na obr. 6.9.



Obr. 6.9. Závislost λ na teplotě některých materiálů dle /47/

V tab. 6.3 na příloze s. 3 jsou uvedeny základní tepelně fyzikální vlastnosti některých materiálů, které mohou být jako přísady do sádrových směsí použity.

Přitom je třeba brát v úvahu hledisko zrnitosti přísady (velikosti a tvaru zrn), hledisko měrné hmotnosti přísady (otázka sedimentace příměsí - nevhodné rozdělení v průřezu formy) a v neposlední řadě i otázku mezifázového napětí mezi částicemi přísady a sádrovým roztokem.

7. EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ A VÝPOČET SOUČiniteLE TEPELNÉ AKUMULACE FORMY

Při rozboru tuhnutí odlitků v kombinovaných formách z materiálů s rozdílnými tepelně fyzikálními vlastnostmi (např. ocel a sádra) byly vymezeny základní možné směry technologie, kterými lze realizovat výrobu odlitků v kombinovaných formách při zabezpečení jejich požadované jakosti. Bylo ukázáno, že hlavní charakteristikou ochlazovacího účinku formy je součinitel tepelné akumulace formy b_2 . Při studiu však bylo zjištěno, že konkrétních hodnot součinitele b_2 je v literatuře poměrně málo a jsou udávány v širokém rozmezí (viz tab. 4.1). Konkrétně součinitel tepelné akumulace sádrových formovacích směsí dostupná literatura v podstatě neuvádí. Proto jsem se v první fázi řešení daného úkolu zaměřil na zjišťování součinitele tepelné akumulace sádrových formovacích směsí obsahujících různé přísady (aditiva); u nichž se předpokládalo, že zvýší tepelnou vodivost sáder.

7.1. Návrh metodiky a zkušební formy

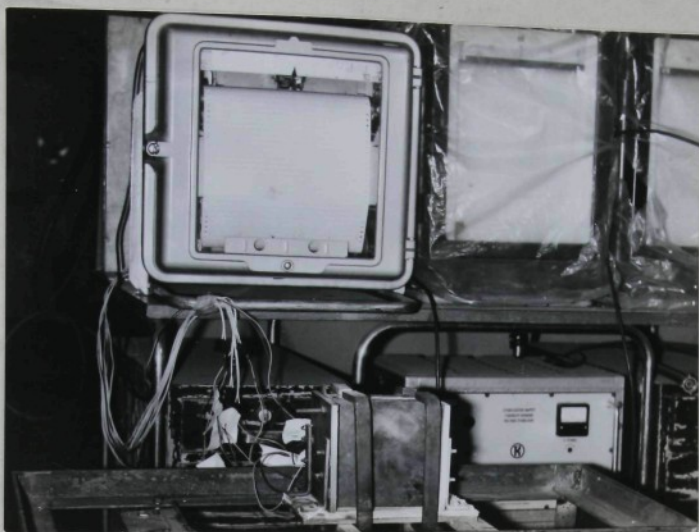
Při návrhu metodiky stanovení součinitele tepelné akumulace forem z různých materiálů se vycházelo ze zkušeností /20 a další/ a podmínek katedry materiálů a strojírenské metalurgie VŠST v Liberci. Na základě rozboru používaných metod zjišťování b_2 jsem použil technologickou lící metodu podle VEJNIKA (kap. 4.1.4). Pro experimentální stanovení b_2 i ke sledování průběhu tuhnutí byla navržena a vyrobena lící forma pro odlitek tvaru desky tak, aby bylo zaručeno jednorozměrné vedení tepla, tzn., aby forma měla polonekonečné rozměry vzhledem k odlitku. Toho

bylo dosaženo tím, že výška a délka odlitku byla minimálně 6x větší než jeho tloušťka.

7.2. Popis zkušebního zařízení

Licí forma je sestavena ze základní ocelové desky (z materiálu ČSN 11600) o rozměrech 260 x 135 x 10 mm, na které je připevněna izolační azbestová deska o tloušťce 5 mm. Na této základní desce jsou připevněny 2 boční ocelové desky (ČSN 11600) o rozměrech 150 x 120 x 8 mm vzdálené od sebe 150 mm. Mezi tyto boční stěny se vkládají dvě výměnné desky o rozměrech 150 x 150 x 20 mm z různých materiálů. Výměnné desky jsou k základní desce přichyceny pomocí čtyř třmenů. Vytvořená dutina formy má rozměry 150 x 130 x 20 mm a je od pevných bočních stěn izolována azbestovými vložkami. Zkušební forma je otočně upevněna na ocelovém stojanu tak, že na jedné straně je pevně přišroubována na otočný hřídel a z druhé strany je podepřena tyčí, která se dá vysunout. Dále je k rámu připevněno zařízení pro zachycení překlopené formy. Proti rozstříknutí kovu při vylévací zkoušce je zařízení opatřeno ochrannými plechovými kryty. Celkové uspořádání zkušebního zařízení je vidět z obr. 7.1, blokové schéma je na obr. 7.2.

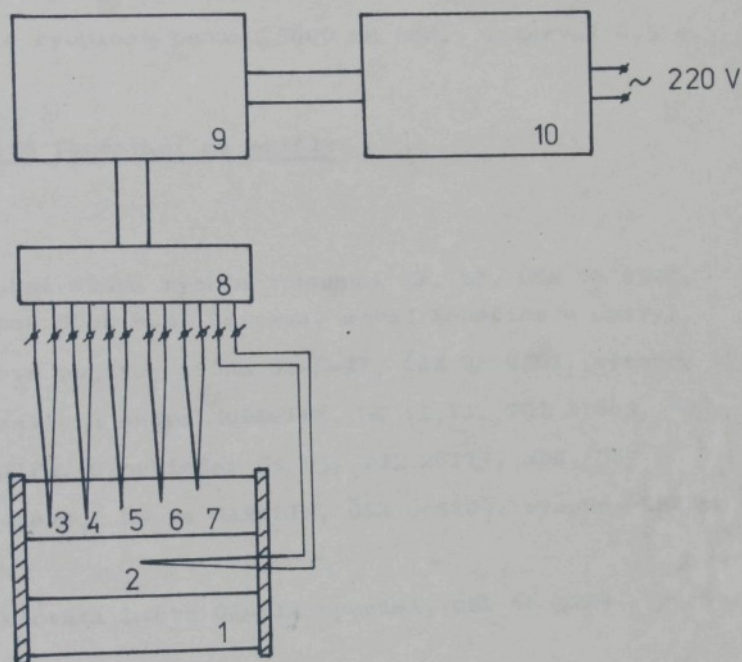
Navržené zkušební zařízení umožňuje sledování průběhu tuhnutí jednak vylévací zkouškou, jednak metodou měření teplotního pole odlitku i formy pomocí termočlánků.



Obr. 7.1. Celkový pohled na zkušební zařízení

7.3. Měření teploty

Teplotní pole zkušebních forem bylo proměřováno termočlánky NiCr-Ni (dráty originál Degusaa) ϕ 0,3 mm rozmístěnými ve stěně tvořené výměnnou deskou ze zkoušeného materiálu v různých vzdálenostech od líce formy. Termočlánky byly chráněny keramickou dvoukapilárou ϕ 3 mm. Otvary pro termočlánky byly vrtány ve směru tloušťky forem. Ke snížení chyb je třeba umístit termočlánky co nejblíže k sobě a otvary pro ně vrtat co nejmenší. V sádrových deskách byly termočlánky vsunuty do předvrtaných otvorů a utěsněny, v kovových formách byl jejich spoj přivařen ke dnu předvrtaného otvoru elektrickou jiskrou. Jeden termočlánek byl umístěn do středu odlitku. Kalibrační křivka termočláneků je uvedena na příloze s. 4. Pro kalibraci byly použity vařící voda, olovo a čistý Al /42/. Napětí termočláneků bylo měřeno a registrováno šestibodovým kompenzačním elektronickým zapisovačem EPP-09M3 (SSSR) a v několika případech zapisovačem



- 1 zkušební forma
- 2-7 termočlánky NiCr-Ni $\varnothing$ 0,3 mm v ochranné keramické dvoukapiláře
- 8 svorkovnice
- 9 kompenzační zapisovač EPP-09M3
- 10 stabilizátor napětí ST 5000.1

Obr. 7.2. Blokové schema měřícího zařízení

MKV 6 (NDR). Rychlost posuvu registračního papíru byla v prvním případě 4800 mm/hod. Zapisovač pracoval s intervalem mezi jednotlivými měřeními 1,5 s, takže teplota každého měřeného místa byla registrována vždy po 9 s. V případě německého zapisovače byla rychlost posuvu 3600 mm/hod., interval 2,5 s.

7.4, Použité formovací materiály

a) pojiva

- stavební sádra rychle tuhnoucí II. tř. ČSN 72 230R, výrobce SCSD n.p. Ostrava, závod Kobernice u Opavy;
- sádrové pojivo, třída G2-B-II, ČSN 72 2301, výrobce týž;
- alabastrová sádra MODEGIPS, MG 11, II., TGL 21843, NDR /38/;
- HARTGIPS, Gipsbinder G5/B3, TGL 28119, NDR /38/;
- zatmelovací hmota GARASIN, ČSN 665204, výrobce DENTAL n.p., Jičín;
- zatmelovací hmota GLORIA special, ČSN 66 5224, výrobce týž.

b) aditiva

- | | | |
|---|---|--|
| - karborund SiC, zrnitost $d_{50}=0,22$ | } | výrobce: Spojené
záv. pro výrobu
karborunda,
Benátky n.J. |
| - karborund SiC, zrnitost $d_{50}=0,4$ | | |
| - korund Al_2O_3 , zrnitost $d_{50}=0,1$ | | |
| - hliníkový prášek AlBo 40, výrobce: Športvýroba VD Bardejov, chem. výroba Gejnica; | | |
| - železný prášek, zrnitost $d_{50} = 0,2$ | } | inv. majetek VŠST |
| - zirkonový prášek, zrnitost $d_{50}=0,2$ | | |
| - křemičitý písek T2S Střeleč,
$d_{50} = 0,6$ | | dodavatel: KSUP
K. Vary. |

c) kovová forma

- nízkouhliková ocel ČSN 11373. Zkušební desky byly vyrobeny třískovým obráběním z plechu o tloušťce 30 mm. Při zjišťování součinitele tepelné akumulace b_2 byly použity desky

bez nátěru a dále bylo ověřeno několik izolačních (koki-
lových) nátěrů, které byly nanášeny nástřikem na předebrá-
té desky.

Použité nástřiky:

- 1) izolační nástřik - 10 % mleté křídý, 7 % vodní sklo,
27 % žilovaný azbest, (850°C), 56 %
voda;
- 2) nátěr F4 Fosco Dycote 39;
- 3) nátěr F4 Acheson Dag 133T;
- 4) zirkonový nástřik - ZrO_2 + vodní sklo.

7.5. Příprava a zpracování sádrových zkušebních vzorků

Výroba sádrových forem se skládá z následujících dílčích
operací:

- příprava práškové sádrové směsi;
- stanovení hodnoty vodního součinitele;
- příprava sádrové kaše;;
- odlévání sádrové kaše do formy;
- tepelné zpracování sádrových odlitků;

Všechny operace přípravy sádrových forem je nutné provádět velmi
pečlivě, protože na přesném dodržování technologických předpisů
výrazně závisí kvalita vyráběných odlitků.

7.5.1. Příprava suché sádrové směsi

Na laboratorních vahách se odváží požadované množství sád-
ry a aditiva a vše se sesype do nádoby, ve které se suchá směs
připravuje. Pomocí elektrického míchadla (obr. 7.3 na příl. s.5)

se směs promíchá tak, aby byla homogenní, tj. aby se rovnoměrně promíchaly částice pojiva a aditiva. Tím je směs připravena k dalšímu zpracování.

7.5.2. Stanovení hodnoty vodního součinitele

Vodní součinitel VS nám udává množství vody v ml potřebné na rozmíchání 100 g suché sádrové směsi, které zaručí, že vzniklá sádrová kaše bude odpovídat daným podmínkám /87/.

Použité pomůcky a zařízení:

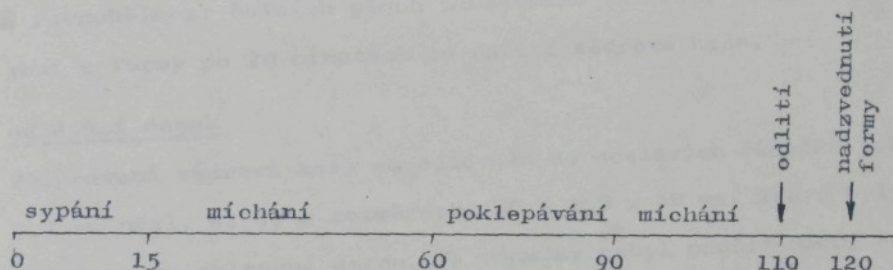
nádoba z plastické hmoty, odměrný válec, laboratorní váhy, stěpky, elektrické míchadlo, válcová forma o ϕ 35 mm a výšce 50 mm, skleněná deska, milimetrový papír a lžička.

Postup zkoušky konzistence:

- na laboratorních vahách se naváží 100 g suché sádrové směsi;
- v odměrném válci se odměří zvolené množství vody 20°C teplé;
- po spuštění stopek následuje 15 [s] sypání suché sádrové směsi do vody;
- 45 [s] míchání sádrové kaše pomocí el. míchadla (obr. 7.4 na příl. s. 5); míchání se musí provádět tak, aby se do vznikající sádrové kaše zamíchalo co nejméně vzduchu;
- 30[s] poklepávání nádoby se sádrovou kaší o desku stolu, aby se z kaše odstranily vzduchové bubliny;
- 20 [s] homogenizační míchání ručně lžičkou;
- po skončení homogenizačního míchání ve 110. [s] následuje odlití do válcové formy postavené na skleněné desce, pod kterou je položen milimetrový papír;
- ve 120.[s] po spuštění stopek se forma opatrně nadzvedne a sádrová kaše se rozleje do kruhového koláče určitých rozměrů, které se odečtou pomocí milimetrového papíru.

Tento postup se opakuje tak dlouho, dokud zvolené množství vody nezajišťuje takovou konzistenci sádrové kaše, že po nadzvednutí formy se utvoří koláč o ϕ 90 mm.

Zjištěné hodnoty vodního součinitele VS ověřovaných sádrových směsí jsou uvedeny v tab. 7,1 na příloze s. 42 - 51.



Obr. 7.5, Časový rozvrh zkoušky konzistence /87/

7.5.3. Příprava sádrové kaše

Při přípravě sádrové kaše byl dodržován stejný časový postup jako při zjišťování hodnoty vodního součinitele pouze s tím rozdílem, že po skončení homogenizačního míchání (ve 110. s od počátku sypání suché sádrové směsi do vody) se sádrová kaše odlila do příslušné formy. Použité pomůcky pro přípravu sádrové kaše byly rovněž stejné jako při zjišťování VS. Množství sádrové kaše se připravuje podle velikosti formy.

7.5.4. Odlévání sádrové kaše do formy

Na naše zkoušky byly použity dva druhy zkušebních vzorků. Pro měření prodyšnosti a pevnosti v tlaku byly zhotovovány válečky o ϕ 50 mm a výšce 50 mm, pro zjišťování součinitele tepelné akumulace pak desky o rozměrech 150 x 150 x 20 mm.

a) odlévání válečků

Připravená sádrová kaše se odlévala do hliníkových forem (obr. 7.6 na příl. s. 6). Na líc formy byla před odlitím nanесena tenká vrstva separačního nátěru (olej, Sidel apod.). Forma byla při odlévání postavena na skleněné desce a hned po odlití byla zakryta druhou skleněnou deskou, aby byl zajištěn rovný povrch a rovnoběžnost čelních ploch zkušebního válečku. Vzorek byl vyjmut z formy po 20 minutách od nalití sádrové kaše.

b) odlévání desek

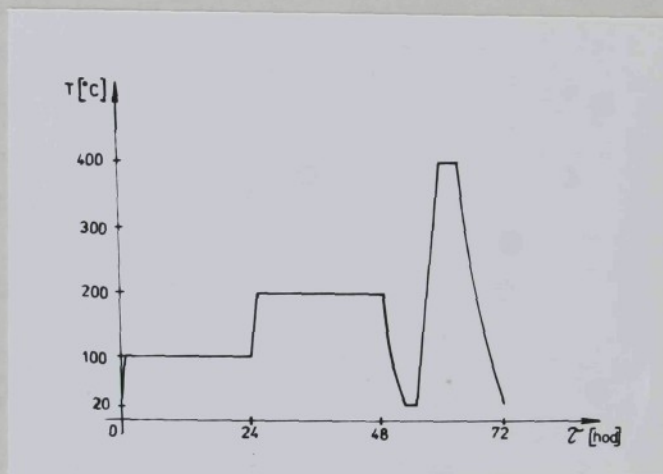
Připravená sádrová kaše se odlévala do ocelových rámečků (obr. 7.7 na příl. s. 6) o rozměrech 150 x 150 x 20 mm, které byly položeny na skleněné desce. Na rámečky nebyl použit žádný separační prostředek. Odlité vzorky i s rámečky se po 20 min. od nalití oddělily od skleněné desky. Vzorky se pro další použití z rámečků nevyndávaly.

7.5.5. Tepelné zpracování sádrových vzorků

Tepelné zpracování sádrových vzorků vycházelo z výsledků studia technologie výroby sádrových forem, které bylo prováděno na katedře materiálu a strojírenské metalurgie VŠST v Liberci /32,33,34,35/.

Vzorky se ponechaly po vyjmutí z formy 25 hodin na vzduchu. Potom bylo provedeno sušení při teplotách 100 a 200°C v sušárně STE 26 s výměnnou atmosférou. Doba sušení byla vždy 24 hodin včetně času potřebného k dosažení dané teploty. Po sušení se vzorky nechaly vychladnout v sušárně na 100°C (pokud se sádrové formy vyjmou z pece při teplotě vyšší než cca 150°C, popraskají v důsledku prudkého ochlazení) a potom byly přemístěny do komorové

odporové pece TS-PEK-1, kde byly vyžehány při teplotě 400°C po dobu 3-4 hodin. Potom následovalo pomalé ochlazení v peci na teplotu cca 100°C . Při této teplotě byly vzorky vyjmuty z pece a uloženy do exikátoru se silikagelem, kde byly ponechány až do okamžiku použití. Schématicky je cyklus tepelného zpracování znázorněn na obr. 7.8.



Obr. 7.8. Cyklus tepelného zpracování sádrových forem

7.6. Morfologie a rozložení aditiv na lomových plochách sádrových vzorků

K hodnocení byly použity trámečky o průřezu 50 mm^2 a tyčky o $\phi\ 5\text{ mm}$ vyrobené ze sádrových směsí stejným technologickým postupem jako formy. Vzorky byly běžným způsobem tepelně zpracovány. Bylo provedeno fotografování makrostruktury lomové plochy příslušných vzorků na zařízení pro makrofotografie objektivem MIKROTAR M 90 při zvětšení 4x. Vzorky byly použity bez jakýchkoliv předchozích úprav. Z těchto makrofotografií se dá v hrubých rysech určit rozložení jednotlivých aditiv v průřezu

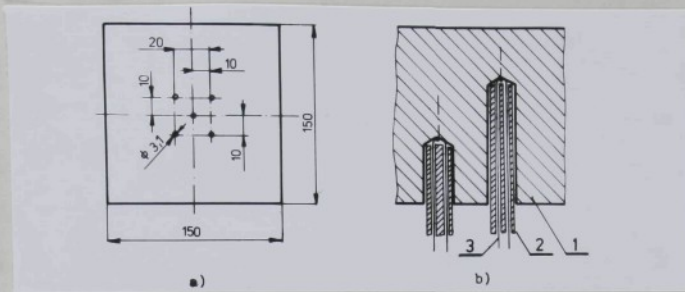
vzorků. Podrobněji je tato problematika probrána v práci /46/. Protože hodnocení rozložení aditiv v sádrových formovacích směsích určené z makrofotografií nám dává pouze hrubý přehled, bylo toto hodnocení provedeno ještě ve VÚHŽ Dobrá, pob. Kadštejn.

Vzorky byly zlomeny tak, aby lomové plochy měly pokud možno rovinný povrch. Morfologie lomových ploch byla studována na řádově kvacím elektronovém mikroskopu TESLA BS 300 při zvětšení 125x a 2500x. Řádkovací elektronový mikroskop pracoval v režimu sekundárních elektronů při urychlovacím napětí 15 kV. Morfologie zjištěná na lomových plochách několika vzorků z různých sádrových směsí je uvedena na přílohách s. 7-15.

Dále byla provedena analýza na energiově disperzním analyzátoru fy. KEVEX. Na přílohách s. 9, 11, 13, 15 jsou uvedeny plošné rtg. obrazy lomových ploch některých vzorků. Černé oblasti na uvedených snímcích jsou zapříčiněny nedostatečnou emisí rtg. záření ze členitých oblastí lomové plochy.

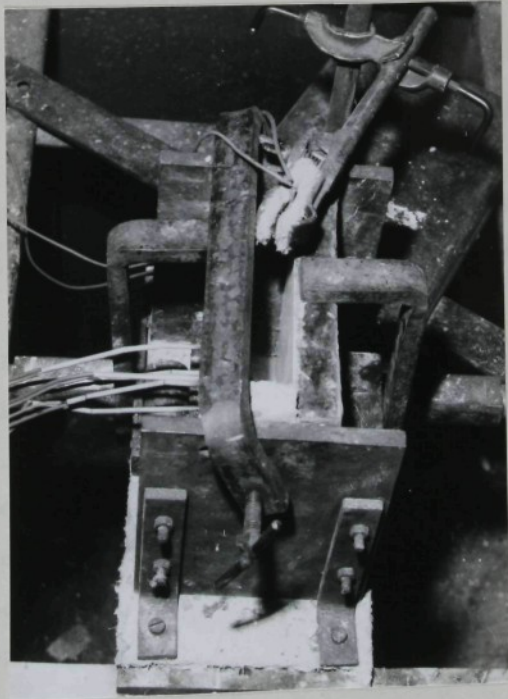
7.7. Měření součinitele tepelné akumulace b_2

Měření bylo prováděno v laboratorních podmínkách slévárny katedry materiálu a strojírenské metalurgie VŠST v Liberci. Před zahájením každého měření byla sestavena zkušební forma tak, že do zkušebního zařízení se vložily dvě desky ze zkoušené sádrové směsi a upevnily se pomocí čtyř třmenů tak, že šířka vzniklé dutiny formy byla 20 mm. Od čelních ploch se dutina formy odizolovala dvěma proužky azbestu o tloušťce 5 mm. Do předvrtaných otvorů v jedné ze zkušebních desek se umístily termočlánky (obr. 7.9), které přes svorkovnici byly zapojeny do zapisovače. Do středu dutiny formy byl umístěn termočlánek k měření teploty



Obr. 7.9. a) Schéma rozmístění termočlánků ve stěně formy,
b) 1...forma, 2... keramická dvojkapilára,
3... termočlánek

odlitku. Sestavená forma je na obr. 7.10. Počáteční teplota ($t_{2poč}$) byla 20°C . Do připravené formy byl odléván čistý hliník



Obr. 7.10. Sestavená forma pro zjišťování b_2

(ČSN 424103) o lici teplotě 720°C . Tavenina byla připravována v elektrické odporové peci HDG 4/3 v grafitovém kelímku. Při teplotách $750 - 760^{\circ}\text{C}$ bylo provedeno ošetření taveniny a po jejím zchladnutí na lici teplotu bylo provedeno odlití. Teplota taveniny v kelímku byla kontrolována poměrným termočlánkem NiCr-Ni $\varnothing$ 1 mm. Na zapisovači byl zaznamenáván průběh teploty ve stěně formy v daných vzdálenostech od líce formy a průběh teploty uvnitř odlitku. Doba lití nepřesáhla 3 sekundy. Po ztuhnutí a částečném zchladnutí odlitku byla forma rozebrána, odlitek vyjmut a forma se opět sestavila do původního stavu. Po dosažení teploty ($t_{2\text{poč}}$) cca 100°C na lici formy se přistoupilo k druhému lití.

7.8. Postup vyhodnocování naměřených výsledků

7.8.1. Grafické zpracování naměřených hodnot

Ze záznamů zapisovače byly pomocí kalibrační křivky a tabulek vyhodnoceny časové průběhy teploty ve středu odlitku 1 a teplot v pěti měřených místech ve stěně formy (2 - 6) ve vzdálenostech 2, 5, 8, 11 a 15 (14) mm od líce formy. Tyto průběhy teplot pro několik měřených směsí jsou uvedeny na přílohách s. 16-19. Na přílohách s. 20-22 jsou znázorněny průběhy teplot pro kokily bez nátěru a s nátěrem pro počáteční teploty $T_{2\text{poč}} = 300, 400$ a 500°C .

Z křivky tuhnutí zaznamenané termočlánkem, který byl umístěn ve středu odlitku, se určila doba tuhnutí odlitku τ , a okamžik ukončení tuhnutí, ve kterém se z průběhů teplot ve stěně formy odečetly teploty v daných vzdálenostech od líce formy. Odečtené údaje teplot, doba tuhnutí a počáteční teplota formy byly

spolu s hloubkou prohrátí formy x_2 (zjištěno z průběhu teplotního gradientu ve stěně formy - několik příkladů je uvedeno na přílohách s. 23 až 26) a s tepelně fyzikálními konstantami čistého Al ($1_{kr} = 396071 \text{ J.kg}^{-1}$ a $\rho_1 = 2460 \text{ kg.m}^{-3}/30/$) použity pro výpočet součinitele tepelné akumulace b_2 .

Pět naměřených hodnot teploty v závislosti na vzdálenosti od líce formy představuje vzhledem k zvláštním geometrickým podmínkám formy dvourozměrné teplotní pole. V našem případě představuje křivku, kterou VEJNÍK popsal rovnicí (4.6), příp. (4.8). Pro výpočet součinitele tepelné akumulace b_2 je nutno napřed vypočítat velikost exponentu paraboly n_2 .

7.8.2. Výpočet exponentu n_2 a součinitele b_2

7.8.2.1. Základní výpočet dle VEJNÍKA

V pracech /6,36,44,61,72,79/ byl stupeň paraboly n_2 vypočítáván pro každou naměřenou hodnotu (bod teplotního pole) zvlášť a potom byl jejich aritmetický průměr použit pro výpočet součinitele tepelné akumulace b_2 podle vztahu (4.7).

$$g_i = g_{kr} \cdot \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right)^{n_{2i}}$$

$$\ln \frac{g_i}{g_{kr}} = n_{2i} \cdot \ln \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right)$$

$$n_{2i} = \frac{\ln \frac{g_i}{g_{kr}}}{\ln \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right)}$$

$$n_{2\text{stř.}} = \frac{\sum_{i=1}^k n_{2i}}{k} \quad (7.1)$$

Vývojový diagram pro strojně početní zpracování je na příl. s. 27. Při tomto způsobu výpočtu se však jednotlivé exponenty n_{2i} někdy značně liší od $n_{2stř}$ a tím se při nahrazení skutečné křivky teplotního pole náhradní parabolou dopouštíme značných chyb. Proto byla na základě metody nejmenších čtverců /55/ navrženo několik dalších způsobů výpočtu a byl zpracován program v jazyce BASIC pro výpočet stupně paraboly n_2 a součinitele tepelné akumulace b_2 na počítači.

7.8.2.2. Linearizace vzhledem k parametru n_2

Jelikož neznámým parametrem ve vztahu (4.6) je n_2 , je vhodné tento vztah logaritmovat, a tím se linearizuje vzhledem k parametru n_2 . Metodou nejmenších čtverců pak hledáme parametr n_2 .

$$\vartheta_i = \vartheta_{kr} \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right)^{n_2}$$

$$\ln \vartheta_i = \ln \vartheta_{kr} + n_2 \ln \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right)$$

$$\sum_{i=1}^k \left(\ln \vartheta_i - \ln \vartheta_{kr} - n_2 \ln \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right) \right)^2 = \min$$

$$\sum_{i=1}^k \ln \vartheta_i \cdot \ln \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right) - \ln \vartheta_{kr} \sum_{i=1}^k \ln \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right) - n_2 \sum_{i=1}^k \left(\ln \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right) \right)^2 = 0$$

$$n_2 = \frac{\sum_{i=1}^k \ln \vartheta_i \cdot \ln \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right) - \ln \vartheta_{kr} \cdot \sum_{i=1}^k \ln \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right)}{\sum_{i=1}^k \left(\ln \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right) \right)^2} \quad (7.2)$$

Vývojový diagram pro strojně početní zpracování je uveden v příloze s. 28.

7.8.2.3. Vyvážený linearizovaný vztah

Při výpočtu dle kap. 7.8.2.2 jsme vlastně minimalizovali kritérium $\sum_{i=1}^k (\ln \vartheta_m - \ln \vartheta)^2 = \min$, kde ϑ_m je vyrovnaná hodnota (modelová).

Vhodnější v našem případě je ovšem kritérium $\sum_{i=1}^k (\vartheta_m - \vartheta)^2 = \min$, proto modifikujeme výpočet následujícím způsobem:

jelikož $\frac{\ln x_1 - \ln x_2}{x_1 - x_2} \sim \frac{1}{x_1}$ pro $(x_1 - x_2)$ malé, pak dostá-

váme $(x_1 - x_2) \sim x_1 (\ln x_1 - \ln x_2)$.

Po této úvaze vyplývá, že

$$\vartheta_i = \vartheta_{kr} \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right)^{n_2}$$

$$\ln \vartheta_i = \ln \vartheta_{kr} + n_2 \ln \left(1 - \frac{x_i}{x_2}\right)$$

$$\sum_{i=1}^k (\ln \vartheta_i - \ln \vartheta_{kr} - n_2 \ln (1 - \frac{x_i}{x_2}))^2 = \min$$

$$\sum_{i=1}^k (\ln \vartheta_i - \ln \vartheta_{kr} - n_2 \ln (1 - \frac{x_i}{x_2}))^2 \cdot \vartheta_i^* = \min$$

$$\sum_{i=1}^k \vartheta_i^2 \ln \vartheta_i \cdot \ln (1 - \frac{x_i}{x_2}) - \ln \vartheta_{kr} \sum_{i=1}^k \vartheta_i^2 \ln (1 - \frac{x_i}{x_2}) - n_2 \cdot \sum_{i=1}^k \vartheta_i^2 (\ln (1 - \frac{x_i}{x_2}))^2 = 0$$

$$n_2 = \frac{\sum_{i=1}^k \vartheta_i^2 \ln \vartheta_i \cdot \ln (1 - \frac{x_i}{x_2}) - \ln \vartheta_{kr} \sum_{i=1}^k \vartheta_i^2 \ln (1 - \frac{x_i}{x_2})}{\sum_{i=1}^k \vartheta_i^2 (\ln (1 - \frac{x_i}{x_2}))^2} \quad (7.3)$$

Vývojový diagram pro strojně početní zpracování je uveden na příloze s. 29.

7.8.2.4. Regrese mocnin

Prokládáme-li křivku, jejíž rovnice není lineární v neznámých parametrech, vznikají potíže při řešení normálních rovnic, které nejsou obecně lineární. Postupujeme tak, že se snažíme nelineární regresní funkci převést na funkci lineární.

Rovnice (4.6) je nelineární v neznámých parametrech, proto byla použita regrese mocnin podle kalkulátoru CASIO FX-180 P.

$$\eta_2 = \frac{k \sum_{i=1}^k \ln g_i \cdot \ln(1 - \frac{x_i}{x_2}) - \sum_{i=1}^k \ln g_i \cdot \sum_{i=1}^k \ln(1 - \frac{x_i}{x_2})}{k \sum_{i=1}^k (\ln(1 - \frac{x_i}{x_2}))^2 - (\sum_{i=1}^k \ln(1 - \frac{x_i}{x_2}))^2} \quad (7.4)$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^k \ln g_i - \eta_2 \sum_{i=1}^k \ln(1 - \frac{x_i}{x_2})}{k} \quad (7.5)$$

pro rovnicí $g_i = A \cdot (1 - \frac{x_i}{x_2})^{\eta_2}$ (7.6)

Tento výpočet má určitou nevýhodu v tom, že nerespektuje průnik osou y v hodnotě 660°C (teplota tuhnutí čistého Al) na lici formy. Proto mohou být výsledky tímto nedostatkem ovlivněny. ANISOVIČ /1/ však uvádí, že teplota na lici formy nedosahuje teploty tuhnutí daného kovu, a proto (hlavně v případě kovových forem) má i tento způsob výpočtu své oprávnění. Vývojový diagram pro strojně početní zpracování je uveden na příloze s. 30.

7.8.2.5. Program pro výpočet n_2 a b_2 na počítači

Program v jazyce BASIC pro výpočet stupně paraboly n_2 a součinitele tepelné akumulace formy b_2 je uveden v příloze s. 31-34. V programu jsou zahrnuty všechny čtyři dříve uvedené způsoby výpočtu n_2 a ze všech čtyř možností program vybírá (dle metody nejmenších čtverců) exponent s nejmenším reziduálním součtem čtverců. Tento výsledek je pak porovnáván s náhradou sinusovkou. V případě nahrazení skutečného průběhu teplot sinusovkou (4.8) používáme pro výpočet rovnici (4.9), kde člen $\sqrt{\frac{n_2+1}{2n_2}}$ rovnice (4.7) je nahrazen členem $\sqrt{\frac{1}{\pi-2}}$ z rovnice (4.9), po vyčíslení 0,935932, což odpovídá stupni paraboly $n_2=1,3299$.

Tento program byl použit na osobním mikropočítači SANYO PHC-30N a je možno ho použít i na ostatní běžně používané počítače (IQ-151 aj.). Vypočtené výsledky jsou uvedeny v tab. 7.1 na přílohách s. 42-51. V tabulce je uvedena vždy jen výsledná hodnota n_2 vypočtená metodou s nejmenším reziduálním součtem čtverců a z ní vypočtená hodnota součinitele tepelné akumulace formy b_2 . Na přílohách s. 36-39 je uvedeno několik příkladů nahrazení skutečného průběhu teplot náhradními křivkami.

7.8.2.6. Zhodnocení metod výpočtu n_2

V této práci je vyhodnocen soubor cca 200 měření, z toho 21 měření kovových forem. Při vyhodnocování bylo použito následujících výpočtů stupně paraboly n_2 :

- a) základní výpočet dle VEJNIKA;
- b) linearizace vzhledem k parametru n_2 ;
- c) vyvážený linearizovaný vztah;
- d) regrese mocnin.

Ze všech možností byl vždy vybrán exponent s nejmenším reziduálním součtem čtverců a tento výsledek byl pak porovnáván s nahrazením sinusovkou.

V případě sádrových směsí a formovacích materiálů s nižším součinitelem tepelné akumulace b_2 lze závislost teploty na vzdálenosti od líce formy zjištěnou experimentem, nejvhodněji nahradit parabolou n -tého stupně. Pokud bychom jednotlivé metody výpočtu seřadili podle přesnosti nahrazení, vychází následující pořadí:

1. základní výpočet dle VEJNIKA 42 %
2. regrese mocnin 25 %
3. vyvážený linearizovaný vztah 20,5 %
4. linearizace vzhledem k parametru n_2 12,5 %

Při tom se objevila určitá závislost na počáteční teplotě formy. Při $t_{2poč} = 20^\circ C$ bylo nejpřesnější nahrazení výpočtem dle VEJNIKA (71 %) a vyváženým linearizovaným vztahem (27 %). Při $t_{2poč} = 100^\circ C$ a více bylo nejpřesnější nahrazení regresí mocnin (51 %) a linearizací vzhledem k parametru n_2 (24 %).

U kovových forem vychází jako nejpřesnější nahrazení pomocí regrese mocnin (71 %), dále sinusovkou (24 %) a základní výpočet dle VEJNIKA (5 %).

Při vyhodnocování experimentů, resp. při odečítání hodnot z grafických záznamů zapisovače jsme narazili na určité problémy při určování konce tuhnutí na křivce tuhnutí, protože v některých případech není tento okamžik na grafu jednoznačně určen (přechod z prodlevy na křivce tuhnutí je velmi pozvolný). Dalším poměrně závažným nedostatkem bylo občasné selhání některého z termočlánků, což mělo za následek neúplnost zápisu měř-

ní. V těchto případech je zvýšená možnost chybného výpočtu z důvodů sníženého množství vstupních informací /2/.

7.9. Měření prodyšnosti sádrových směsí

Prodyšnost sádrových směsí byla měřena na tepelně zpracovaných vzorcích tvaru válce ϕ 50 a výšky 50 mm (příptava viz kap. 7.5.4).

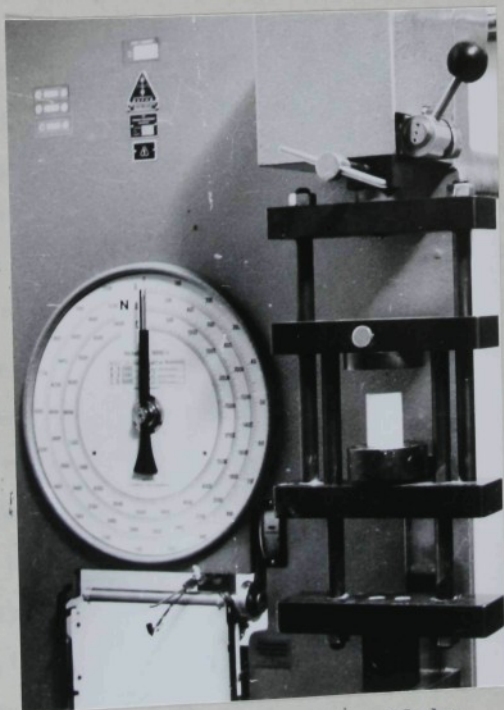
Měření bylo prováděno pomocí laboratorního zvonového přístroje (výrobce Č.Z Brno). Pro měření bylo použito dvou rozdílných typů měřících hlavice. Zpočátku byla používána hlavice a těsnicí pryžovou manžetou, která patří k příslušenství uvedeného přístroje (obr. 7.11 na příloze s. 40). Po nasazení měřící hlavice na čidlo přístroje se do ní zasunul zkoušený vzorek. Pryžová manžeta se nahustila hustilkou, čímž došlo k obepnutí válcové plochy vzorku a utěsnění prostoru mezi tryskou přístroje a okolím. Použitá tryska měla průměr 0,5 mm. Při použití této hlavice docházelo u některých zkušebních vzorků k jejich porušení tlakem pryžové manžety. Z toho důvodu jsme začali používat druhého typu měřící hlavice vyrobené podle návrhu prof. Odstrčila (obr. 7.13 na příl. s. 41). U této hlavice bylo utěsnění vzorku provedeno dvěma pryžovými kroužky. Vzorek byl při tom uzavřen v horní části měřící hlavice. Upevňovacím šroubem se přiměřenou silou připevnilo víčko hlavice. Zkontrolovala se poloha zvonu a trojcestným kohoutem byl vzduch puštěn tryskou ϕ 0,3 mm do prostoru pod měřený vzorek (obr. 7.12 na příl. s. 40). Na připojeném manometru byl odečten ustálený tlak a pomocí převodních tabulek byly hodnoty tlaku převedeny přímo na jednotky prodyšnosti v SI soustavě /24/. Později byl pro měření prodyš-

nosti použít přístroj na měření prodyšnosti LPiLR 1 (výrobce Instytut odlewnictwa, zakład doswiadczalny, Wadowice, PLR) viz obr. 7.14 na příl. s. 41. Na tomto přístroji se prodyšnost odečítá přímo v jednotkách prodyšnosti SI.

Prodyšnost byla měřena vždy nejména na 9 vzorcích a průměrné hodnoty jsou uvedeny v tab. 7.1, příloha s. 42-51.

7.10. Měření pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla měřena na vzorcích, které byly předtím použity k měření prodyšnosti. Měření bylo prováděno na trhačím stroji R-40 typ 2141, výrobce VEB Thüringen Industriewerk Rauenstein - NDR (obr. 7.15). Vzorky se vkládaly mezi dvě rovno-



Obr. 7.15. Měření pevnosti v tlaku

běžné tlakové desky stroje. Při vkládání zkušebních válečků bylo dbáno na čistotu a rovnoběžnost dosedacích ploch. Byla zvolena nejmenší rychlost zatěžování ($v = 10 \text{ mm/min}$), aby byl vzorek zatěžován rovnoměrnou silou bez rázů. Pevnost byla měřena vždy nejméně na devíti vzorcích. Z naměřené síly a průřezu zkušebního vzorku pak byla počítána mez pevnosti v tlaku dle vztahu

$$R_{mt} = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (7.7)$$

Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku pro ověřované sádrové směsi jsou uvedeny v tab. 7.1 na příloze s. 42-51.

7.11. Shrnutí a diskuse výsledků měření

Naměřené výsledky měření a vypočtené hodnoty jednotlivých veličin byly zpracovány tabelárně a graficky. Byl změřen součinitel tepelné akumulace b_2 , pevnost v tlaku R_{mt} a prodyšnost D pro 3 druhy sáder (stavební sádra, alabastrová sádra a HARTGIPS) a 58 různých sádrových směsí včetně zatmelovacích hmot GARASIN a GLORIA special. Měření bylo prováděno vždy na 3-9 vzorcích a v tabulce 7.1 na příl. s. 42-51 je uvedena vždy průměrná hodnota. Dále byl stanoven součinitel tepelné akumulace pro ocel ČSN 11373 a pro formy z téhož materiálu opatřené na líci 3 různými izolačními nátěry.

Dále byly výsledky zpracovány graficky. Vynesenými naměřenými hodnotami byly prokládány křivky pomocí regresní analýzy. Při tom bylo použito programového vybavení vědeckého kalkulátoru CASIO fx-180 P. V případě závislosti součinitele tepelné akumulace formy na množství přísady (resp. na teplotě) v podstatě

ve všech případech dávala nejlepší výsledky exponenciální regrese. Proložené křivky mají rovnici ve tvaru

$$y = A \cdot e^{Bx} \quad (7.8)$$

Korelační koeficienty se v uvedených případech pohybovaly v rozmezí $r = 0,6454 - 0,9943$. U každého grafu na příloze s. 52-62

jsou uvedeny: konstantní člen A , regresní koeficient B a korelační koeficient r . V případě závislosti meze pevnosti v tlaku na množství přísady bylo opět použito exponenciální regrese a v některých případech i lineární regrese

$$y = A + Bx \quad (7.9)$$

Korelační koeficienty se pohybovaly v rozmezí $r = 0,7866 - 0,9949$.

Ze zjištěných hodnot je možno vyslovit následující závěry:

1. součinitel tepelné akumulace b_2 se zvyšujícím se obsahem přísady v sádře se ve většině případů zvětšuje (kromě alabastrové sádry s Al_2O_3 a některých směsí třífázových). Největšího procentuálního zvýšení bylo dosaženo u směsi stavební sádry s 10 % AlBO 40, kde došlo ke zvýšení při 20°C o 72 % a při 100°C o 53 % (v absolutních hodnotách z 697 na 1199 $W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$). Podobné velké zvýšení bylo dosaženo i u směsi stavební sádry s práškovým Fe (při 20°C o 72 % a při 100°C o 48 %). Rovněž přísada SiC do stavební sádry zvyšuje její tepelnou akumulaci při 20° o cca 54 % a při 100°C o cca 36 %. Kromě těchto směsí se výrazného zvýšení tepelné akumulace dosáhlo i u některých směsí trísložkových (stavební sádra + SiC + AlBO 40).

Největší hodnoty součinitele tepelné akumulace b_2 mají následující směsi:

stav. sádra + 10 % AlBO40	(100°C)	1250 $W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$,
stav. sádra + 15 % Fe	(100°C)	1244 " "

stav. sádra + 20 % Fe	(100°C)	1240	$W_{0.5}^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
stav. sádra + 15 % SiC + 1 % AlB040	(100°C)	1203	- " -
stav. sádra + 10 % AlB040	(20°C)	1199	- " -
stav. sádra + 20 % Fe	(20°C)	1196	- " -
stav. sádra + 5 % Fe	(100°C)	1176	- " -
stav. sádra + 50 % SiC	(100°C)	1135	- " -
stav. sádra + 15 % SiC	(20°C)	1086	- " -
stav. sádra + 20 % SiC	(100°C)	1085	- " -

V podstatě se potvrdil předpoklad, že tepelnou akumulaci zvýší hlavně přísady s vysokou tepelnou vodivostí.

Dále byl sledován vliv izolačních nátěrů na součinitel tepelné akumulace kovových částí forem. Při uvažované teplotě předehřevu 400°C se jako nejúčinnější ukázaly izolační nástřik a nátěr ACHESON Dag 133T, které snížily tepelnou akumulaci čisté ocelové desky na 50 %. Nátěr FOSECO Dycote 39 snížil b_2 o cca 42 % a nátěr ZrO_2 o cca 38 %.

2. pevnost v tlaku R_{mt} se zvyšujícím se obsahem příměsí v sádře naopak vesměs klesá. Nejvíce se snížila pevnost alabastrové sádry a to jak přísadou SiC tak Al_2O_3 . Přídavkem 50 % Al_2O_3 se pevnost v tlaku alabastrové sádry snížila na 20 % a přídavkem 50 % SiC na 26 %. Přitom klesá exponenciálně, HARTGIPS má sám o sobě malou pevnost v tlaku $R_{mt} = 0,347$ MPa a vliv přísad je velmi malý. Stavební sádra je na přísady rovněž citlivá. Pevnost směsi se 40 % SiO_2 se snížila na 9 %, s 10 % AlB040 na 4,1 %, s 20 % Fe na 41 %, s 50 % Al_2O_3 na 69 % a nejméně citlivá je na přídavek SiC. Pevnost směsi stavební sádry s 50 % SiC činí 85 % pevnosti čisté stavební sádry. Velké snížení pevnosti stavební sádry s SiC bylo pravděpodobně způsobeno velkou střední zrnitostí ($d_{50}=0,6$) použitého písku. U přídavku prášku AlB040 a Fe je snížení pevnos

způsobeno menšími adhezními silami mezi nekovovým pojivem (sádrou) a kovovým ostřivem. Jak se dá usoudit z morfologie lomové plochy na příl. s. 12, tak mezifázové napětí mezi sádrrou a Al práškem je tak velké, že se tyto dvě složky vůbec nespojí a kolem částic Al vznikají velké dutiny. Malá smáčivost Al prášku byla potvrzena i při přípravě kaše ze směsi sádra + Al, při které Al vyplavával na povrch připravované kaše a větší množství Al se již špatně rozmíchávalo v sádře v suchém stavu (velmi malá sypná hmotnost prášku).

3. prodyšnost sádry i sádrových formovacích směsí je vesměs velmi malá. Největších hodnot prodyšnosti bylo dosaženo u napěněné sádry a to 12 j.p.SI, dále u směsi alabastrové sádry s 50 % Al_2O_3 8 j.p.SI a u směsi alabastrové sádry s 50 % SiC 7,3 j.p.SI. Stavební sádra a její směsi s různými přísadami mají prodyšnost kolem 2 j.p.SI. Tato malá prodyšnost sáder a sádrových směsí, přestože se jedná o porézní materiály, je pravděpodobně způsobena tenkou velmi hladkou a neporézní vrstvičkou na povrchu jádra, která zde vznikne přesným okopírováním formy z PMMA nebo PVC. Protože je prodyšnost sáder velmi malá, je třeba v jádrech zhotovovat odvzdušňovací kanály.

4. Jak vyplývá ze snímků na příloze s. 9, 11, 13, 15, je rozložení aditiv v sádrových směsích poměrně rovnoměrné. S Al_2O_3 a SiC se sádra spojuje dobře, s Al, jak již bylo řečeno dříve, se nespojuje vůbec. Určité problémy byly i s práškem Fe, který z důvodu velké měrné hmotnosti v sádrové kaši sedimentoval ke dnu formy a jeho rozložení v průřezu vzorku nebylo rovnoměrné. Částečně se tato závada odstranila zvýšením hustoty sádrové kaše (byl snížen vodní součinitel).

Ze zkušeností získaných měření součinitele tepelné akumulace, meze pevnosti v tlaku a prodyšnosti sádrových směsí s různými aditivy jsem vycházel při návrhu formovacích směsí, které byly ověřovány při odlévání jednoduchých odlitků tvaru desky v kombinovaných formách.

8. ZJIŠŤOVÁNÍ PRŮBĚHU TUHNUTÍ DESKOVÉHO ODLITKU Z AL V KOMBINOVANÝCH FORMÁCH

Pro ověřování průběhu tuhnutí (zjištění polohy tepelné osy) bylo vybráno několik směsí, u kterých byly zjišťovány nejvyšší hodnoty součinitele tepelné akumulace. Byly odlévány deskové odlitky o rozměrech 20 x 150 x 150 mm z čistého Al (ČSN 424103) na stejném zařízení (kap. 7.2) jako při stanovování součinitele tepelné akumulace s tím rozdílem, že jedna výměnná deska byla ze sádrové směsi a druhá byla vyrobena z oceli ČSN 11 373 a opatřena kokilovým nástřikem. Seznam ověřovaných kombinací je na příloze s. 63 .

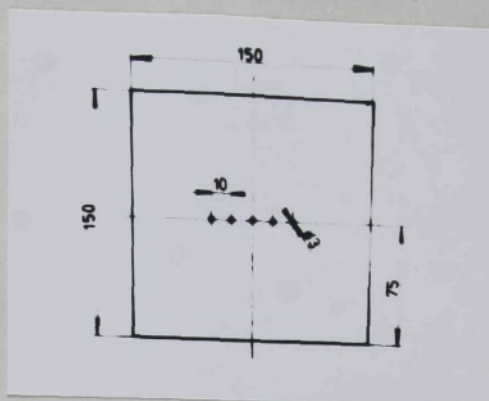
8.1. Příprava zkušební formy

a) Příprava sádrové části formy

Části zkušební formy (desky) ze sádrových směsí se připravovaly stejným způsobem jako desky pro zjišťování součinitele tepelné akumulace (viz kap. 7.5.4). Do sádrových desek bylo po ztuhnutí a ztvrdnutí vyvrtáno pět (šest) průchozích otvorů ϕ 3 mm (obr. 8.1). Potom byla sádrová část formy tepelně zpracována dříve popsaným způsobem.

b) Příprava kovové části formy

Dokonale čistá a suchá kovová deska byla ohřáta na 200°C a nástřikána kokilovým postřikem. Požom byla znovu vložena do pece a předehřáta na předem určenou teplotu.



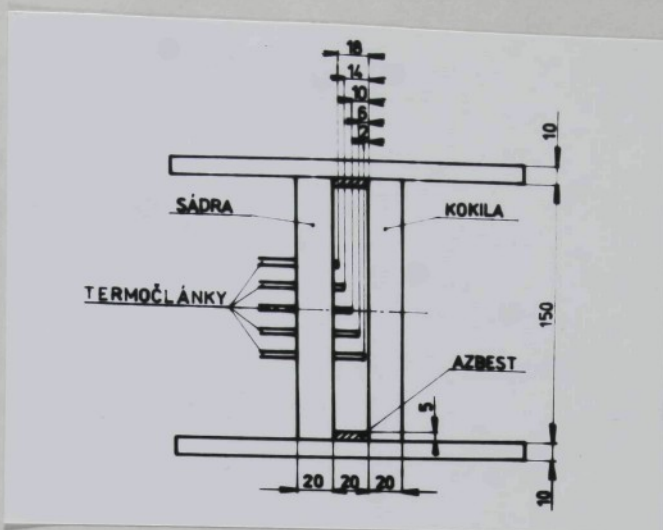
Obr. 8.1. Rozmístění otvorů ve stěně desky

c) sestavění zkušební formy

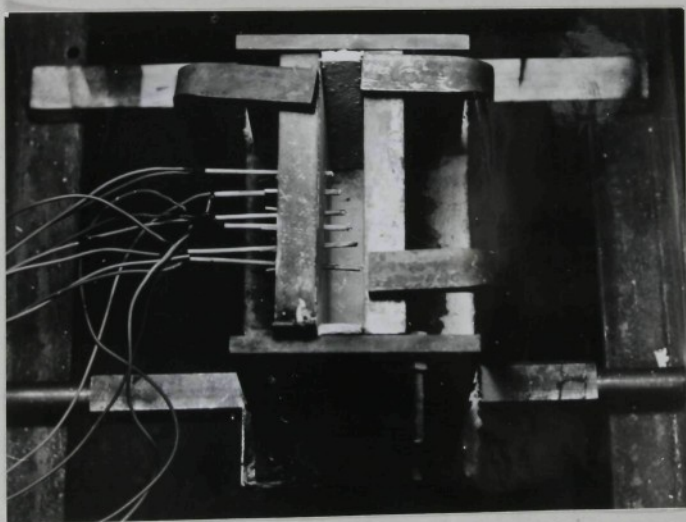
Forma byla sestavena stejným způsobem jako při pokusném lití při zjišťování součinitele tepelné akumulace. Deska ze sádrové směsi byla uchycena pomocí svěrek k základní desce formy. Do předvrtaných otvorů byly umístěny termočlánky NiCr-Ni ϕ 0,3 mm v keramických dvoukapilárách tak, aby jejich konce byly vzdáleny od líce sádrové desky 2, 6, 10, 14, a 18 mm (3; 6,5; 10; 13,5; 17 mm) směrem ke kovové desce. Potom byla kovová část formy vyjmuta z pece a umístěna na základní desku, kde byla upevněna svěrkou. Mezery mezi sádrovou deskou a kovovou deskou byly umístěny azbestovými proužky širokými 20 mm. Schéma sestavené kombinované formy je na obr. 8.2 a pohled na sestavenou formu na obr. 8.3.

8.2. Vyhodnocování průběhu tuhnutí

Pomocí termočlánku se měřila teplota na kokile a po dosažení předem určené teploty se provedlo odlití. Pomocí kompenzačního elektronického zapisovače EPP-09M3 se zaznamenával průběh tuhnutí v daných vzdálenostech od líce formy. Z údajů získaných ze



Obr. 8.2. Schéma sestavené kombinované formy



Obr. 8.3. Sestavená kombinovaná forma připravená k lití

záznamů zapisovače bylo pak možno sestavit závislost doby kon-
ce tuhnutí Al odlitku na tloušťce odlitku. Získanými body byla
pomocí polynomické regrese (nepřesněji vyhovoval polynom třetího
stupně $f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$)

proložena plynulá křivka. Zpracování výsledků bylo prováděno na mikropočítači TNS AT (výr. Agrokomplex Slušovice). Některé zjištěné závislosti jsou uvedeny v přílohách s. 64-81. Ze získaných závislostí pak bylo možno určit polohu tepelné osy deskového odlitku.

8.3. Sledování průběhu tuhnutí podle makrostruktury

Získané odlitky z Al byly uprostřed příčně rozříznuty, třískově obrobena a broušena na brusném papíru zrnitosti 5-280. Aby bylo možno sledovat makrostrukturu, byla opracovaná plocha řezu leptána leptadlem o složení /64/:

25 ml destilované vody,

45 ml kyselina solná,

15 ml kyselina fluorovodíková,

15 ml kyselina dusičná.

Vzorky odmaštěné etylalkoholem byly ponořeny do leptadla a vznikající sraženina byla stírána buničitou vatou. Po maleptání (zviditelnění makrostruktury) byly vzorky opláchnuty v teplé vodě, omyty etylalkoholem a osušeny.

Makrostruktury některých odlitků jsou uvedeny v příl. č. 64 - 81.

8.4. Shrnutí výsledků

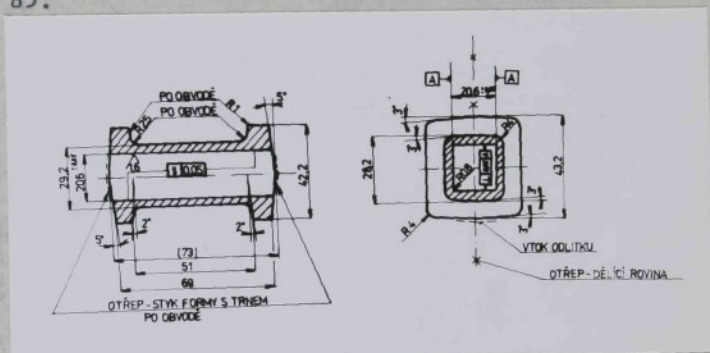
Bylo prověřeno 24 různých kombinací formovacích materiálů (seznam je na příloze s. 63). Ve všech případech došlo při použití sádrové směsi s aditivem oproti běžně používané směsi (viz str. 56) k výraznému posunutí tepelné osy odlitku ke geometrické ose (viz str. 45). Nejlepší výsledky dávaly

sádrové směsi, kde bylo jako aditiv použito SiC, Fe a Al. Jak je vidět z uvedených fotografií a grafů na přílohách s. 64-81, největšího posunutí tepelné osy odlitku bylo dosaženo u směsi Hartgips + 50 % SiC a to na 8 mm od sádrové části formy tj. 2 mm od geometrické osy odlitku. Dalších dobrých výsledků bylo dosaženo u směsí stavební sádry a 50 % SiC a nebo s 50 % SiC a 1 % AlBO 40, kde tepelná osa je cca 7,5 mm od sádrové části formy, tj. 2,5 mm od středu odlitku. Nejhorších výsledků bylo dosaženo u zatmelovacích hmot Garazin a Gloria-speciál, kde byla tepelná osa cca 4 mm od geometrické osy odlitku. Opět se tedy potvrdil předpoklad, že tepelnou akumulaci formy zvýší hlavně přísady s vysokou tepelnou vodivostí.

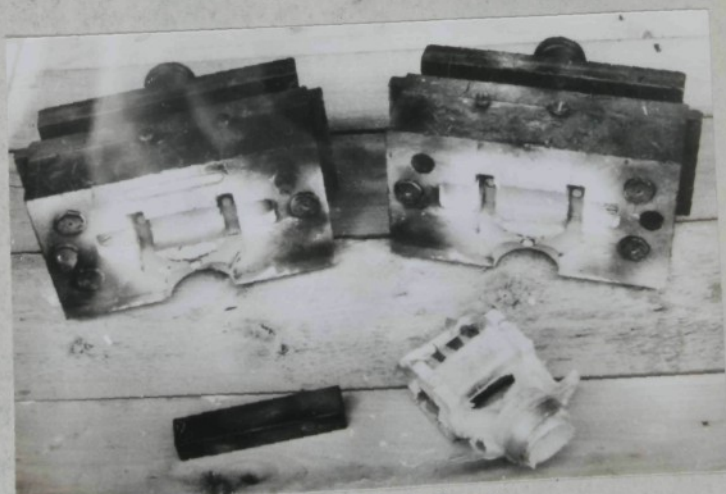
Jak je vidět z fotografií makrostruktur na přílohách s. 64-81, tak ve většině případů je struktura na straně kovové části formy tvořena hrubými, neorientovanými (někdy sloupkovitými) krystaly a na straně části formy ze sádrové směsi jemnými rovnosými dendrity. Tato morfologie průřezu odlitku je dána tím, že sádrová část formy měla $t_{2poč} = 20^{\circ}\text{C}$ a kovová část formy byla obvykle předehráta na $t_{2poč} = 320 - 400^{\circ}\text{C}$. Z polohy soustředěné staženiny je rovněž možno přibližně určit polohu tepelné osy odlitku.

9. POLOPROVOZNÍ ODLÉVÁNÍ ODLITKŮ NA NÍZKOTLAKÉM LICÍM ZAŘÍZENÍ

Pro ověření vhodnosti technologie výroby odlitků v kombinovaných formách "kovová forma-sádrové jádro" byl ve spolupráci s pracovníky poloprovozní slévárny TESLA ÚVR Opocíněk vybrán jednoduchý odlitek "těleso dolařovacího členu" vyráběný metodou nízkotlakého lití (obr. 9.1). Výkres odlitku je na příloze s. 82. Tento odlitek je normálně odléván do kovové formy s použitím kovového jádra (obr. 9.2). Forma i trn jsou vyrobeny z oceli ČSN 11 373. Výkres formy je uveden v příloze s. 83.



Obr. 9.1. Odlitek "těleso dolařovacího členu"



Obr. 9.2. Pohled na zkušební formu

9.1. Popis zkušebního zařízení

Používané zařízení ve slévárně ÚVR Opočíněk se skládá z lící pece, tlakové instalace, pneumatického přitlačného zařízení a vlastní formy.

Odporová lící pec typu CAC 50 Al výrobce n.p. Realistic Karlovy Vary (vlastní úprava ÚVR) obr. 9.3 je určena k tavení slévárenských slitin Al a k udržování taveniny na lící teplotě.



Obr. 9.3. Lící zařízení

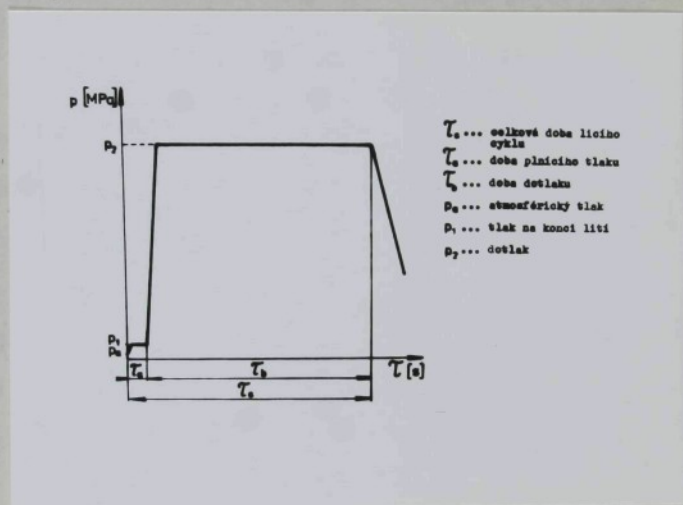
Příkon odporové pece je 24kW, pracovní tlak $7 \cdot 10^4$ Pa, obsah kelímku je 30 kg. Úprava ÚVR spočívá ve výměně kelímku. Původní litinový kelímek byl nahrazen kelímkem svařeným z nerezového plechu a do něj byl vložen kelímek grafitový.

Plnicí trubice, kterou proudí tavenina do formy, je ocelo-

vá svařovaná a její životnost je asi 10 pracovních dnů. Vrchní část plnicí trubice je vyhřívána, protože má malý průměr a mohlo by zde docházet k předčasnému tuhnutí taveniny při odlévání.

Pomocí přitlačného pneumatického zařízení se připravená (předeřtátá) forma připevnila na ústí plnicí trubice a mohlo být prováděno odlévání.

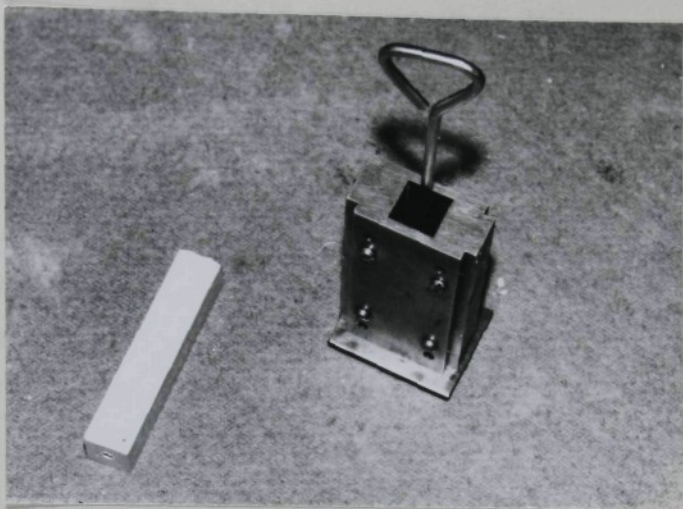
Licí cyklus nízkotlakého lití je ovládaný řídicí automatikou na regulaci tlaků. Toto ovládání umožňuje dvoustupňové plnění formy (obr. 9.4).



Obr. 9.4. Teoretický průběh licího cyklu nízkotlakového licího zařízení s dvoustupňovým plněním

9.2. Výroba jader ze sádrových směsí

Pro výrobu jader ze sádrových směsí pro zkušební odlévání byl použit kovový jaderník vyrobený v ÚVR Opočíněk (obr. 9.5). Jaderník byl vyroben z mosazi. Do středu dutiny byl umístěn kovový trn $\varnothing 5$ mm, který sloužil k vytvoření odvětrávacího



Obr. 9.5. Sestavený jaderník a sádrové jádro

průduchu středem jádra. Rozměry dutiny jaderníku byly 20,7x20,7x110 mm.

Po stanovení vodního součinitele sádrové směsi následovalo míchání suché sádrové směsi s vodou a nalití sádrové kaše do připraveného jaderníku. Postupovalo se opět podle časového diagramu uvedeného na obr. 7.5 s tím rozdílem, že po uplynutí 120 s se začalo jaderníkem poklepávat. Dutina jaderníku a kovový trn byly před každým odlitím potřeny jemnou vrstvou oléje, aby šlo jádro po ztuhnutí snadněji vyjmout. Po naplnění jaderníku sádrovou kaší následovalo poklepávání jaderníku pomocí skleněné desky, na které byl jaderník položen, čímž se zabezpečilo úplné zaplnění dutiny jaderníku a do značné části i odstranění vzduchových bublin, aby jádro mělo co největší homogenitu. Sádrová směs se v jaderníku nechala tuhnout 30 min. Po ztuhnutí byl jaderník demontován a jádro vyjmuto.

9.3. Úprava jader před tepelným zpracováním

Jádra vyjmutá z jaderníku byla ponechána 24 hod. volně tvrdnout na vzduchu. Aby bylo možné jádra založit do formy, bylo třeba oba konce jádra zbrousit na požadovaný tvar známek, které byly v dutině formy. Zabroušení bylo provedeno jemným pilníkem. Na jedné známce jádra byl vyvrtán otvor pro přidr-
žovací kolík, umístěný v prostoru známky v dutině formy (pos. 12 na příl. s. 83).

9.4. Tepelné zpracování jader

Zhotovená a upravená jádra se vložila do sušárny STE 26 a sušila se při teplotě 100°C 24 hodin. Potom byla teplota pomalu zvýšena na 200°C (rychlost ohřevu $40^{\circ}\text{C}/\text{hod}$) a na této teplotě byla jádra ponechána opět 24 hod. Potom byla sušárna vypnuta a jádra se nechala vychladnout na teplotu 20°C . Po vychladnutí byla jádra přemístěna do žíhací komorové pece TS-PEK-1, kde bylo provedeno jejich vyžihání při teplotě 400°C po dobu 2 hod (rychlost ohřevu na teplotu max. $2^{\circ}\text{C}/\text{min.}$). Poté byla pec vypnuta a jádra se nechala vychladnout v uzavře-
né peci na cca 100°C . Při této teplotě byla jádra z pece vyjmu-
ta a uložena do exsikátoru se silikagelem. Toto tepelné zpra-
cování bylo prováděno v laboratořích KMM VŠST. Tepelně zpraco-
vaná jádra pak byla zabalena do neprodyšného obalu s výplní
silikagelu a přepravena do slévárny ÚVR Opočíněk. Zde byla
jádra před litím vložena do pece a vytemperována na teplotu
 100 až 150°C . Při této teplotě byla jádra vkládána do forem.

9.5. Příprava formy před litím

Po dokonalém očištění formy hydrofinišováním byla forma ohřáta v peci na teplotu 160-200°C a při této teplotě byl líc formy opatřen ochranným nástřikem. Potom se forma opět vložila do pece a ohřívala se na danou teplotu po dobu 1,5-2 hod. Těsně před odléváním byla forma vyjmuta z pece a upevněna pomocí pneumatického přípravku na lící zařízení. Po každém odlití byla forma vizuálně překontrolována a místa, kde byl nástřik odřen, se znovu přestříkala.

Při výměně nástřiku se líc formy očistil od starého nástřiku hydrofinišováním a byl nástřikán nový ochranný nástřik.

9.6. Úprava taveniny před litím

Odmaštěný a dokonale vysušený materiál se natavoval přímo v kelímku lícího zařízení tak, že se založilo menší množství drobnějšího materiálu a zasypalo se krycí solí ALUKRYT (v množství asi 1 % hmotnosti vsázky). Po roztavení se doplňoval kov až do požadovaného množství. Potom se tavenina ohřála na teplotu vyšší než 700°C (cca 750°C) a při této teplotě byla provedena rafinace nataveného kovu. Rafinace byla prováděna tak, že se tavenina posypala opět krycí solí (až 2 % hmotnosti vsázky) a po natavení soli se tato promíchala s vrchními vrstvami taveniny. Potom byla krycí sůl pomocí zvonu ponořena ke dnu kelímku, čímž se tavenina odplynila. Po těchto úpravách se tavenina nechala ustát a pak se z hladiny odstranily nečistoty. Obě tyto operace je nutné provádět přesně podle návodu výrobce soli. Po skončení odplynění se opět stáhly nečistoty z hladiny tave-

ny. Hladina taveniny musí zůstat čistá a lesklá. Pokud tomu tak není, je nutné celý proces opakovat. Po rafinaci a odplynění kovu se regulátor teploty nastavil na teplotu, která se určí při náběhu série, pec se uzavřela a po vytemperování taveniny na lící teplotu (cca 720°C) se mohlo začít odlévat. Při rafinaci a odplynění se uvolňuje chlór, proto je nutné mít u pece dostatečné odsávání.

9.7. Vlastní odlévání

Přípravou pro odlévání je kromě natavení kovu, ustálení lící teploty a předehřevu formy a jader i nastavení lící pneumatické automatiky. Když jsou splněny výše uvedené předpoklady, je možno začít s vlastním odléváním:

- a) předehřátá forma se vyjme z pece, položí se na lící zařízení a upne se do pneumatického přípravku;
- b) do formy se vloží předehřáté jádro, forma se pomocí pneumatického přípravku zavře a pomocí pneumatické automatiky se provede odlití,
- c) po vypuštění tlaku p_2 (dotlaku) z lící pece se nechá odlitek cca 30 s tuhnout, aby vyhazovače neudělaly na povrchu odlitku otisky,
- d) po otevření formy se odlitek vyjme z formy a označený se nechá vychladnout na vzduchu,
- e) po vyjmutí odlitku se do formy vloží nové jádro předehřáté na danou teplotu, forma se uzavře a provede se další odlití. Tento postup se opakoval až do odlití celé dávky předehřátých jader. Potom se upravil poškozený nástřík (nebo se provedla změna nástříku), forma se znovu předehřála na danou teplotu a odlila se další série odlitků.

- f) teplota vyhřívání vtoku se pohybovala kolem 700°C ,
- g) po vychladnutí se odlitky zbavily jader a vtokové soustavy.

Teplota formy v průběhu odlévání série odlitků byla kontrolována dotykovým digitálním teploměrem Tastoherm D 1200 (NSR).

Při poloprovodním odlévání bylo ověřeno celkem 30 druhů sáder a sádrových směsí s různými aditivy. Seznam ověřovaných směsí je uveden v příloze s. 84. Z každé směsi bylo vyrobeno 3-5 ks jader a tepelně zpracováno dříve popsáním způsobem.

Na kovovou formu byly použity následující ochranné nástřiky:

- ACHESON Dag 133 T
- FOSECO Dycote F 39
- izolační nástřik (složení viz kap. 7.4).

Zkušební odlitky byly odlévány ze slitiny AlSi10MgMn ČSN 42 4331, která se ve slévárně ÚVR pro dané odlitky běžně používá.

Složení: 9-10,5 % Si, 0,25-0,4 % Mg, 0,1-0,4 % Mn a zbytek Al

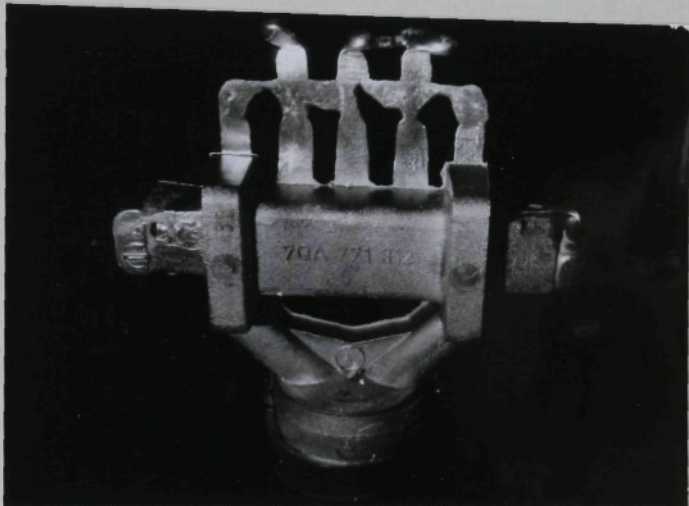
Interval tuhnutí: $600 - 565^{\circ}\text{C}$

Smrštění: 1,1 - 2 %.

Teplota taveniny se v průběhu odlévání pohybovala v intervalu $630-660^{\circ}\text{C}$, teplota kovové formy v intervalu $320-475^{\circ}\text{C}$ a teplota sádrových jader v intervalu $65-151^{\circ}\text{C}$. Pro porovnání výsledků bylo několik odlitků odlito s použitím kovového jádra, jehož teplota se pohybovala v intervalu $430-475^{\circ}\text{C}$. Plnicí tlak p_1 se pohyboval v intervalu 5-12 kPa po dobu 2,5-4 s, dotlak $p_2 = 70-80$ kPa po dobu 8-25 s. Podrobnější údaje o lití jsou uvedeny v pracích /11, 40, 72, 79/.

9.8. Vyhodnocení jakosti zkušebních odlitků

Surový odlitek (obr. 9.6) se po vyjmutí z formy nechal vychladnout na vzduchu. Po vychladnutí bylo jádro ze sádrové směsi odstraněno z odlitku vymíláním tekoucí vodou, vtok se zářezy byl odstraněn odříznutím a výronky byly opilovány pilníkem.



Obr. 9.6. Surový odlitek tělesa dolaďovacího členu

Rozměry dutin odlitku byly měřeny posuvným měřítkem s přesností na 0,05 mm. Naměřené hodnoty (průměrné hodnoty vždy několika odlitků) jsou uvedeny v tabulce č. 9.1 v příl. s. 85-87.

Měření jakosti povrchu dutin odlitků bylo prováděno v laboratořích VŠST na přístroji Hommel Tester typ T3 (výrobce Hommelwerk Mannheim NSR). Délka měřené plochy byla 6,3 mm. Měření bylo prováděno na vybraných místech povrchu dutiny odlitku. V tabulce č. 9.1 na příloze s. 85-87 jsou uvedeny hodnoty drsnosti povrchu R_a a R_{max} pro některé vybrané odlitky. Na příloze s. 88 je uvedeno několik příkladů grafického záznamu drsnosti povrchu.

Dále byla u zkušebních odlitků hodnocena makrostruktura na podélném řezu (v dělicí rovině formy). K zviditelnění struktury bylo nejdříve použito leptadlo, které bylo používáno pro leptání čistého Al (viz s. 102). Toto leptadlo se však neosvědčilo, a proto bylo použito leptadlo o složení:

15g CuCl_2 + 100 ml H_2O , doba leptání 5-10 s. Vznikající povlak se odstraňuje silonovým kartáčem. Na prvních odlitcích (odlévaných v r. 1981) byla v místě zaústění vtokových zářezů do přírub dolažovacího členu zjištěna mikropórovitost, způsobená nevhodným dimensováním vtokových zářezů (obr. 9.7 na příloze s. 89). Po následné úpravě - rozšíření vtokových zářezů - byly již další odlitky bez této vady (obr. 9.8 na příloze s. 89).

Z výsledků uvedených v tab. 9.1 je vidět, že nejlepších výsledků jakosti povrchu bylo dosaženo u následujících sádrových formovacích směsí:

SS + 25 % SiC + 0,5 % AlBO 40

SS + 15 % SiC + 0,5 % AlBO 40

AS + 2,5 % AlBO 40

SS + 25 % SiC + 3 % Fe

HG + 50 % SiC

Je vidět, že opět nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití aditiv s vyšší tepelnou vodivostí, tj. SiC, Fe a Al. Vzhledem k tomu, že jakost povrchu byla měřena na vybraných místech povrchů, není v tab. 9.1 zaznamenán výskyt některých větších povrchových vad (odvařeniny, staženiny). Odvařeniny se objevovaly hlavně u odlitků, u nichž bylo použito jader s přísadou většího množství Fe (pravděpodobně byly způsobeny vznikem vodní páry z hydratovaných oxidů Fe v důsledku vysokých licích teplot). Při použití jader s vyšším obsahem Al zase docházelo k "nalepování" odlitku na jádro v místech, kde se větší množství Al

objevilo na povrchu jádra. Z těchto důvodů se ukazuje, že přísady větších množství Fe a Al nejsou do sádrových formovacích směsí vhodné. Rovněž lze z tab. 9.1 vysledovat, že lepších jakostí povrchu odlitků bylo dosaženo při použití vyšších hodnot tlaku a dotlaku při nízkotlakém lití.

Na základě zkušeností získaných poloprovozním odléváním byl zpracován návrh rámcového technologického postupu výroby speciálních odlitků metodou nízkotlakého lití do kombinovaných forem "kov-sádra".

9.9. Návrh technologického postupu

1. Formovací směs: 74,5 % stavební sádra

25 % SiC

0,5 % AlBO 40

2. Vodní součinitel: $0,7 \text{ ml.g}^{-1}$

3. Výroba sádrových jader:

- naváží se potřebné množství sádry a promíchá se s přísadami tak, aby se zrna přísady rovnoměrně rozptýlila v sádře,
- odměří se příslušné množství vody teplé 20°C tak, aby byl dodržen vodní součinitel,
- po spuštění stopek následuje 15 [s] sypání sádrové směsi do nádoby s vodou,
- 45 [s] míchání sádrové kaše pomocí elektrického míchadla tak, aby se do kaše zamíchalo co nejméně vzduchu,
- 30 [s] vibrace formy, aby se odstranily vzduchové bubliny z jádra,
- 20 [s] ruční homogenizační míchání,

- po homogenizačním míchání - ve 110. s od spuštění stopek se naleje sádrová kaše do jaderníku (stěny dutiny jaderníku musí být natřeny jemnou vrstvou separačního prostředku),
- po 20 min, se jaderník rozebere a jádro opatrně vyjme.

4. Tepelné zpracování jader:

- po vyjmutí z jaderníku se jádro nechá 24 hod volně tvrdnout na vzduchu,
- následuje sušení jader v sušárně s výměnnou atmosférou při 100 a 200°C vždy po dobu 24 hod.
- vychladnutí jader v sušárně na teplotu 100 - 120°C,
- žíhání jader v komorové peci při 400°C po dobu 2-3 hod,
- pomalé ochlazení jader na potřebnou teplotu pro založení do formy.

Pozn.: Ohřev i odhlazování sádrových jader na předepsané teploty musí být pomalé (rychlost max. $2^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$), aby nedošlo k popraskání jader.

5. Technologické podmínky odlévání pro slitinu ČSN 424331:

teplota taveniny: 650 - 660°C

teplota jader: 120 - 130°C

teplota kovové formy: 420 - 430°C

Kovová forma je opatřena kokilovým postřikem ACHESON Dag 133 T. Tavenina se před litím ošetří solí ALUKRYT.

Licí cyklus nízkotlakého lití:

- plnicí tlak: 10 kPa

- doba plnicího tlaku: 3 s

- dotlak: 80 kPa

- doba dotlaku: 15 s

Pozn.: Během odlévání se musí kovová forma (pokud nemá vlastní ohřev) vždy po několika odlitích ohřát v peci, aby její teplota nepoklesla pod 360°C.

10. SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ PRÁCE

Všechny výsledky a dílčí závěry uvedené v předcházejících kapitolách předložené práce se přímo či nepřímo týkají hlavní řešené problematiky, tj. možnost výroby přesných odlitků ze slitin Al v kombinovaných formách "kovová forma - sádrové jádro". Pro snadnější orientaci i možnost jejich rozboru bude účelné je rozdělit do několika tématických skupin, které se týkají :

- 1) Stanovení základních tepelně fyzikálních a technologických vlastností sádrových formovacích směsí,
- 2) zajišťování průběhu tuhnutí jednoduchého odlitku tvaru desky z čistého Al (ČSN 42 4103) v kombinované formě,
- 3) výsledků poloprovozního odlévání vybraného odlitku ze slitiny ČSN 42 4331 na nízkotlakém lícím zařízení.

10.1. Zhodnocení výsledků měření a výpočtu základních vlastností vybraných sádrových formovacích směsí

Při rozboru tuhnutí odlitků v kombinovaných formách z materiálů s rozdílnými tepelně fyzikálními vlastnostmi byly vymezeny základní možné směry technologie výroby. Bylo ukázáno, že hlavní charakteristikou ochlazovacího účinku formy (jádra) je součinitel tepelné akumulace formy b_2 . Při studiu však bylo zjištěno, že konkrétních hodnot součinitele b_2 je v literatuře málo, a proto jsem se v první fázi řešení daného úkolu zaměřil na zjišťování součinitele tepelné akumulace sádrových

formovacích směsí obsahujících různé přísady. Kromě b_2 byly měřeny u těchto sádrových směsí ještě pevnost v tlaku po vysušení R_{mt} a prodyšnost D . Celkově bylo ověřováno 58 různých sádrových směsí a 3 druhy sáder.

Při návrhu metodiky stanovení součinitele tepelné akumulace jsem vycházel ze zkušeností a podmínek katedry materiálu a strojírenské metalurgie VŠST v Liberci. Na základě rozboru používaných metod zjišťování b_2 jsem použil technologickou licí metodu dle VEJNIKA. Bylo navrženo a zkonstruováno měřicí zařízení, které umožňovalo jednak stanovení součinitele b_2 metodou přímého měření teplotního pole odlitku a formy, jednak zjišťování konstanty tuhnutí k vylévací zkouškou. Měření bylo prováděno v laboratorních podmínkách slévárny KMM VŠST v Liberci. Výsledky měření teplotních polí byly vyhodnocovány graficky a z grafů odečtené údaje byly použity pro výpočet součinitele tepelné akumulace b_2 . Pro usnadnění výpočtu exponentu paraboly n_2 a součinitele b_2 byl zpracován program v jazyce BASIC, ve kterém jsou zahrnuty 4 různé způsoby výpočtu n_2 a ze čtyř vypočtených výsledků program vybírá (dle metody nejmenších čtverců) exponent s nejmenším reziduálním součtem čtverců. Tento výsledek je pak porovnáván s náhradou skutečného průběhu teplotního pole sinusovkou a výsledný exponent n_2 je použit pro výpočet součinitele b_2 .

Prodyšnost a pevnost vtlaku ověřovaných sádrových formovacích směsí byla měřena na běžně používaných přístrojích (při měření prodyšnosti bylo používáno upravené čidlo). Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zahrnuty v tab. 7.1 na příl. s. 42-51. Ze zjištěných výsledků je možno vyslovit tyto závěry:

1. Součinitel tepelné akumulace b_2 se zvyšujícím se obsahem přísady v sádře se ve většině případů zvětšuje. Největšího zvýšení tepelné akumulace bylo dosaženo přísadou Al prášku AlBO 40, železného prášku a SiC. V podstatě se potvrdil dříve vyslovený předpoklad, že tepelnou akumulaci zvýší hlavně přísady s vysokou tepelnou vodivostí. Pro snížení součinitele tepelné akumulace kovových částí forem se jako nejúčinnější ukázaly "izolační" nástřik a nástřik ACHESON Dag 13 $\overline{5}$ T, které snížily tepelnou akumulaci čisté kovové formy na cca 50 %.
2. Pevnost v tlaku R_{mt} se zvyšujícím se obsahem přísady v sádře se ve všech případech zmenšuje. Přitom na přísady je mnohem citlivější alabastrová sádra než sádra stavební či Hartgips. Hodnoty pevnosti v tlaku R_{mt} se pohybovaly řádově v desetinách MPa, i když pevnost v tlaku bezprostředně po ztvrdnutí je mnohonásobně vyšší (50-70 MPa /4/). To bylo dáno tím, že pevnost v tlaku byla měřena na vysušených a vyžíhaných vzorcích.
3. Prodyšnost sádry i sádrových směsí je vesměs malá. Vliv přísad se v podstatě vůbec neprojevil. Z toho vyplývá nutnost zásahů do technologie (je třeba v jádrech zhotovovat odvězňovací kanály).

Z výsledků a zkušeností získaných měření součinitele tepelné akumulace, meze pevnosti v tlaku a prodyšnosti sádrových směsí s různými aditivami jsem vycházel při návrhu formovacích směsí, které byly ověřovány při odlévání jednoduchých odlitků tvaru desky v kombinovaných formách.

10.2. Dílčí závěry ze zjišťování průběhu tuhnutí deskového odlitku v kombinovaných formách

Odlévání pokusných odlitků bylo prováděno na stejném zařízení, které bylo použito pro měření teplotních polí forem. Bylo ověřeno 24 různých kombinací formovacích materiálů (seznam je na příl. s. 63). Při kombinaci kovové formy bez nástřiku a formy z čisté alabastrové sádry byla tepelná osa cca 1 mm od sádrové části formy (při tloušťce odlitku 20 mm) /36/. Důsledkem této značné odchylky tepelné osy oproti geometrické ose odlitku bylo soustředění slévárenských vad, především staženin, k povrchu odlitku, který je tvořen sádrovou částí formy a tím i k výraznému zhoršení jeho kvality. Při použití ochranného (isolačního) nástřiku na kovové části forem a zhotovení druhé části forem ze sádrové směsi s aditivem došlo ve všech případech k výraznému posunutí tepelné osy odlitku ke geometrické ose. Nejlepší výsledky dávaly sádrové směsi s nejvyšším součinitelem tepelné akumulace, to je směsi, kde jako přísady bylo použito SiC, Fe a Al. Při použití těchto aditiv se tepelná osa odlitku o tloušťce 20 mm pohybovala v rozmezí 2-2,5 mm od geometrické osy odlitku. Ve srovnání s tím při použití zatmelovacích hmot Garasin a Gloria special byla tepelná osa posunuta oproti geometrické ose o cca 4 mm. Z toho opět vyplývá vhodnost použití sádrových směsí s aditivem, protože náklady na zatmelovací hmoty připravované průmyslově jsou vyšší než náklady na přípravu sádrových směsí s aditivem.

10.3. Zhodnocení výsledků poloprovozního odlévání na nízko- tlakém licím zařízení

Při poloprovozním odlévání vybraného odlitku na nízko-tlakém licím zařízení ve slévárně Tesla k.p. ÚVR Opočíněk bylo ověřeno 30 druhů sáder a sádrových formovacích směsí s různými aditivy. Při návrhu formovacích sádrových směsí jsem vycházel ze zkušeností a výsledků, které byly získány při pokusném odlévání jednoduchých odlitků tvaru desky. Při návrhu technologického postupu pokusného odlévání (kap. 9.7) jsem vycházel z technologického postupu a zkušeností pracovníků poloprovozní slévárny ÚVR Opočíněk. Při vyhodnocování zkušebních odlitků jsem se zaměřil hlavně na dosahovanou jakost povrchu a rámcově na dosahovanou přesnost rozměrů dutin vytvářených sádrovým jádrem. Po počátečních problémech způsobených nevhodným dimenzováním vtokových zářezů (pórovitost odlitků v místě zaústění vtokových zářezů) nebyly po úpravě vtokových zářezů s homogenitou odlitků problémy. Makrostruktura odlitků byla ve většině případů jemnozrnná a rovnoměrná. Z hlediska jakosti povrchu, která byla měřena na vybraných místech povrchu dutin odlitku se jako nejlepší opět osvědčily sádrové formovací směsi s přísadou Fe, Al a SiC. Vzhledem k tomu, že jakost povrchu byla měřena na vybraných místech povrchu, není v tab. 9.1 (příl. s. 85-87) zachycen výskyt některých větších vad povrchu (staženiny, odvařeniny). Tyto vady se místně vyskytovaly při použití jader s větší přísadou Fe a Al. V případě přísady Fe byly tyto vady (odvařeniny) způsobeny pravděpodobně vznikem vodní páry z hydratovaných oxidů železa v důsledku vysokých

teplot při odlévání. Hydratované oxidy Fe vznikly korozí prášku Fe při rozdělování sádrové směsi s vodou (projevilo se to rezavým zabarvením jádra). V případě prášku Al docházelo zase k "nalepování" odlitku na jádro v místech, kde se větší množství prášku Al objevilo na povrchu jádra. Z těchto důvodů nejsou větší přísady Al a Fe do sádrové směsi vhodné. Při ověřování různých hodnot velikosti a doby licího tlaku a dotlaku při nízkotlakém lití se ukázaly jako výhodnější vyšší hodnoty jak tlaku tak dotlaku. Z hlediska rozměrové přesnosti docházelo oproti rozměrům jaderníku ke zmenšení rozměrů dutiny odlitku o 2-3,5 %. Vliv jednotlivých operací výroby jádra na velikost smrštění nebyl zkoumán.

Na základě těchto výsledků a získaných zkušeností byl zpracován:

1. Návrh na složení sádrových formovacích směsí pro výrobu jader (forem) s vyššími hodnotami tepelně fyzikálních vlastností,
2. návrh rámcového technologického postupu výroby přesných odlitků metodou nízkotlakého lití do kombinovaných forem "kovová forma - sádrové jádro".

11. ZÁVĚR

Předložená kandidátská disertační práce je dílčím příspěvkem k řešení velmi složité a rozsáhlé problematiky týkající se přesného lití odlitků z Al slitin. Práce byla zpracovávána jako součást úkolu vědy a výzkumu V-119-203. Při řešení tohoto úkolu vyvstala otázka, zda by nebylo možné celosádrové formy, které jsou pouze na jedno použití a po rozbití a vyjmutí odlitku již sádra nejde regenerovat, nahradit kovovou formou a pouze na vytvoření složité dutiny odlitku použít sádrové jádro. Při použití takto kombinovaných forem je pak možno nahradit málo produktivní a namáhavé gravitační lití podstatně produktivnějším litím nízkotlakým.

Hlavní přínosy předložené práce je možno spatřovat v těchto směrech:

1. Byl zpracován teoretický rozbor tuhnutí a chladnutí odlitku ve slévárenské formě zejména se zaměřením na formy kombinované a rozbor metod zjišťování součinitele tepelné akumulace formy jako hlavní charakteristiky ochlazovacího účinku formy,
2. Byl vypracován fyzikální model sádrové formovací směsi s přísadou,
3. Byla navržena a ověřena metodika měření součinitele tepelné akumulace formy.
4. Byl proveden rozsáhlý soubor měření součinitele tepelné akumulace forem ze sáder a sádrových směsí, tj. hodnot, které v literatuře zatím chybí,
5. Byl zpracován a ověřen program v jazyce BASIC pro výpočet součinitele tepelné akumulace formy, který na základě me-

tody nejmenších čtverců vybírá exponent s nejmenším reziduálním součtem čtverců z několika metod výpočtu, tento program je použitelný pro všechny osobní počítače, které pracují s jazykem BASIC.

6. Laboratorně byly ověřeny nejvhodnější kombinace formovacích materiálů odléváním jednoduchého odlitku tvaru desky,
7. Získané výsledky byly prakticky ověřeny při poloprovozním odlévání konkrétního odlitku na nízkotlakém licím zařízení.
8. Na základě získaných zkušeností byl zpracován návrh složení sádrové formovací směsi s vyššími hodnotami tepelně fyzikálních vlastností a návrh technologického postupu výroby speciálních odlitků z Al slitin s vyššími požadavky na jakost vnitřního povrchu.

Výsledky této práce jsou využívány na pracovišti zadavatele výzkumného úkolu k.p. TESLA Pardubice ÚVR Opočínec a projevíly o ně zájem i další závody zabývající se výrobou přesných odlitků ze slitin Al (jako např. s.p. ELITEX Jablonec nad Nisou, n.p. MESIT Uherské Hradiště, Sázavan Zruč n. Sázavou aj.).

12. SEZNAM LITERATURY

1. ANISOVIČ, G.A.- ŽMAKIN, N.P.: Ochlaždenije otlivki v kombinirovanoj forme. Moskva 1969.
2. AUERSWALD, P.: Zpracování experimentálních údajů tepelně fyzikálních vlastností forem na počítači. [Diplomová práce], Liberec 1986, VŠST, FS, KMM.
3. BARADANJANC, V.K.: Gipsovaža osnastka dlja točnogo litja. Moskva 1963.
4. BITTNER, J.-VACEK, M.: Pružné otiskovací hmoty ve stomatologické fixní protetice . 1. vyd. Praha 1974.
5. ČUDNOVSKIJ, A.F.: Teplofizičeskije charakteristiky disperzných materialov. Moskva 1962.
6. DVOŘÁK, VÍ.: Studium problematiky tuhnutí odlitků v kombinované formě. [Diplomová práce], Liberec 1979, VŠST, FS, KMM.
7. EXNER, J.: Metodika stanovení tepelně fyzikálních vlastností formovacích a jádrových směsí. Slévárenství, XXIII., 1975, č. 9, s. 372
8. FIALA, A.-MACÁŠEK, I.-RUSÍN, K.: K problematice ovládnání tepelných vlastností formovacích směsí. Slévárenství, XXI., 1973, č. 8, s. 313.
9. FIALA, A.: Formovací směsi se zvýšenou tepelnou vodivostí. Slévárenství, XXVI, 1978, č. 9, s. 376.
10. GEDEONOVÁ, Z.: Určenie súčiniteľa tepelnej akumulácie pre niektoré formovacie zmesi v prevádzke zlievarne VSŽ n.p. Košice. Slévárenství, XXV., 1977, č. 2, s. 61.
11. GROMA, O.: Výroba odlitků v kombinovaných formách. [Diplomová práce], Liberec 1984, VŠST, FS, KMM.
12. GULJAJEV, A.P.: Sovremennoje sostojanije iznačeniija processov zatverdevaniija otlivki. Moskva 1958.
13. HANÁK, K.: Nízkotlaké lití v rámci slévárenských technologií. In: Nízkotlaké lití Al slitin. Týnec n. S., 1982, s. 3

14. HARMÁČEK, J.: Stavební hmoty I. 1. vyd., Praha 1954.
15. HAVLÍČEK, F.-ELBEL, T.: Studium tepelně fyzikálních vlastností formy. Slévárenství, XVIII., 1969, č. 9, s. 366.
16. HAVLÍČEK, F.-KOŠNOVSKÝ, Z.: Stanovení rychlosti tuhnutí odlitků. Slévárenství, XXVI., 1978, č. 1, s. 15.
17. HEINE, R.W.-ROSENTHAL, P.C.: Principles of Metal Casting. 1. ed., Des Plaines, Illinois, USA, 1955.
18. HENNING, O.-LACH, V.: Chemie ve stavebnictví. 1. vyd. Praha 1983.
19. HLAVÁČ, J.: Základy technologie silikátů. 1. vyd., Praha 1981.
20. HOLUBEC, Z.: Měření teplotních deformací a napětí kovových slévárenských forem. [Kand. disertační práce], Liberec 1975, VŠST, FS.
21. HORÁČEK, M.-PAVELEK, M.-RUSÍN, K.: k problematice tuhnutí odlitků ve skořepinových formách. Slévárenství, XXXI, 1983, č. 6, s. 278.
22. HUDÁK, X.: Štúdium tuhnutia odlitkov z Al slitin v kombinovaných formách při použití metody nízkotlakého litia. [Diplomová práce], Liberec 1981, VŠST, FS, KMM.
23. CHVORINOV, N.: Krystalizace a nestejnorodost oceli. 1. vyd, Praha, 1954.
24. JABOREK, M.: Metody a zařízení pro zkoušení slévárenských formovacích látek. Brno 1978.
25. JELÍNEK, P.: Tepelná vodivost formovacích směsí používaných při výrobě jader a forem masivních ocelových odlitků. Slévárenství, XXX., 1982, č. 8., s. 325.
26. JELÍNEK, P.: Měření tepelně fyzikálních vlastností formovacích a jádrových směsí. Slévárenství, XXXIII., 1985, č. 12, s. 511.
27. KAVIČKA, F.-ŠIMONÍK, S.: Analogový počítač pro řešení dvou-rozměrných teplotních polí ve slévárenství a jeho použití. Slévárenství, XIX., 1971, č. 3-4, s. 108.

28. KAVIČKA, F.: Analogová metoda pro řešení neustáleného teplotního pole soustavy ocelářský ingot-kokila-okolí. Hutnické listy. XXX, 1975, č. 9, s. 624.
29. KAVIČKA, F.-HLOUŠEK, J.: Příspěvek k optimalizaci výroby odlitků v pískových nebo kovových formách a ke zvýšení životnosti kokil. Slévárenství. XXIV., 1976, č. 2-3, s. 85.
30. Kolektiv.: Příručka o hliníku. 1. vyd., Praha 1969.
31. Kolektiv: Encyklopedija neorganických materialov. Kiev 1977,
32. Kolektiv: Studium výroby odlitků litých do sádrových forem. [Závěrečná výzkumná zpráva úkolu P15-124-001, 022], Liberec 1975, VŠST, FS.
33. Kolektiv: Studium technologie odlévání do sádrových forem GARASIN. [Dílní výzkumná zpráva úkolu V-124-001,022]. Liberec 1978, VŠST, FS.
34. Kolektiv: Studium technologie a vlastností sádrových formovacích směsí. [Závěrečná výzkumná zpráva úkolu V-124-001,022], Liberec 1980, VŠST, FS.
35. Kolektiv: Technologie a vlastnosti forem ze sádrových směsí. [Dílní výzkumná zpráva úkolu V-119-203], Liberec 1983, VŠST, FS
36. KOVÁČOVÁ, H.: Studium problematiky tuhnutí odlitků v kombinovaných formách. [Diplomová práce]. Liberec 1980, VŠST, FS, KMM.
37. KRISCHER, O.: Naučnyje osnovy techniky suški. Moskva 1961.
38. LANGBEIN, R.-PETER, H.-SCHWANN, H.: Karbonat - und Sulfatgesteine. 1. vyd., Leipzig 1982.
39. LUSNIAK-LECH, L.: Způsob přípravy propustných forem pro výrobu přesných odlitků. In.: Sborník referátů z II. sympozia o přesném lití. Písek 1975, s. 28.
40. MALÝ, J.: Výroba odlitků z Al slitin v kombinovaných formách metodou nízkotlakého lití. [Diplomová práce], Liberec 1981, VŠST, FS, KMM.

41. - : METALS HANDBOOK - Forging and Casting. 8. ed., USA 1970.
42. MIKYŠKA, L.: Termoelektrické články. 1. vyd., Praha 1964.
43. NECHENDOZI, Ju.A.: Stalnoje litje. Moskva 1948.
44. NĚMCOVÁ, Z.: Studium problematiky tuhnutí odlitků v kombinovaných formách. [Diplomová práce], Liberec 1981, VŠST FS, KMM.
45. NOVÁ, I.: Tepelné zpracování forem ze sádrových směsí používaných při výrobě přesných odlitků. [Kand. disertační práce], Liberec 1984, VŠST, FS.
46. NOVOTNÝ, K.: Studium vlastností sádrových formovacích směsí s různými aditivami. [Diplomová práce], Liberec 1981, VŠST, FS, KMM.
47. PETZOLD, A.: Anorganisch - nichtmetallische Werkstoffe. 1. vyd., Leipzig 1981.
48. PÍŠEK, F.-JENÍČEK, L.-RYŠ, P.: Nauka o materiálu I/1. 2. rozš. vydání, Praha 1966,
49. PROCHÁZKA, J.-ZAHRADNÍK, M.-NĚMEC, M.-NOVOTNÝ, J.: Technologie slévání, tváření a svařování. [Skripta ČVUT]. Praha 1982, ČVUT, FS.
50. PŘIBYL, J.: Tuhnutí a nálitkování odlitků. 1. vyd., Praha 1954.
51. PŘIBYL, J.: Chladnutí kovové taveniny při průtoku kanálem. Slévárenství, XXVII., 1979, č. 3-4, s. 147.
52. PŘIBYL, J.: Ke stanovení koeficientu tuhnutí a tepelné pohltivosti formy. Slévárenství, XXVIII., 1980, č. 5, s. 178.
53. PŘIBYL, J.: Stanovení modulu podélných a koutových tepelných uzlů. Slévárenství, XXIX., 1981, č. 2-3, s. 101.
54. RAŽNJEVIČ, K.: Tepelné tabulky a diagramy. 1. vyd., Bratislava 1969.,
55. REKTORYS, K.: Přehled užité matematiky. 4. vyd., Praha 1981.
56. ROCHIER, M.: Les Liants minéraux - Les Plâtres. Fonderie, 274, Janvier 1969, s. 26.

57. RUSÍN, K.: Disperzní formovací materiály. [Skripta VUT Brno], Praha 1981, VUT, FS.
58. RUSÍN, K.: Teorie slévárenských procesů I. [Skripta VUT Brno], Praha 1983, VUT, FS.
59. ŘEZNÍČEK, M.: Příspěvek k významu modulu odlitku pro krystalizaci šedé litiny. Slévárenství, XXIV., 1976, č.2-3, s. 107,
60. SEDLÁČEK, J.: Nekomové materiály ve stomatologii. 1. vyd., Praha 1960.
61. SIMON, P.-HOLUBEC, Z.: Možnosti výroby odlitků v kombinovaných formách. In.: Sborník vědeckých prací VŠST, Liberec 1982, s. 185,
62. SIMON, P.: Rozbor tuhnutí odlitků ve slévárenských formách z různých materiálů. [Pís. referát k odporové zkoušce], Liberec 1986, VŠST, FS.
63. SIMON, P.: Možnosti výroby odlitků v kombinovaných formách "kovová forma-sádrové jádro". Slévárenství, XXXVI., 1988, č. 2, s. 61.
64. Slévárenský kalendář. 1. vyd., Brno 1970.
65. SLOBODNÍK, J.: Štúdium vlastností sádrových formovacích zmesí s rôznymi aditívmi. [Diplomová práce], Liberec 1980, VŠST, FS. KMM.
66. SPASSKIJ, A.G.: Základy slévárenství, 1. vyd., Praha 1953.
67. STRELOV, K.K.: Struktura i svojstva ogneporov. Moskva 1982.
68. ŠATAVA, V.: Úvod do fyzikální chemie silikátů. 1. vyd., Praha 1965.
69. ŠIMONÍK, S.: Nové metody studia tuhnutí za použití steari-
nu. Slévárenství, X., 1962, č. 8, s. 245.
70. TAMAZAKI, Y.: Lití hliníkových slitin do sádrových forem. Kejkidzoku, Journal Jap. Inst. Leight Metals, 1986, 36, č. 5, s. 297,
71. TUREK, M.: Studium tepelně fyzikálních vlastností sádrových formovacích směsí pro výrobu speciálních tenkostěnných a hladkostěnných odlitků ze slitin Al. [Diplomová práce], Liberec 1972, VŠST, FS, KTM.

72. VÁJA, M.: Výroba odlitků v kombinovaných formách. [Diplomová práce], Liberec 1983, VŠST, FS, KMM.
73. VEJNIK, A.I.: Teploobmen mezi slitkem a izložnicí. Moskva 1959,
74. VEJNIK, A.I.: Problemy teploobmena pri litje. Minsk 1960.
75. VEJNIK, A.I.: Teoriya zatverdevaniya otlivki. Moskva 1960.
76. VEJNIK, A.I.: Rasčet otlivki. Moskva 1964.
77. VEJNIK, A.I.: Termodinamika litejnoj formy. Moskva 1968,
78. VEJNIK, A.I.: Ochlaždenije otlivki. Minsk 1969.
79. VERNER, R.: Studium tuhnutí odlitků v kombinovaných formách. [Diplomová práce]. Liberec 1982., VŠST, FS, KMM.
80. VETIŠKA, A.: Teorie slévárenství. [Skriptá VUT Brno], Praha 1972, VUT, FS.
81. VETIŠKA, A.: Stanovení teplotního pole odlitku litého do kokily analogovou metodou. Slévárenství, XX., 1972, č. 12, s. 518,
82. VETIŠKA, A. a kol.: Teoretické základy slévárenské technologie. 2. upr. vyd., Praha 1974.
83. VETIŠKA, A.: K problematice kalorimetrického zjišťování tepelně-akumulačních vlastností formy. Slévárenství. XXII., 1974, s. 1, s. 13.
84. WLODAWER, R.: Gelentke Erstarrung von Stahlguss. Düsseldorf 1967.
85. ČSN 42 43 31
86. ČSN 66 52 24
87. ČSN 7223 01

P O D Ě K O V Ā N Í

Považuji za svou povinnost poděkovat touto cestou vedení Vysoké školy strojní a textilní v Liberci, nositelky Řádu práce a jejímu rektorovi s. Prof. RNDr. Bohuslavu Střížovi, DrSc. za to, že mi bylo umožněno zpracovat tuto práci.

Zvláště bych chtěl poděkovat svým bývalým školitelům a vedoucím katedry Doc. Ing. Václavu Chaloupeckému, CSc., Doc. Ing. Jánů Alaxinovi, CSc. a později Doc. Ing. Zdeňku Holubcovi, CSc. za odborné vedení v období mé aspirantské přípravy a za vytvoření podmínek na katedře pro úspěšné dokončení této kandidátské práce.

Současně děkuji všem spolupracovníkům na katedře materiálů a strojírenské metalurgie, včetně kolektivu katedrové dílny a kolektivu laboratoří za veškerou pomoc a podporu při zpracování této práce. Zejména děkuji s. Jaroslavu Vorlovi a svým diplomantům za rozsáhlou spolupráci při přípravě a vlastním provádění experimentů a s. Haně Kerdové za pečlivé provedení grafických prací.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat za pomoc i rady s. Ing. Miloslavu Jiroutovi a Ing. Janu Málkovi z ÚVR Opočíněk a Ing. Jiřímu Formanovi z VÚHŽ Dobrá pob. Karlštejn.

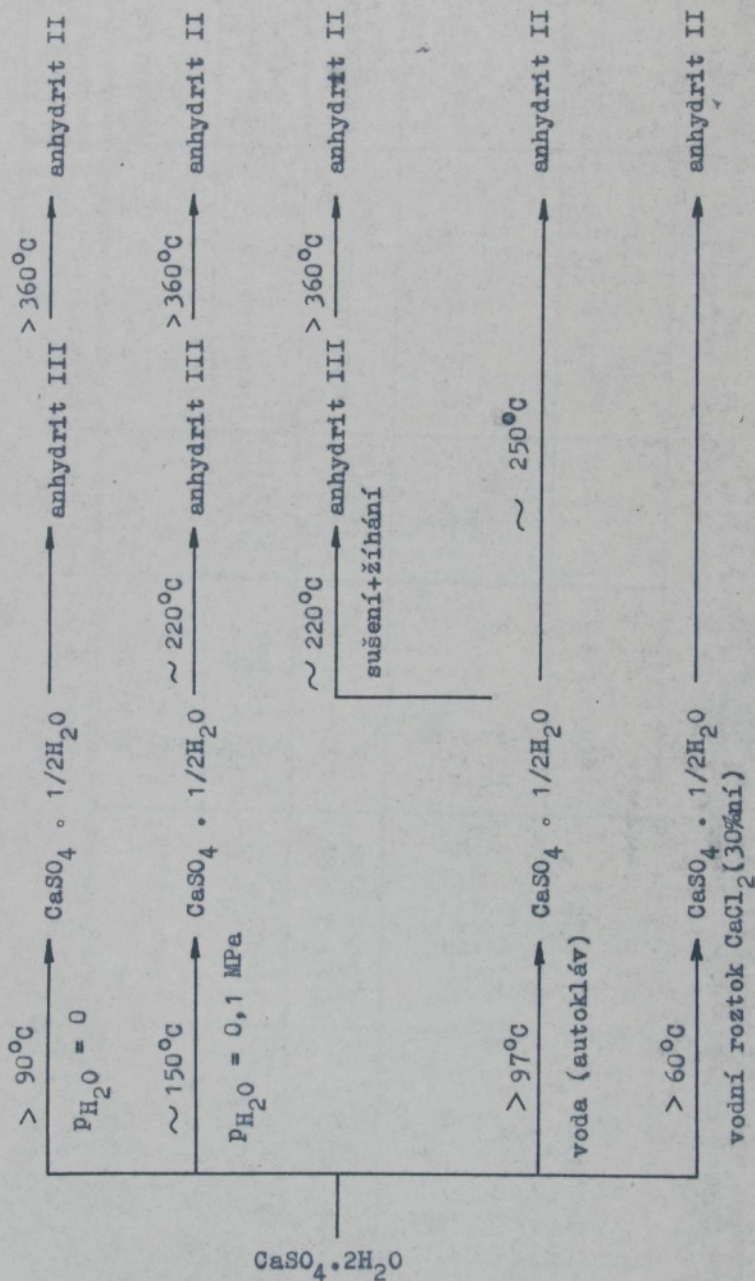
Finou Pavel

Liberec, prosinec 1988.

Příloha k
U226

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PSC 461 17

- 1 -



Sled přeměn při zahřívání sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ za různých podmínek /19/

Fáze soustavy CaSO_4 - voda (podle LEHMANN a jiných autorů)/68/

Ázev :	Chemický vzorec :	Obsah vody [%]:	Teplota přeměny [°C]:	Měrná hmotnost:	Oblast termodyn. stálosti :	Krystal. soustava :
Sádrovec (dihydrát síranu váp.)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	21 (teor. 20,9)	95 - 130 (107 - 115)	2,32	do 40 °C	monoklinická
Polohydrát	$\alpha \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ $\beta \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	6,2 - 8 (teor. 6,21)	150 - 230 (110 - 200)	2,76 (α) 2,63 (β)	metastabilní	pseudoromb. tetragonální
anhydrit III	αCaSO_4 βCaSO_4	0,02 - 0,05 0,60 - 0,90	400 - 750	2,59 (α) 2,48 (β)	metastabilní	hexagonální
anhydrit II nerozpuštěný přírodní)	βCaSO_4	-	800	2,98	40 - 1180 °C	rombická
anhydrit I vysoko- teplotní)	αCaSO_4	-	1450 - tání		nad 1180 °C	kubická

poznámka : Polohydrát α a β a anhydrit III α a β nejsou odlišné polymorfní modifikace, jde pouze o modifikace odlišné formy. Teploty přeměny v závislosti na teplotě uvádí Lehmann, jejich praktické hodnoty závisí na metodě a podmínkách stanovení.

Tab. 6.3. Základní tepelně-fyzikální vlastnosti některých materiálů /54/

Materiál	teplota T [°C]	měrné teplo c [J/kg.K]	tepelná vodivost λ [W/m.K]	měrná hmotnost ρ [kg/m ³]	tepelná kapacita $C = c \cdot \rho$ [kJ/m ³ .K]	tepelná akumulace b [W.s ^{1/2} /m ² .K]
CaSO ₄ ·2H ₂ O (sádra)	20	1089	0,395	800	871,2	586,6
			0,512	1000	1089	746,7
			0,663	1200	1306,8	930,8
SiC	20	678	67,5	2400	1627,2	10480,3
(karborund)	100	829	57,0	2400	1989,6	10649,3
Al ₂ O ₃	20	754	19,2	3750	2827,5	7369
(korund)	100	921	14,0	3750	3453,75	6953,6
SiO ₂	20	745	1,08	1900	1415,5	1236,4
	100	845	1,115	1900	1605,5	1338
Al	20	896	208,875	2700	2419,2	22479,1
	100	938	207,014	2700	2532,6	22897,2
Fe	20	452	73,269	7850	3548,2	16123,7
	100	486	67,454	7850	3815,1	16042
ocel měkká	20	477	58,848	7800	3720,6	14797
	100	519	56,987	7800	4048,2	15188,6

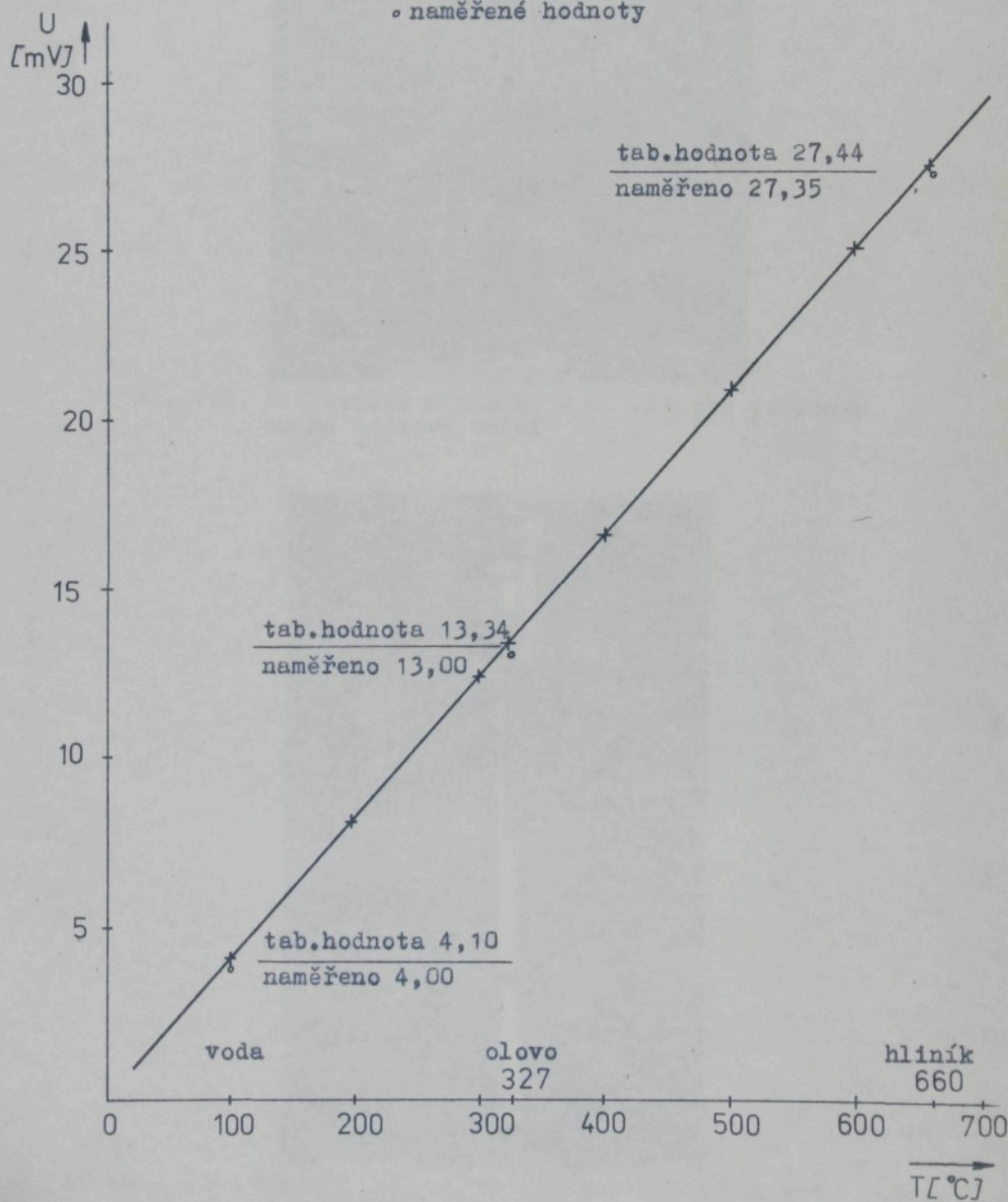
Kalibrační křivka termoelektrického článku

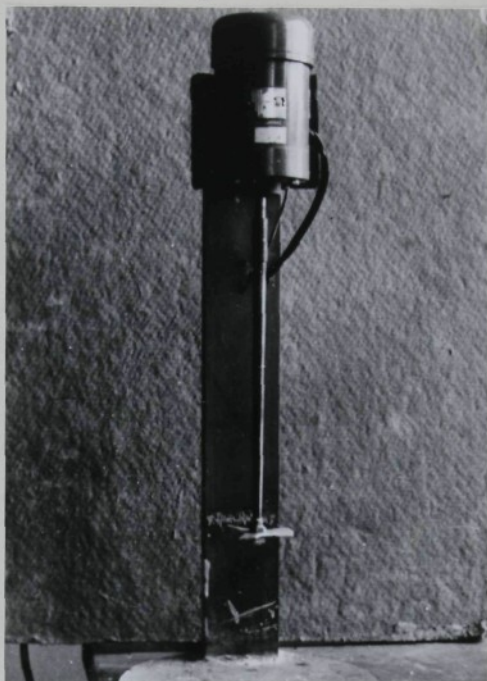
NiCr - Ni ϕ 0,3 mm

vztažná teplota 20°C

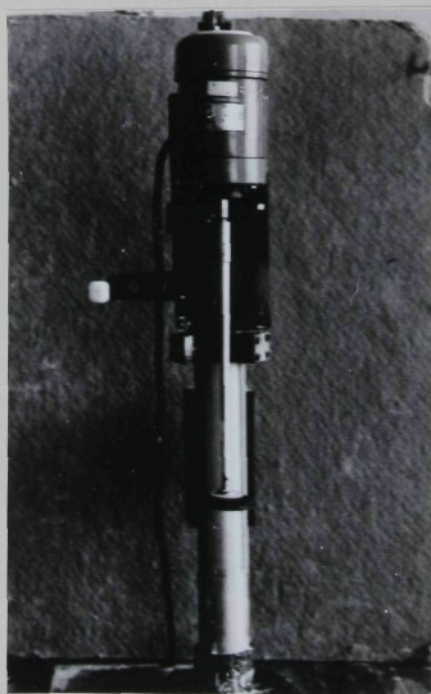
+ tabulkové hodnoty (Degussa)

• naměřené hodnoty

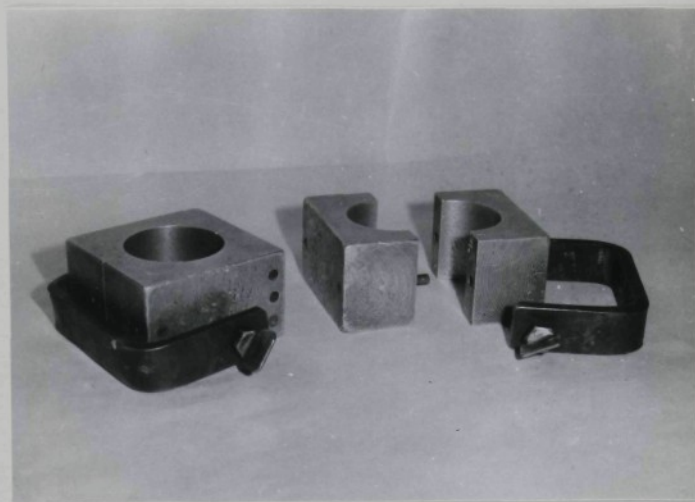




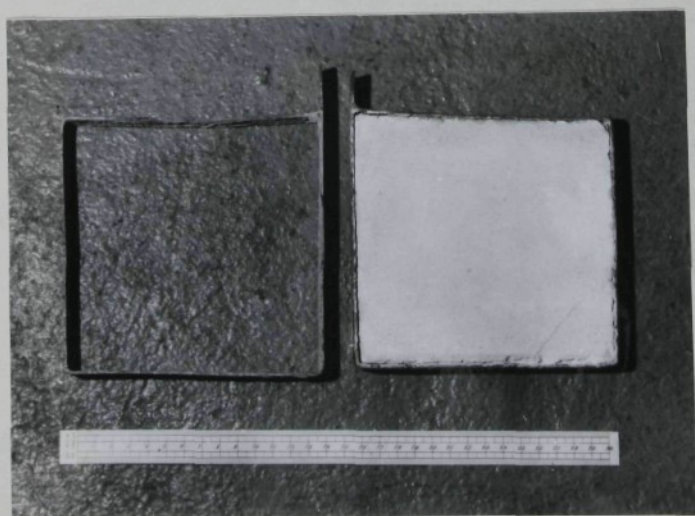
Obr. 7.3. Elektrické míchadlo s vrtulí pro přípravu suché sádrové směsi



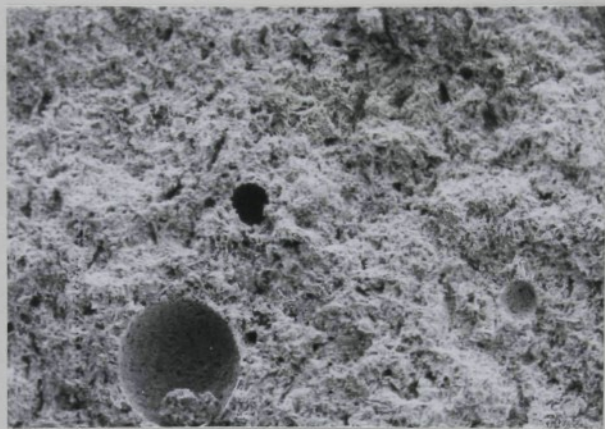
Obr. 7.4. Elektrické míchadlo s gumovým kotoučem pro přípravu sádrové kaše



Obr. 7.6. Hliníková forma na výrobu zkuš. válečků

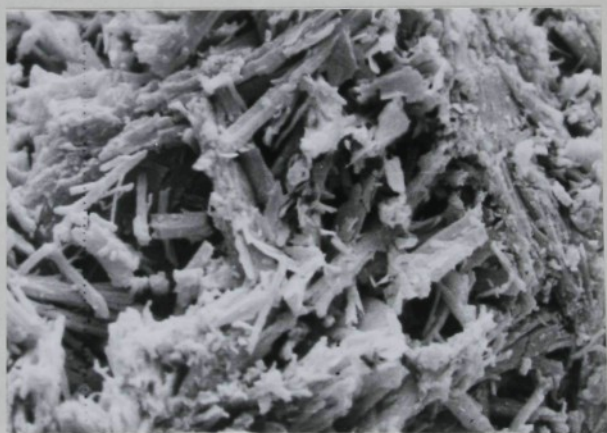


Obr. 7.7. Kovový rámeček a odlitá sádrová deska



REM

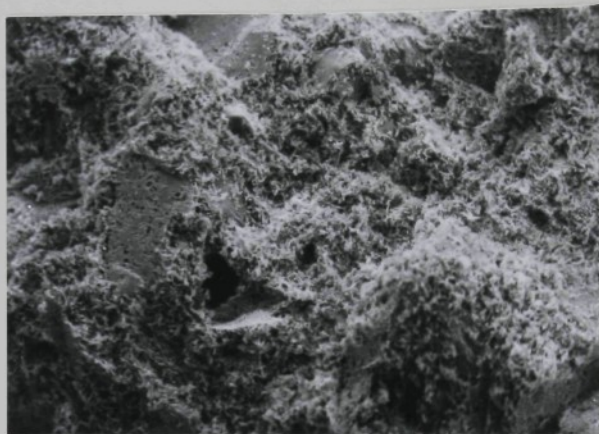
125x



REM

2500x

Morfologie lomové plochy na vzorlu čisté alabastrové sádry



REM

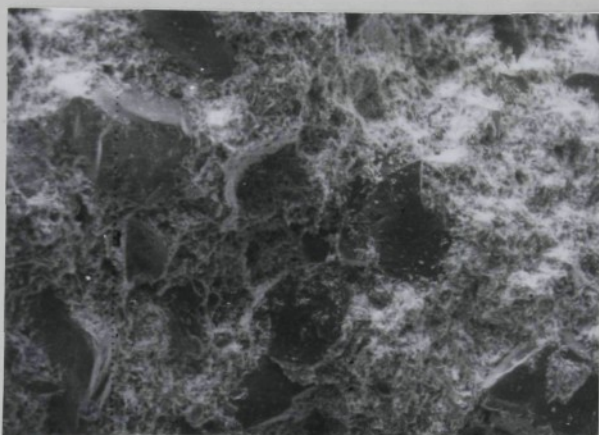
125x



REM

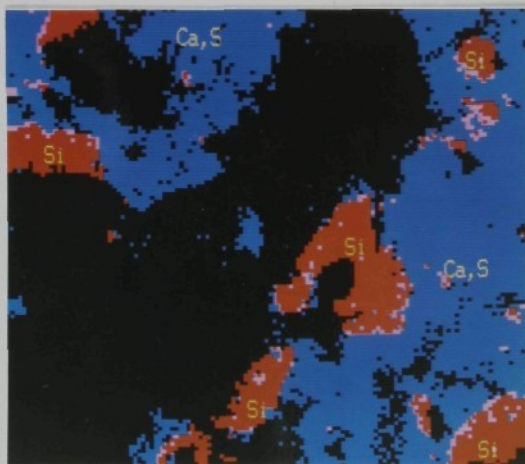
2500x

Morfologie lomové plochy na vzorku ze směsi alabastrové
sádky s 50% SiC



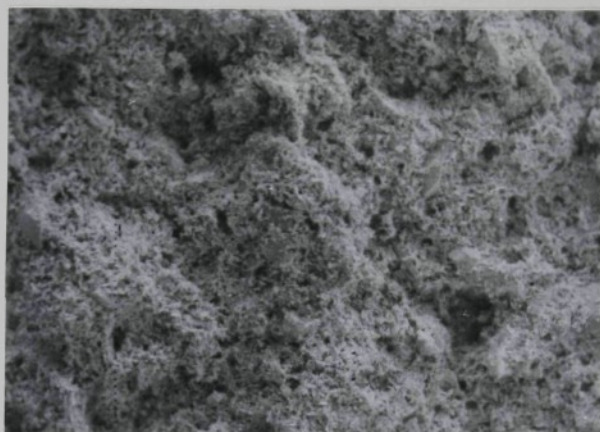
REM

125x



125x

Morfologie povrchu na vzorku ze směsi alabastrové sádky
s 50% SiC a plošný rtg. obraz ze stejné lomové plochy
význam jednotlivých barev: modrá - Ca, S
červená - Si



REM

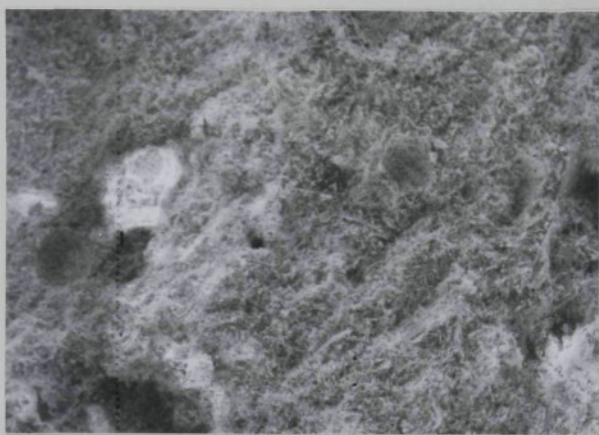
125x



REM

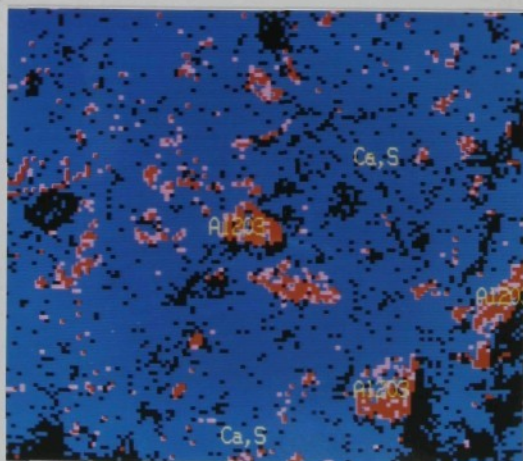
2500x

Morfologie lomové plochy vzorku ze směsi alabastrové sádry
s 50% Al_2O_3



REM

125x

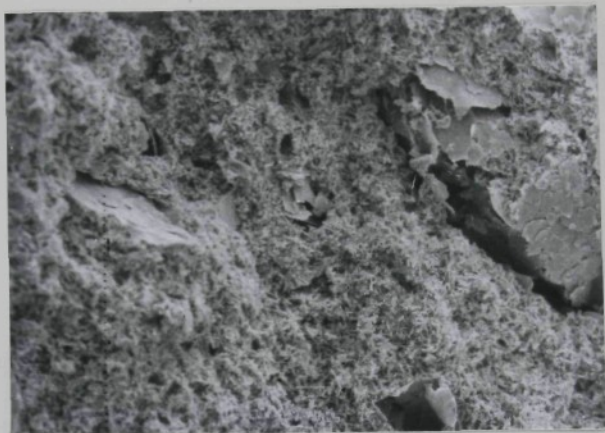


125x

Morfologie lomové plochy vzorku ze směsi alabastrové
sádky s 50% Al_2O_3 a plošný rtg. obraz ze stejné lomové
plochy

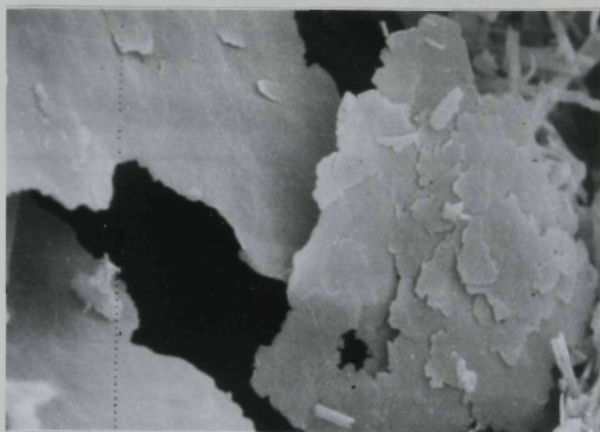
význam jednotlivých barev: modrá - Ca, S

červená - Al_2O_3



REM

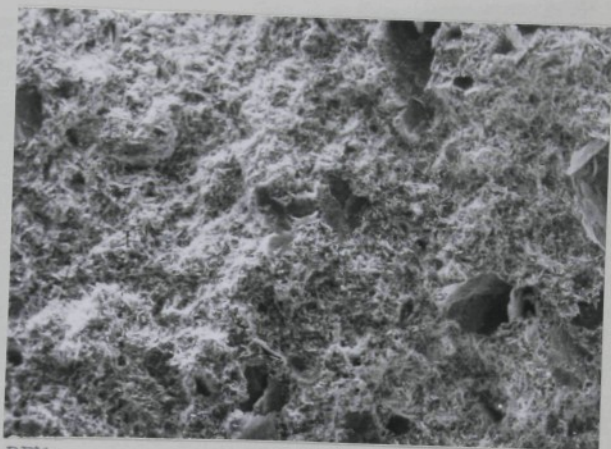
125x



REM

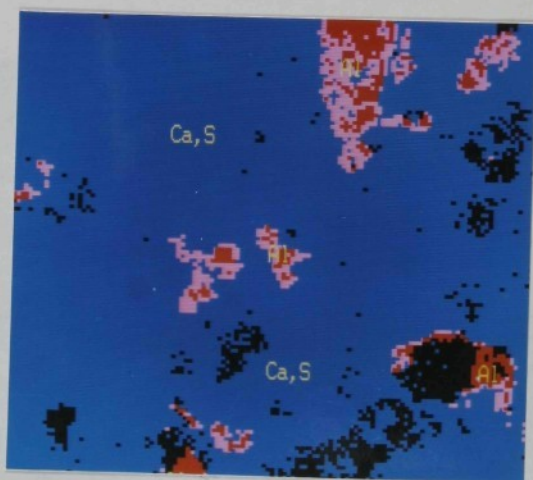
2500x

Morfologie lomové plochy vzorku ze směsi alabastrové
sádry s 2,5% Al prášku ALBO 40



REM

125x



125x

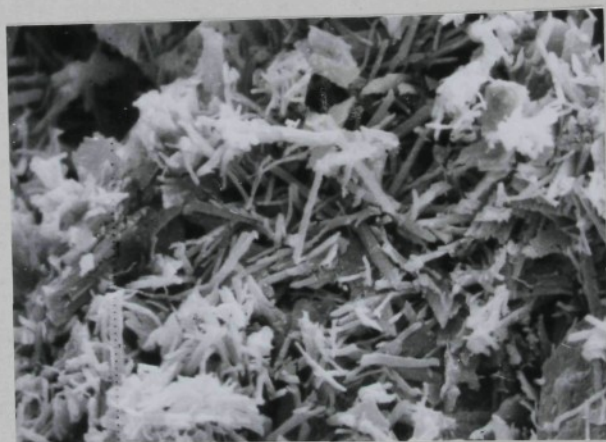
Morfologie lomové plochy vzorku ze směsi alabastrové sádry
s 2,5% Al prášku ALBO 40 a plošný rtg. obraz ze stejné
lomové plochy

význam jednotlivých barev : modrá - Ca, S
červená - Al



REM

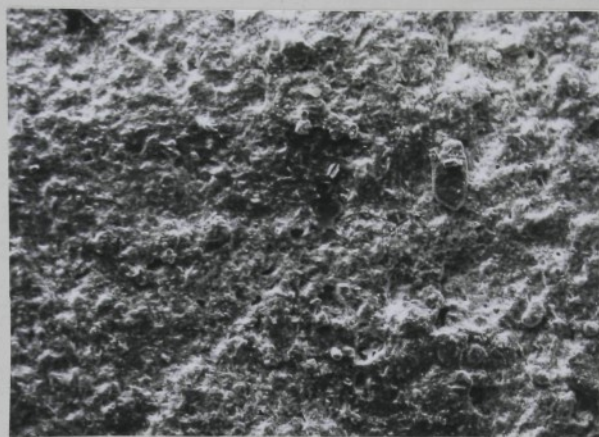
125x



REM

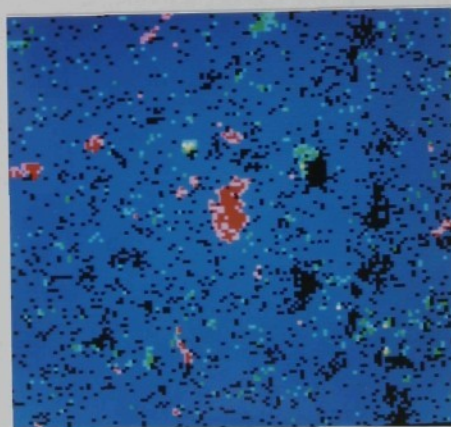
2500x

Morfologie lomové plochy vzorku ze směsi stavební sádry
s 15% SiC a 0,5% Al₂O₃



REM

125x



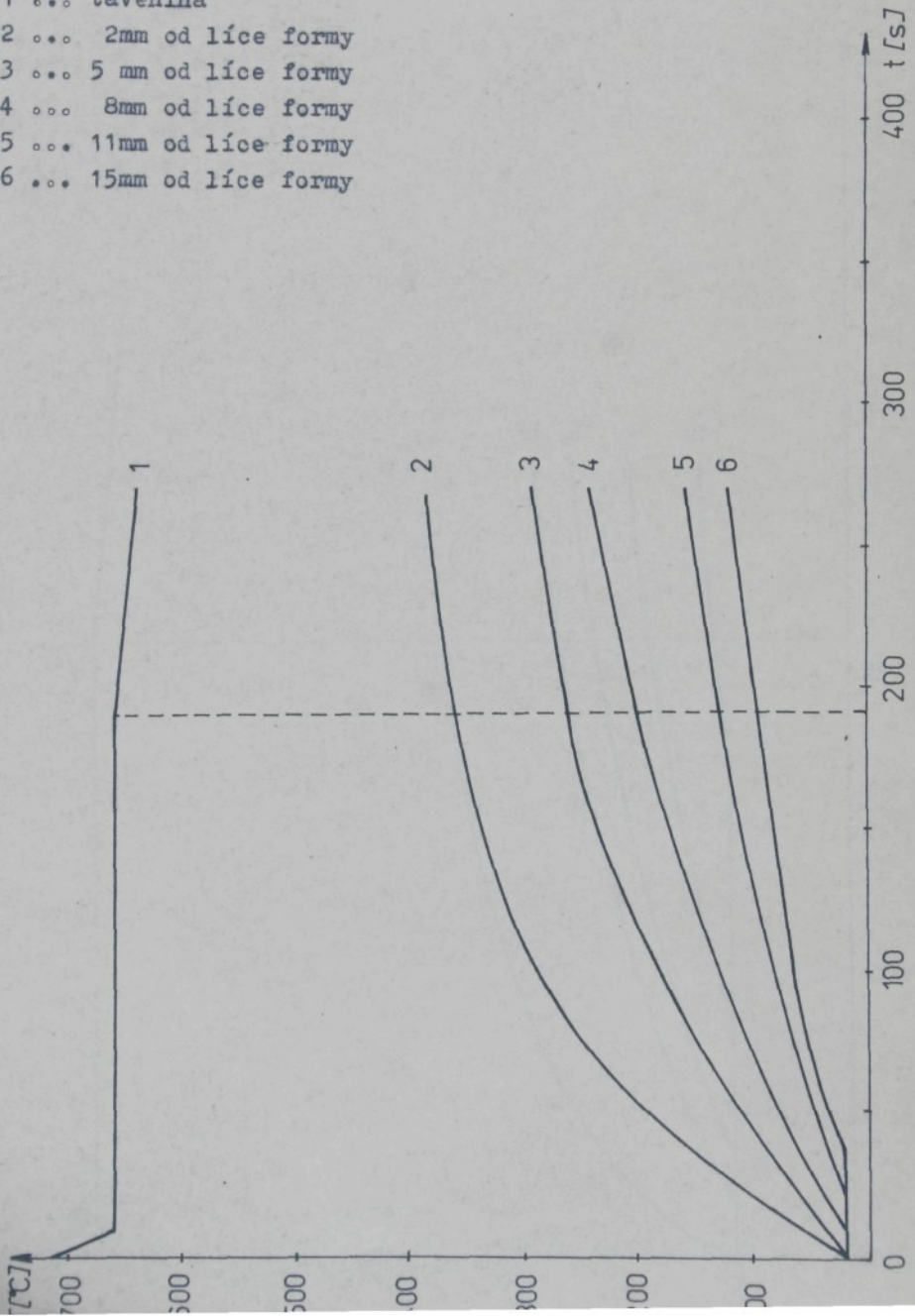
125x

Morfologie lomové plochy vzorku ze směsi stavební sádry
s 15% SiC a 0,5% ALBO 40 a plošný rtg. obraz ze stejného
místa lomové plochy

význam barev : modrá - Ca, S
červená - Al
zelená - Si

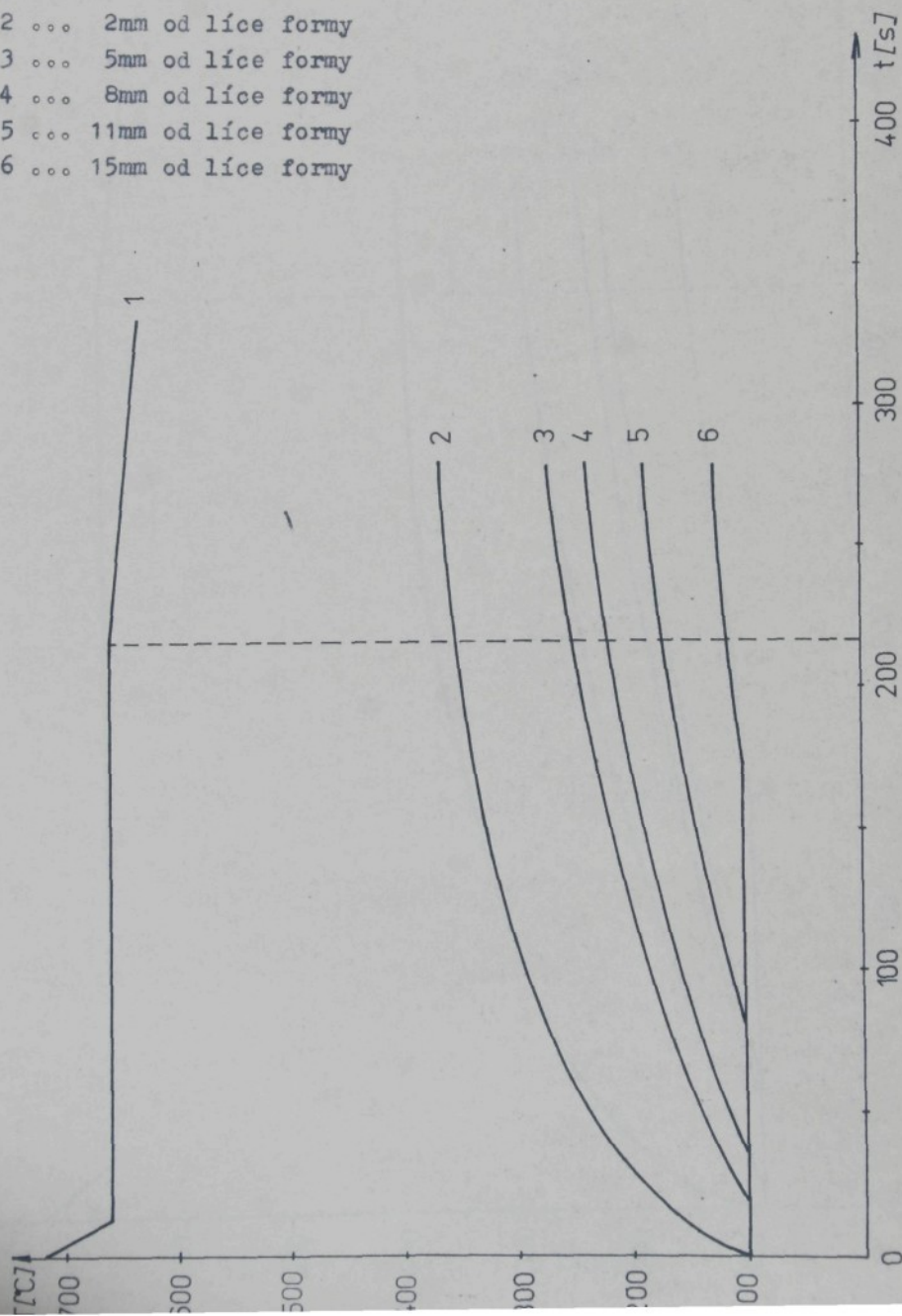
Průběh teplot v tavenině a ve stěně zkušební formy ze směsi alabastrové sádky s 50% SiC v různých vzdálenostech od líce formy $T_{2poč} = 20^{\circ}\text{C}$

- 1 ... tavenina
- 2 ... 2mm od líce formy
- 3 ... 5 mm od líce formy
- 4 ... 8mm od líce formy
- 5 ... 11mm od líce formy
- 6 ... 15mm od líce formy

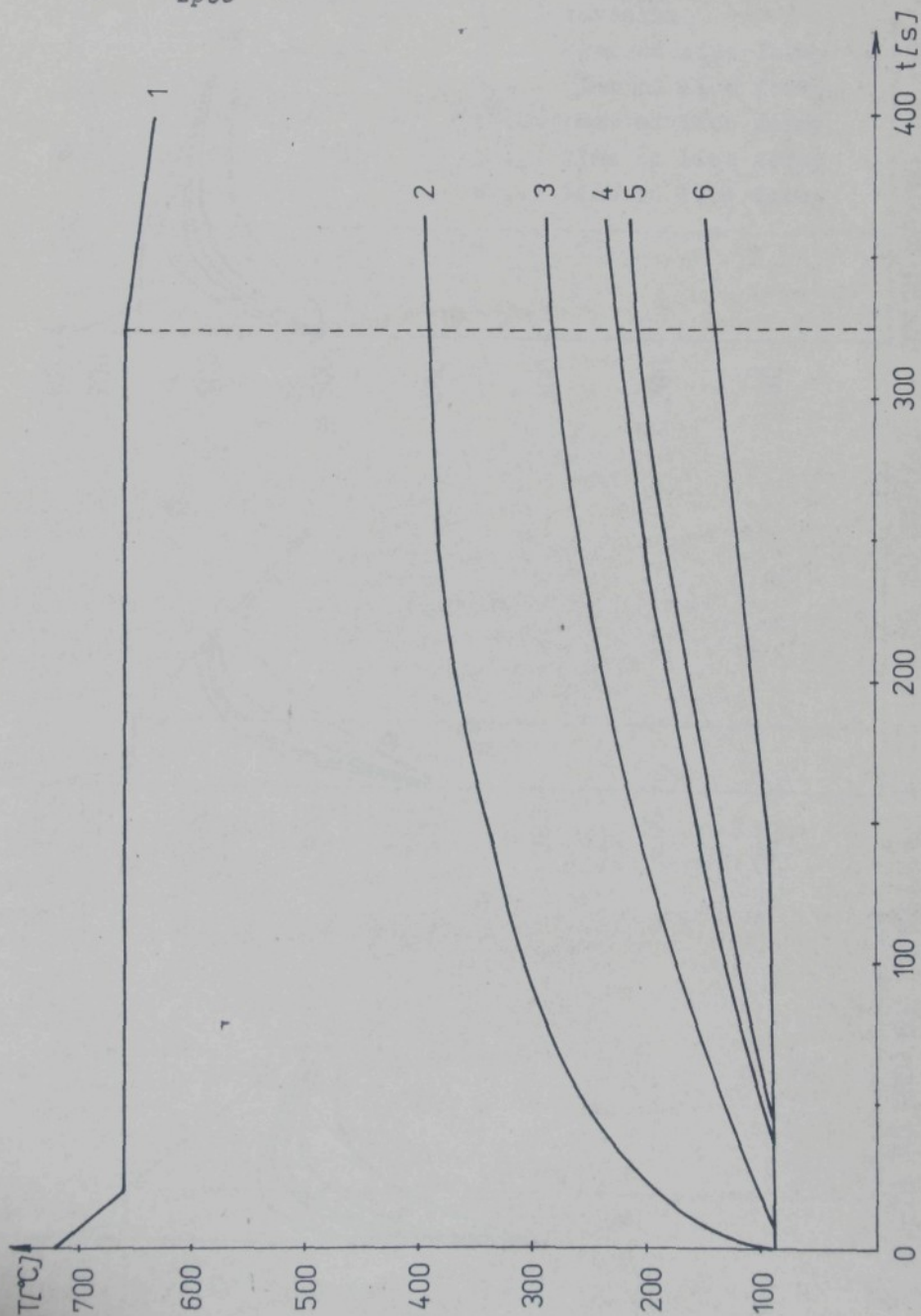


Průběh teplot v tavenině a stěně zkušební formy ze směsi
stavební sádky s 50% SiC v různých vzdálenostech od líce
formy $T_{2poč} = 100^{\circ}\text{C}$

- 1 ... tavenina
- 2 ... 2mm od líce formy
- 3 ... 5mm od líce formy
- 4 ... 8mm od líce formy
- 5 ... 11mm od líce formy
- 6 ... 15mm od líce formy



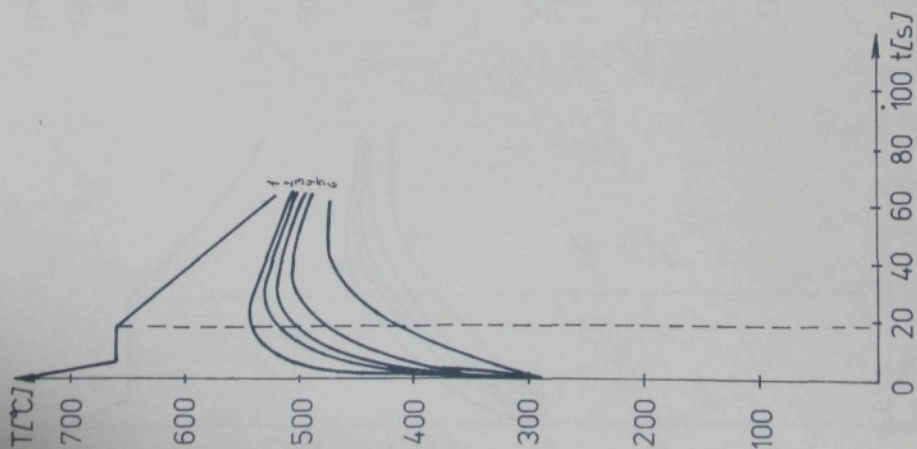
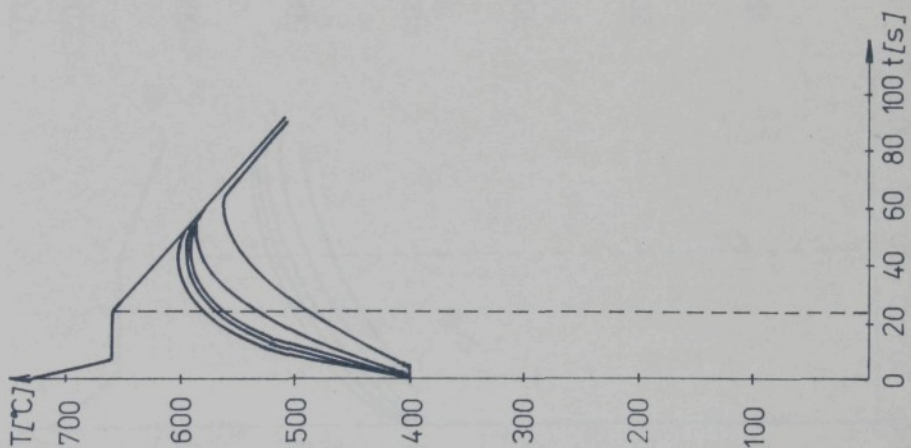
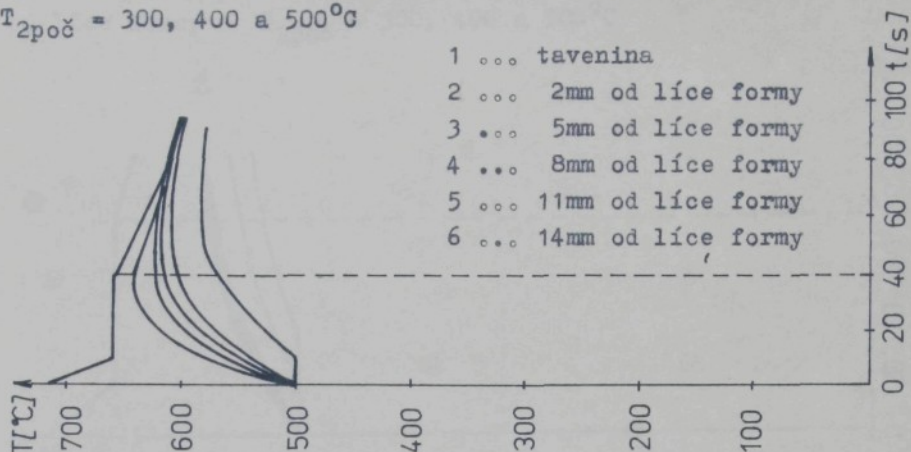
Průběh teplot v tavenině a stěně zkušební formy ze směsi
stavební sádky s 50% Al_2O_3 v různých vzdálenostech od líce
formy $T_{2\text{poč}} = 90^\circ\text{C}$



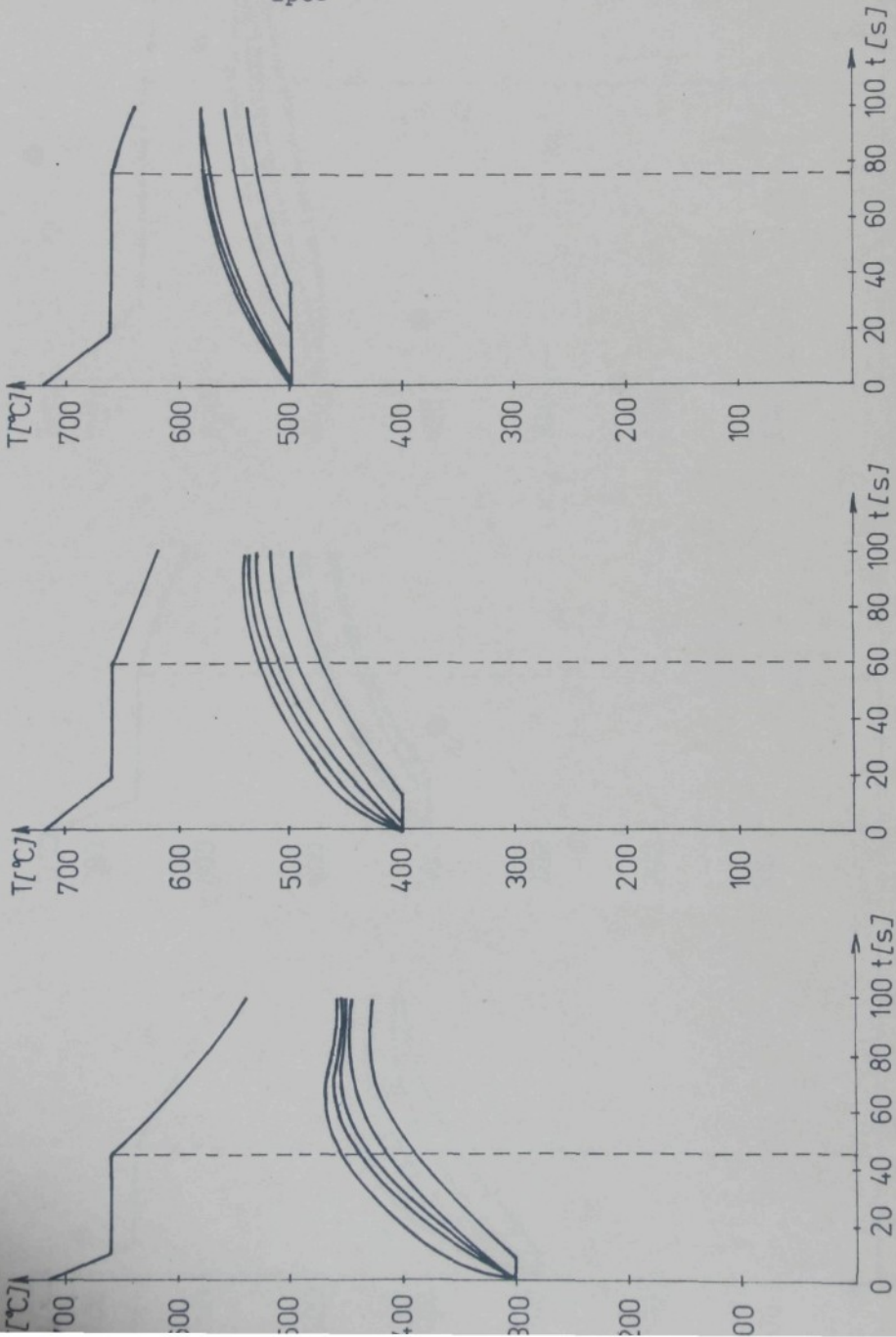
Průběh teplot v tavenině a stěně zkušební formy z oceli
ČSN 11 373 v různých vzdálenostech od líce formy

$T_{2poč} = 300, 400 \text{ a } 500^{\circ}\text{C}$

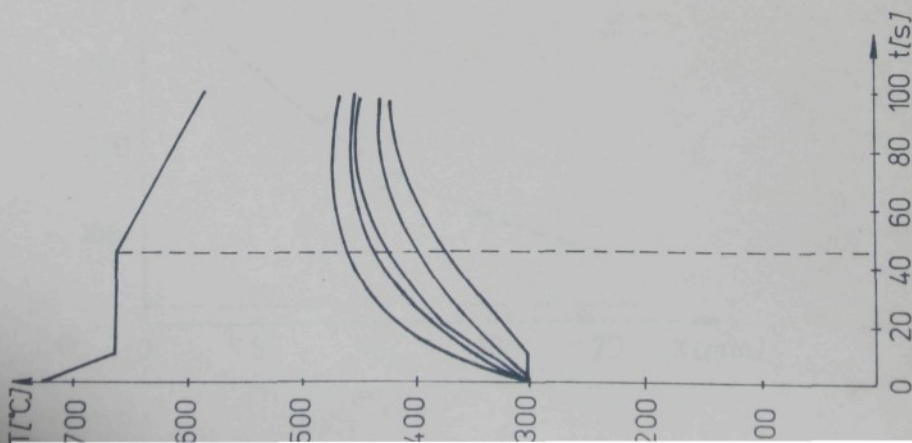
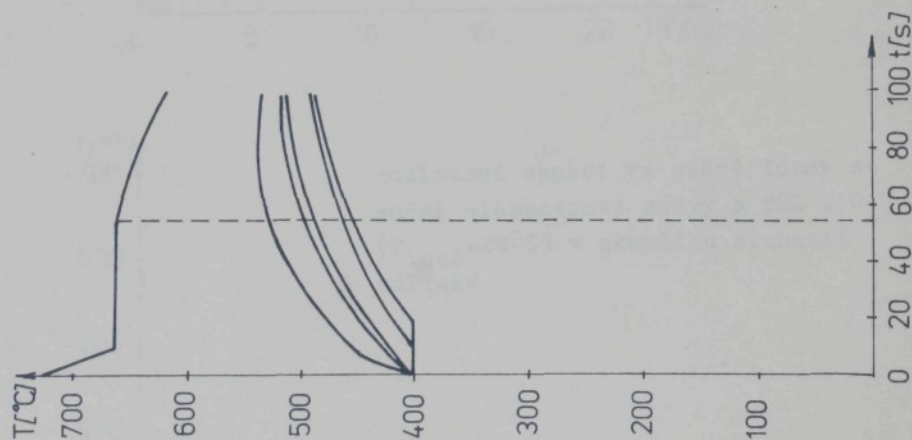
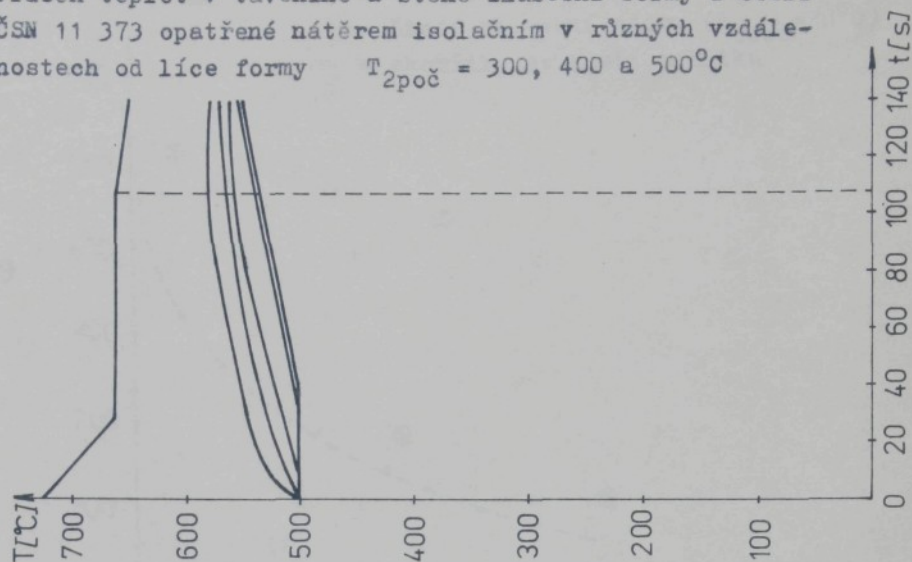
- 1 ... tavenina
- 2 ... 2mm od líce formy
- 3 ... 5mm od líce formy
- 4 ... 8mm od líce formy
- 5 ... 11mm od líce formy
- 6 ... 14mm od líce formy

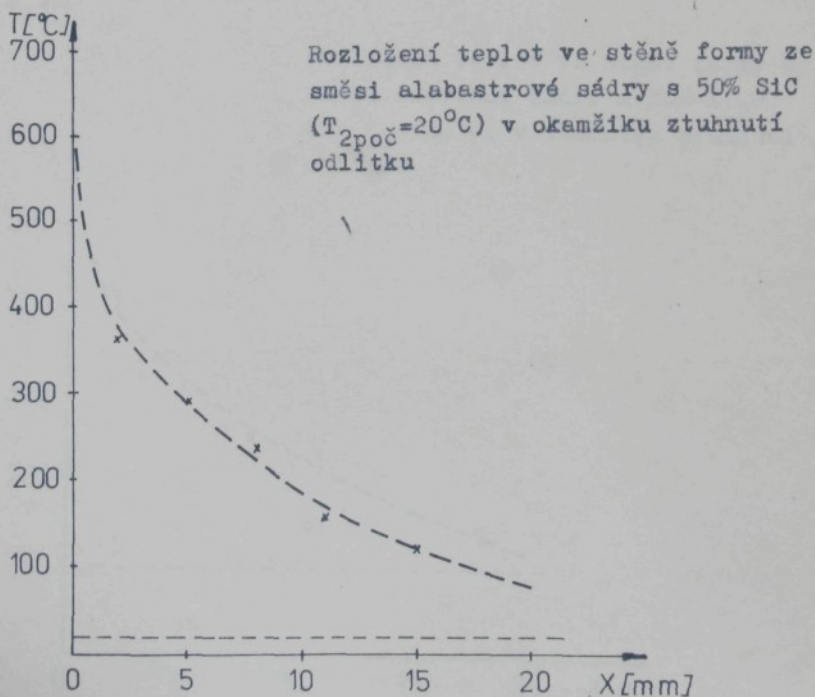
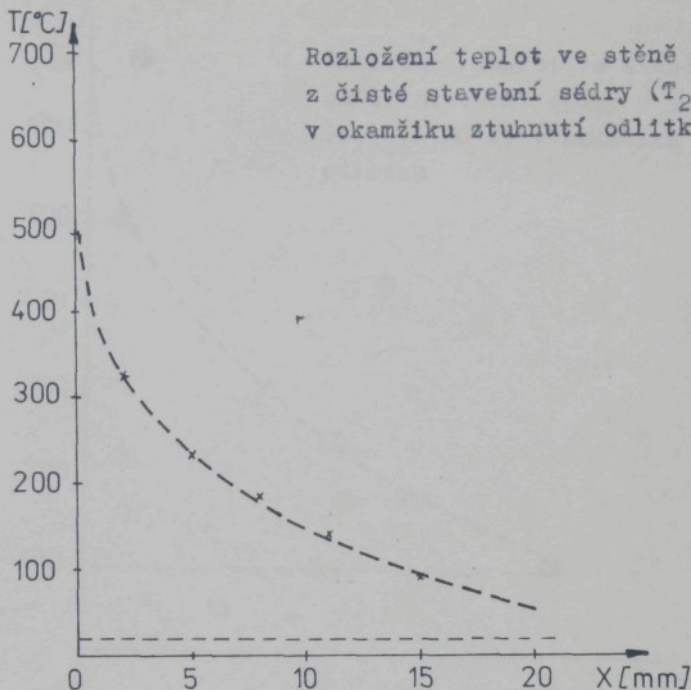


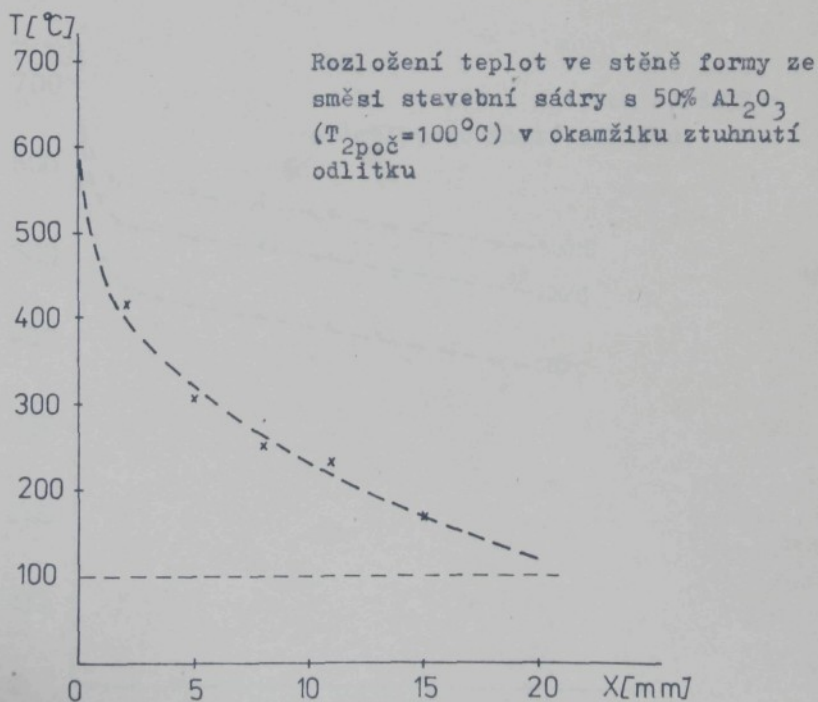
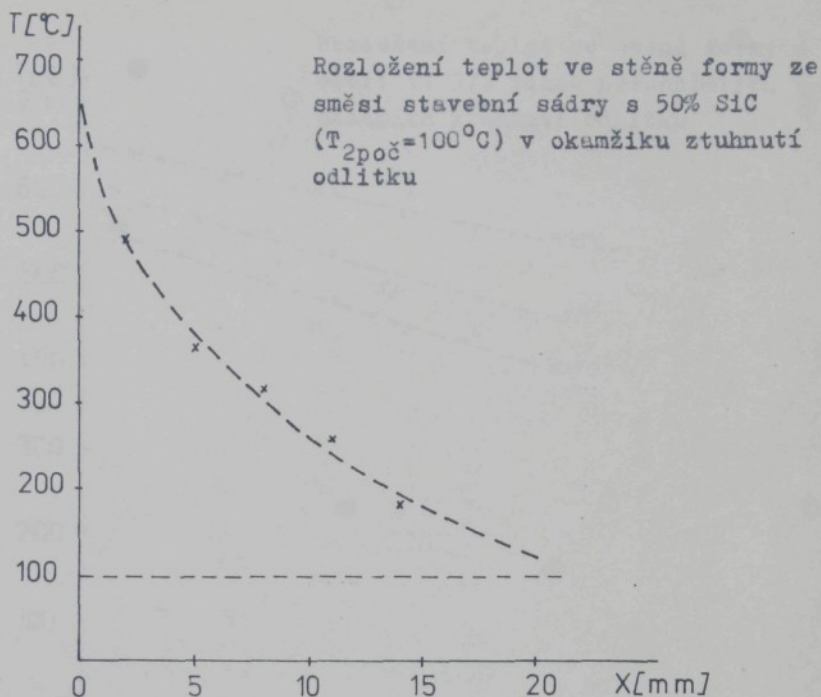
Průběh teplot v tavenině a stěně zkušební formy z oceli
 ČSN 11 373 opatřené nátěrem ACHESON v různých vzdálenostech
 od líce formy $T_{2\text{poč}} = 300, 400 \text{ a } 500^\circ\text{C}$



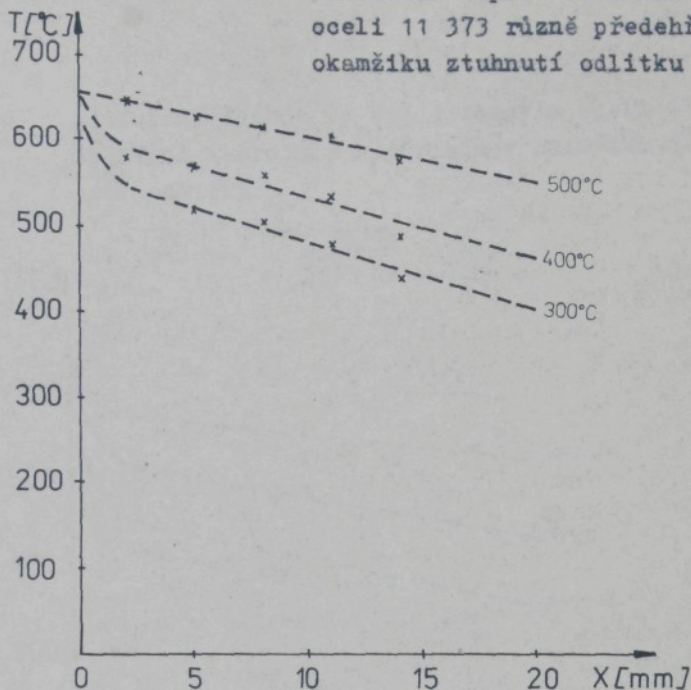
Průběh teplot v tavenině a stěně zkušební formy z oceli
ČSN 11 373 opatřené nátěrem isolačním v různých vzdále-
nostech od líce formy $T_{2\text{poč}} = 300, 400 \text{ a } 500^\circ\text{C}$



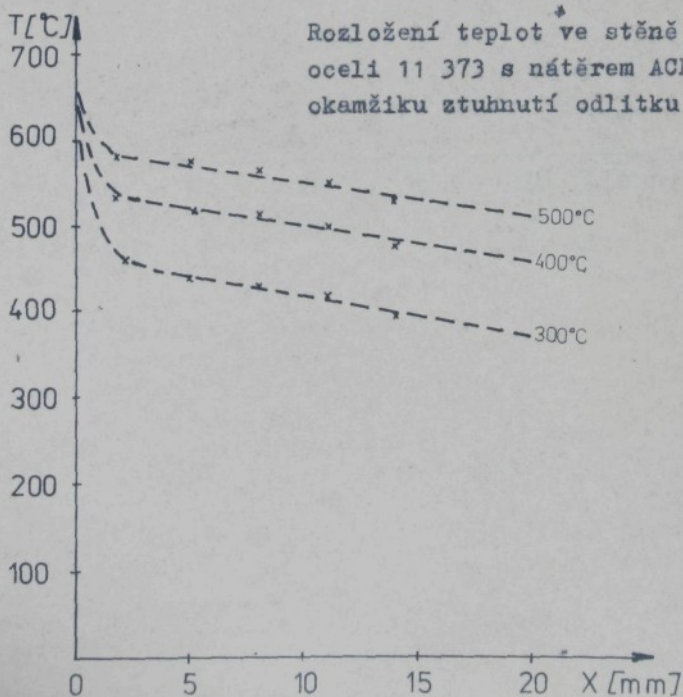




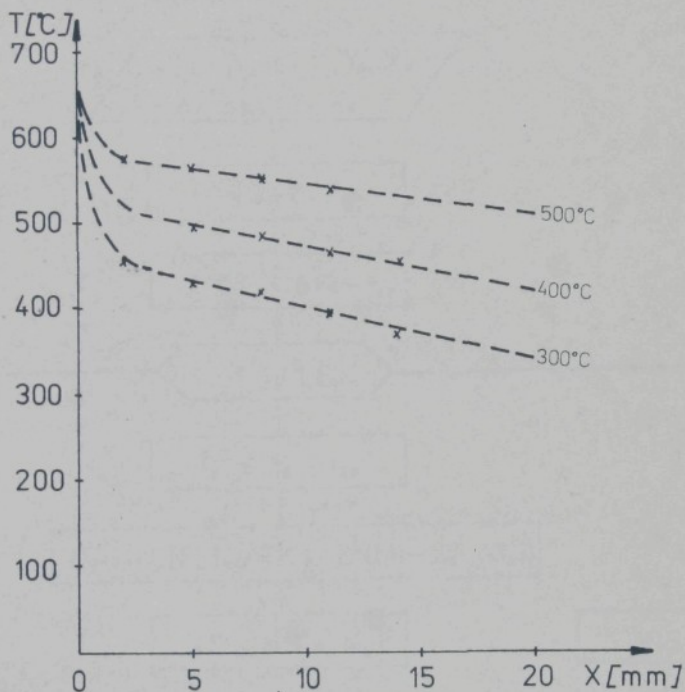
Rozložení teplot ve stěně formy z
oceli 11 373 různě předehřátých v
okamžiku ztuhnutí odlitku

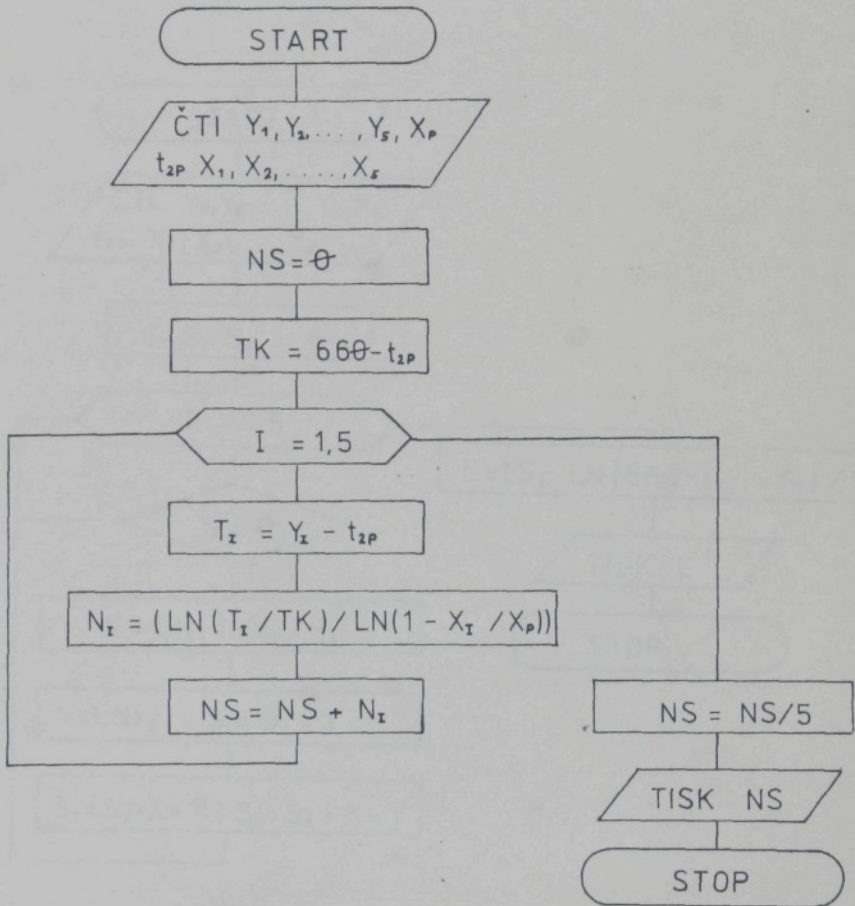


Rozložení teplot ve stěně formy z
oceli 11 373 s nátěrem ACHESON v
okamžiku ztuhnutí odlitku

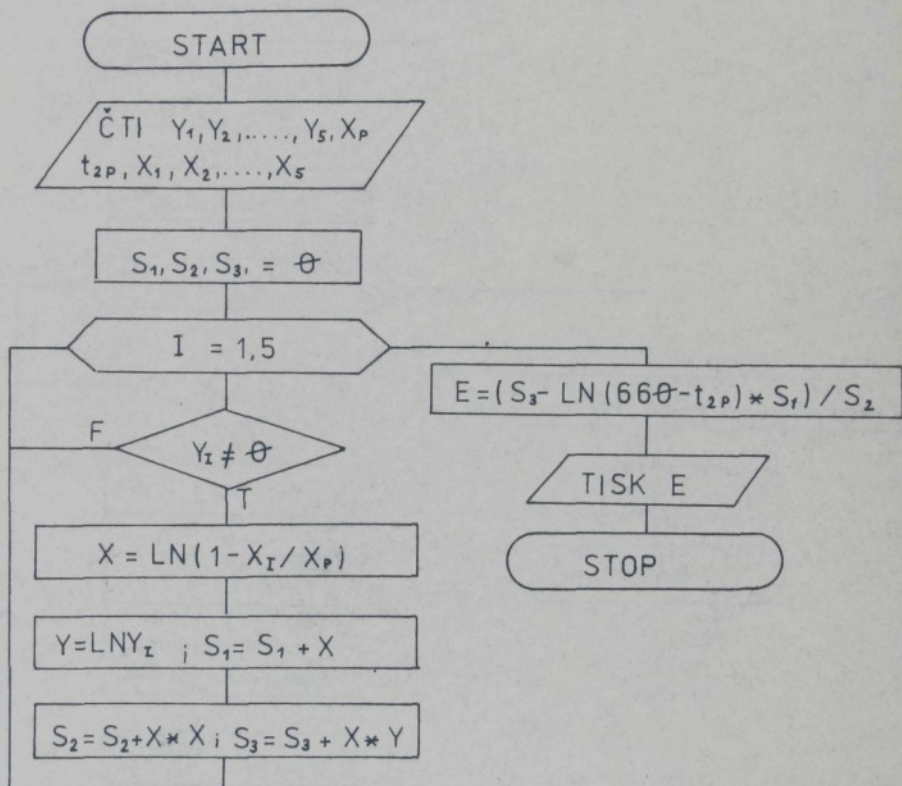


Rozložení teplot ve stěně formy z oceli 11 373
opatřené isolačním nástřikem v okamžiku ztuh-
nutí odlitku

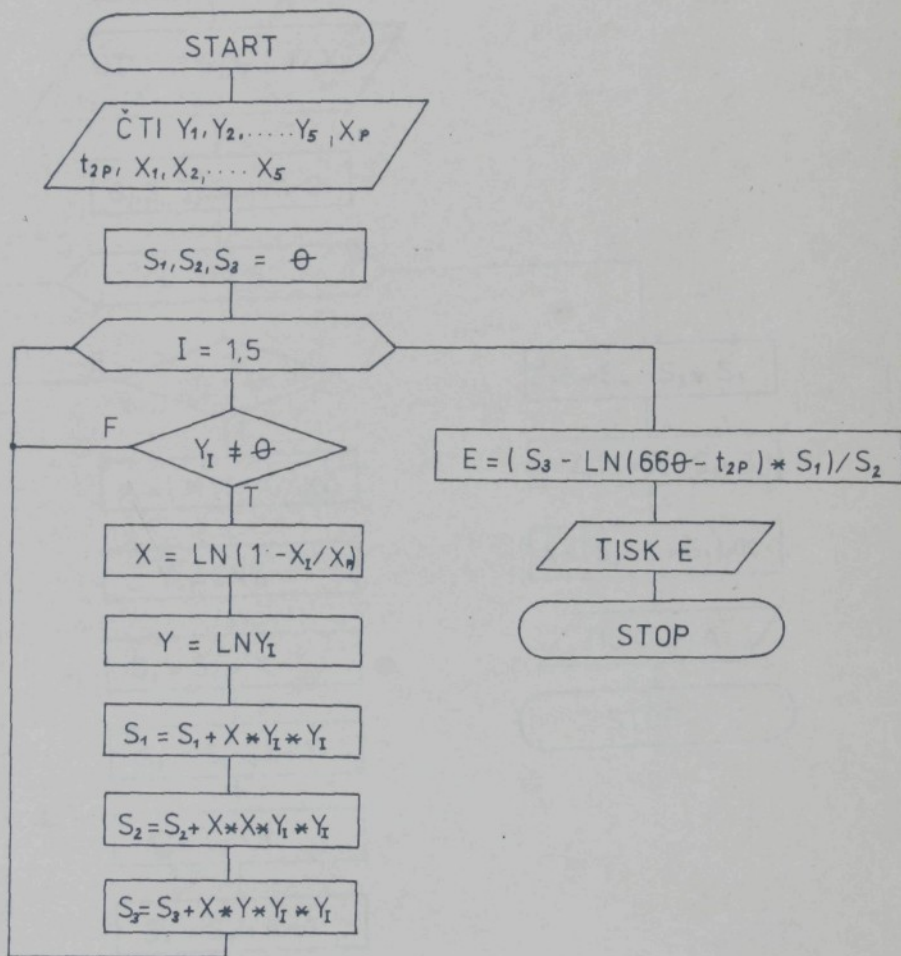




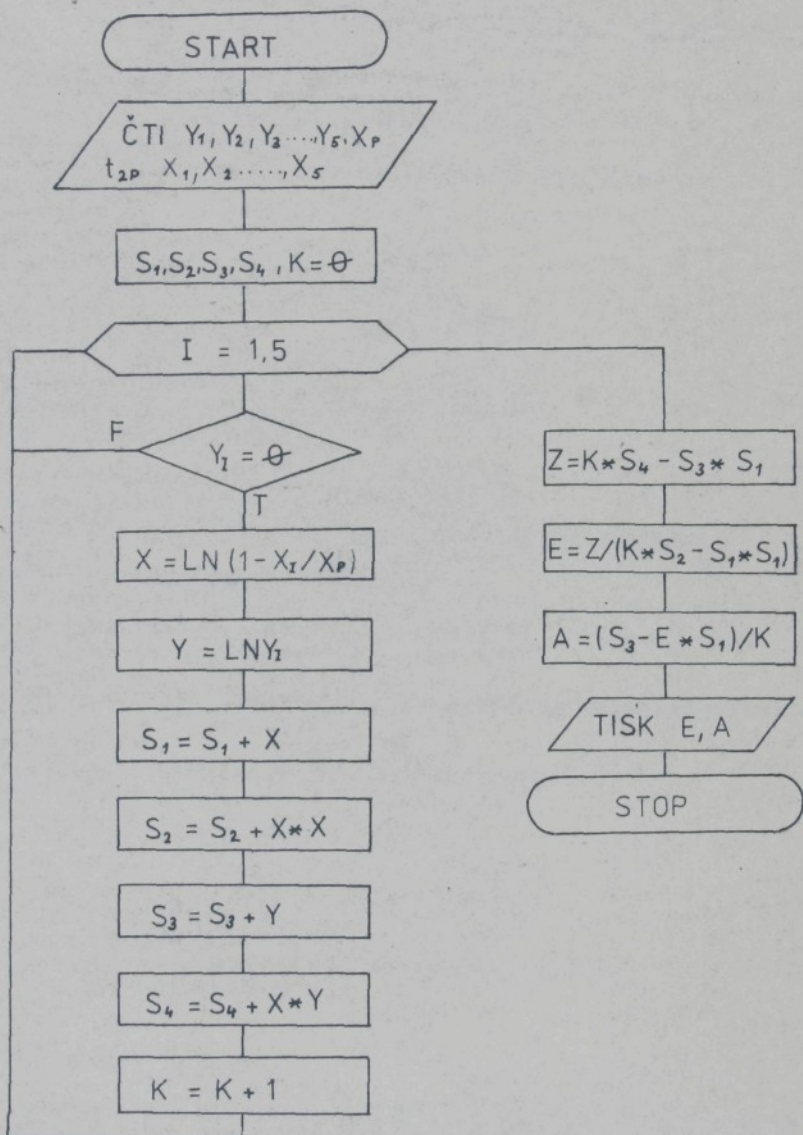
Vývojový diagram pro výpočet exponentu n_2 dle VEJNIKA



Vývojový diagram pro výpočet exponentu n_2 metodou linearizace vzhledem k parametru n_2



Vývojový diagram pro výpočet exponentu n_2 metodou
vyváženého linearizovaného vztahu



Vývojový diagram pro výpočet exponentu n_2 metodou regrese mocnin


```

1 REM*****
2 REM*  USST LIBEREC      -      KMM  *
3 REM*                                     *
4 REM*      Program pro vypocet      *
5 REM*      exponentu nahradni paraboly *
6 REM*      a souc. tepelne akumulace *
7 REM*      v jazyku BASIC          *
8 REM*                                     *
9 REM*****
10 CLEAR 2000:620001:CLS:KEY OFF
20 DIM LQ(50),LP(50),LV(50,5),LT(50,5),LO(50)
30 DIM E(50,5),R(50,4),S(50),L*(50)
40 DIM T3(50),T4(50),T1(50),T7(50,4),D(4)
50 GOSUB 500:GOSUB 940
60 FOR K1=1 TO LL
70 S1=0:S2=0:S3=0:S4=0
80 S7=0:S8=0:S5=0:S6=0:N=0
90 FOR K2=1 TO 5
100 T(K2)=LT(K1,K2)-LP(K1)
110 IF T(K2)<=0 THEN 130
120 N=N+1:GOTO 140
130 T(K2)=0:GOTO 200
140 X = LOG(1-(LV(K1,K2)/LO(K1))) * Y = LOG(T(K2))
150 S1=S1+X:S2=S2+X*X:S3=S3+Y
160 S4=S4+X*Y
170 S5=S5+X*Y*(T(K2)^2) : S6=S6+X*(T(K2)^2)
180 S7=S7+X*Y*T(K2)^2
190 U = LOG(ABS (T(K2)) / (660-LP(K1))) / LOG(1-L*(K1)) * S8=S8+U
200 NEXT K2
210 E(K1,1)=(N*S4-S1*S3) / (N*S2-S1*S1)
220 E(K1,2)=S8/N
230 E(K1,3)=ABS ((S4-LOG(660-LP(K1))*S1)/S2)
240 E(K1,4)=ABS ((S5-LOG(660-LP(K1))*S6)/S7)
250 FOR K2=1 TO 4
260 R(K1,K2)= 9743353.488# / (660-LP(K1)) * SQR(OR((E(K1,K2)+1) / (2*E(K1,K2))))
270 NEXT K2
280 S(K1)=9119118.855# / (660-LP(K1)) * SQR(1/LO
290 T1(K1)=0:T2=1
300 FOR B=1 TO 4
310 D(B)=0
320 FOR A=1 TO 5
330 Y=(660-LP(K1))*(1-LV(K1,A)/LO(K1))^E(K1,1)
340 D(B)=(LT(K1,A)-Y)^2+D(B)
350 IF T2>5 THEN 390
360 Z=(660-LP(K1))*(1-SIN((3.1415*LV(K1,A))/
370 T1(K1)=(LT(K1,A)-Z)^2+T1(K1)
380 T2=T2+1
390 NEXT A
400 T7(K1,B)=D(B)
410 NEXT B
420 IF D(1)<D(2) AND D(1)<D(3) AND D(1)<D(4)=1
430 IF D(2)<D(1) AND D(2)<D(3) AND D(2)<D(4)=2
440 IF D(3)<D(1) AND D(3)<D(2) AND D(3)<D(4)=3
450 IF D(4)<D(1) AND D(4)<D(2) AND D(4)<D(3)=4
460 NEXT K1
470 GOSUB 1370:GOSUB 1800
480 STOP
490 REM ZADANI HODNOT

```

```

00 K4=1
10 INPUT "CELKOVY POCET UZORKU" : LL
20 FOR LK=K4 TO LL
30 INPUT "TYP MATERIALU FORMY" : FL*(LK)
40 INPUT "CAS" (s) = " : FLC(LK)
50 INPUT "POCATECNI TEPLOTA" (C) = " : FLP(LK)
60 PRINT "UZDALENOSTI (jesou-li stejne jako u predchazejiciho vzo
ku odesli v prvni pripade
70 INPUT "UZDALENOST c: 1 = " : KS
80 IF KS=0 THEN 640
90 LV(LK,1)=KS
00 FOR H=2 TO 5
10 PRINT "UZDALENOST c: " : H : " = " : INPUT LV(LK,H)
20 NEXT H
30 GOTO 670
40 FOR H=1 TO 5
50 LV(LK,H)=LV(LK-1,H)
60 NEXT H
70 FOR H=1 TO 5
80 PRINT "TEPLOTA c: " : H : " = " : INPUT LT(LK,H)
90 NEXT H
00 INPUT "Teplne ovlivnena vrstva (mm) = " : LD(L
10 INPUT "KOKILA : AND = 1 NE = 0" : T4(LK)
20 CLS
30 NEXT LK
40 GOSUB 890 : IF W=1 THEN 520
50 RETURN
60 CLS : PRINT "OPRAVA: 1 AND 2 NE" : INPUT WB
70 IF WB=2 THEN 880
80 INPUT "PORADOVE CISLO UZORKU" : FLK
90 INPUT "CAS" (s) = " : FLC(LK)
00 INPUT "POCATECNI TEPLOTA" (C) = " : FLP(LK)
10 FOR H=1 TO 5
20 PRINT "UZDALENOST c: " : H : " = " : INPUT LV(LK,H)
30 NEXT H
40 FOR H=1 TO 5
50 PRINT "TEPLOTA c: " : H : " = " : INPUT LT(LK,H)
60 NEXT H
70 INPUT "Teplne ovlivnena vrstva (mm) = " : LD(L
80 RETURN
90 CLS : PRINT "ROZSIRENI POCTU UZORKU: 1 AND 2 NE
: INPUT W
00 IF W=2 THEN 930
10 INPUT "POCET" : WA
20 K4=LL+1 : LL=LL+WA : GOTO 520
30 RETURN
40 REM VYPIS ZADANYCH HODNOT
50 CLS
60 LOCATE 4,2
70 PRINT "VYPIS ZADANYCH HODNOT"
80 FOR Z1=1 TO 2000 : NEXT Z1 : CLS
90 LOCATE 2,0 : PRINT "TYP MAT. FORMY"
00 LOCATE 2,2 : PRINT "VZOREK CISLO : "
10 LOCATE 2,4 : PRINT " CAS (s) "
20 LOCATE 2,6 : PRINT " POC. TEPLOTA (C) "
30 LOCATE 2,8 : PRINT " UZDALENOSTI (mm)
1 2 3 4
40 LOCATE 2,12 : PRINT " TEPLOTA (C)
1 2 3 4

```

```

050 LOCATE 2;16 :PRINT "TEPELNE DULIVNENA OBLAST"
060 FOR LK=1 TO LL
070 FOR W1=19 TO 35 :LOCATE W1;0 :PRINT CHR$(219) :
080 FOR W1=19 TO 22 :LOCATE W1;2 :PRINT CHR$(219)
090 LOCATE W1;4 :PRINT CHR$(219)
100 LOCATE W1;6 :PRINT CHR$(219):NEXT W1
110 W2=0
120 FOR W3=1 TO 5
130 FOR W4=1 TO 3
140 LOCATE W2;10 :PRINT CHR$(219)
150 LOCATE W2;14 :PRINT CHR$(219)
160 W2=W2+1
170 NEXT W4
180 W2=W2+2
190 NEXT W3
200 FOR W3=27 TO 28 :LOCATE W3;16 :PRINT CHR$(219):
210 LOCATE 19;0 :PRINT L$(LK)
220 LOCATE 19;2 :PRINT USING "####"ILK
230 LOCATE 19;4 :PRINT USING "####"ILC(LK)
240 LOCATE 19;6 :PRINT USING "####"ILP(LK)
250 W2=0
260 FOR W3=1 TO 5
270 LOCATE W2;10 :PRINT USING "###"ILV(LK;W3)
280 LOCATE W2;14 :PRINT USING "###"ILT(LK;W3)
290 W2=W2+5
300 NEXT W3
310 LOCATE 27;16 :PRINT USING "##"ILO(LK)
320 FOR W=1 TO 2500 : NEXT W
330 NEXT LK
340 GOSUB 740:IF WB=1 THEN 950
350 RETURN
360 REM -----
370 CLS :LOCATE 6;2 :PRINT " VYPIS VYSLEDKU"
380 FOR W=1 TO 2500 :NEXT W : CLS
390 LOCATE 2;0 :PRINT "TYP MAT. FORMY"
400 LOCATE 2;2 :PRINT "UZOREK CISLO : "
410 LOCATE 2;4 :PRINT " POC.TEPLOTA (C)"
420 FOR K2=6 TO 9
430 LOCATE 2;K2 :PRINT " EXPONENT n2":NEXT K2
440 FOR K2=11 TO 14
450 LOCATE 2;K2 :PRINT " KOEFICIENT b2":NEXT K2
460 LOCATE 2;16 :PRINT " NEJ.V PORADI c.:"
470 FOR LK=1 TO LL
480 FOR W1=19 TO 35 :LOCATE W1;0 :PRINT CHR$(219) :
490 FOR W1=19 TO 30 :LOCATE W1;2 :PRINT CHR$(219)
500 LOCATE W1;4 :PRINT CHR$(219):NEXT W1
510 FOR W5=6 TO 9
520 FOR W1=19 TO 30
530 LOCATE W1;W5 :PRINT CHR$(219):NEXT W1:NEXT W5
540 FOR W3=11 TO 14
550 FOR W4=19 TO 30
560 LOCATE W4;W3 :PRINT CHR$(219):NEXT W4:NEXT W3
570 FOR W1=19 TO 22 :LOCATE W1;16 :PRINT CHR$(219):
580 FOR W1=18 TO 21
590 FOR W3=0 TO 30 :LOCATE W3;W1 :PRINT CHR$(219):N W1
600 IF T4(LK)=0 THEN 1670
610 IF T1(LK)(T7(LK;4) THEN 1650
620 LOCATE 2;18 :PRINT "V PRIPADE TETO KOKILY JE NE VYSLEDEK n2 A
630 PORADI c.:" 4"

```



```

630 T9=0
640 GOTO 1670
650 LOCATE 2,18 :PRINT " KOEF. b2 MET.SIN"
660 T9=1
670 LOCATE 19,0 :PRINT L$(LK)
680 LOCATE 19,2 :PRINT USING "####"FLK
690 LOCATE 19,4 :PRINT USING "####"FLP(LK)
700 FOR W1=6 TO 9
710 LOCATE 19,W1 :PRINT USING "##.##^####"FE(LK,W1-5):NE
720 FOR W3=11 TO 14
730 LOCATE 19,W3 :PRINT USING "##.##^####"FB(LK,W3-10) :
740 LOCATE 19,16 :PRINT USING "####"FT3(LK)
750 IF T9=0 THEN 1770
760 LOCATE 19,20 :PRINT USING "##.##^####"FS(LK)
770 FOR W=1 TO 2500 : NEXT W
780 NEXT LK
790 RETURN
800 CLS:INPUT "VYPIS NA TISKARNU"
      NE=2:"IW
810 IF W=2 THEN 1970
820 LPRINT " VYPIS VYSLEDKU"
830 FOR LK=1 TO LL
840 LPRINT " UZOREK CISLO      "FLK
850 LPRINT " TYP MAT. FORMY "FLK
860 LPRINT " POC.TEPLOTA (C) "FLP(LK)
870 FOR K2=1 TO 4
880 LPRINT " EXPONENT      n2 ="FLPRINT USING "##.#####^####":NEXT K2
890 FOR K2=1 TO 4
900 LPRINT " KOEFICIENT b2 ="FLPRINT USING "##.#####^####":NEXT K2
910 LPRINT " NEJ.V PORADI c. ="FT3(LK)
920 LPRINT "NEJ. ="
930 WD=FT3(LK)
940 LPRINT "      exp n2 ="FLPRINT USING "##.#####^####"
950 LPRINT "      koef b2 ="FLPRINT USING "##.#####^####"
960 IF T4(LK)=0 THEN 1945
970 IF T1(LK)<T7(LK+4) THEN 1960
980 LPRINT "V PRIPADE TETO KOKILY JE NEJVYHODNEJSI UYSL b2 V PORADI
990 LPRINT " KOEF. b2 MET.SIN b2 = "FLPRINT USING "##FS(LK)
1000 LPRINT "-----"
1010 NEXT LK
1020 RETURN

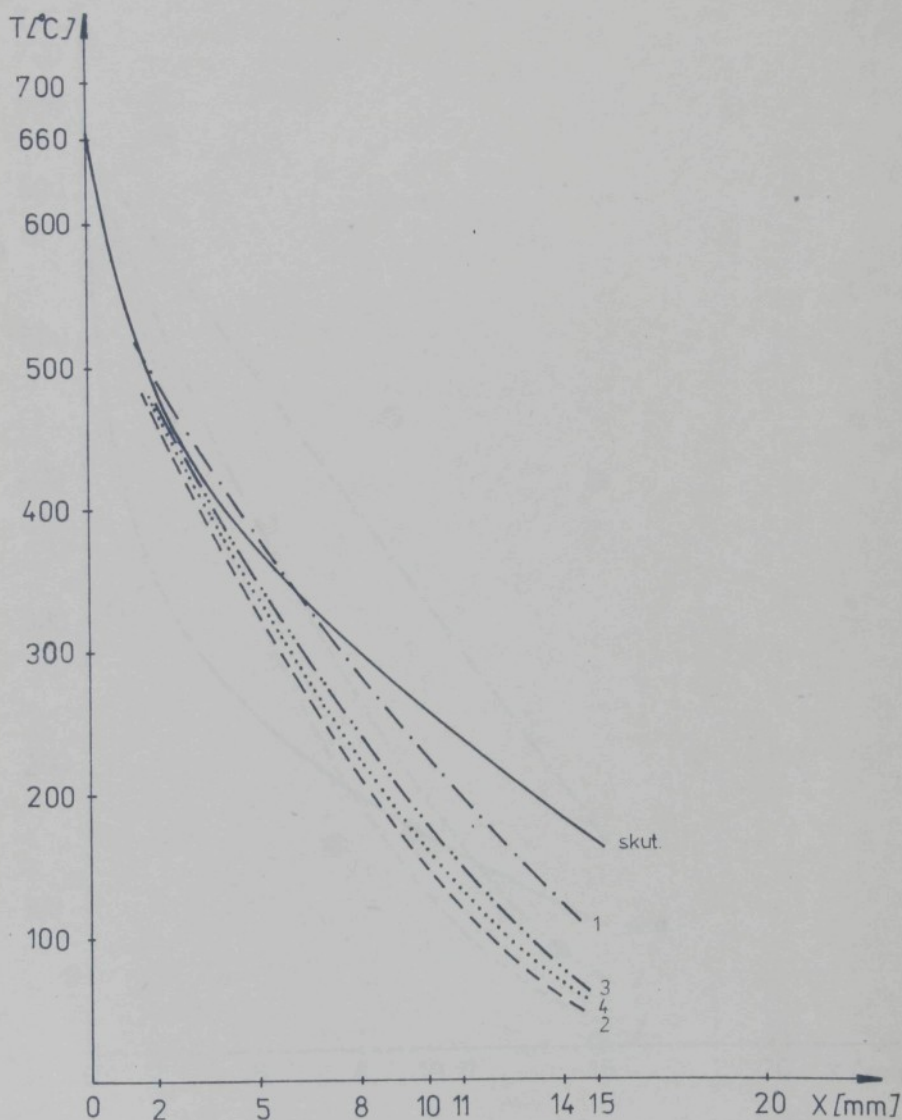
```

```

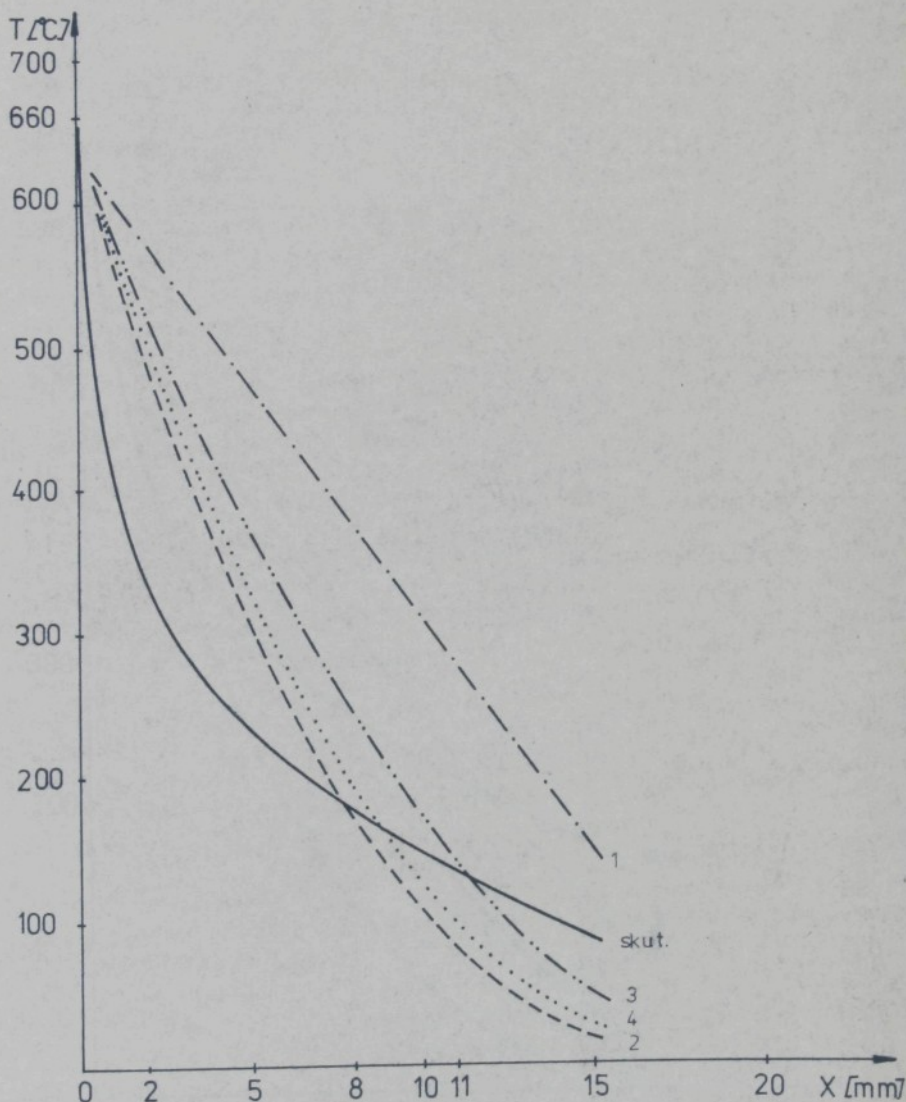
VYPIS VYSLEDKU
UZOREK CISLO : 1
TYP MAT. FORMY = GARASIN -2
POC.TEPLOTA (C): 240
EXPONENT n2 = 3.8721E+00
EXPONENT n2 = 5.5918E+00
EXPONENT n2 = 4.6210E+00
EXPONENT n2 = 5.4004E+00
KOEFFICIENT b2 = 7.5120E+02
KOEFFICIENT b2 = 7.2710E+02
KOEFFICIENT b2 = 7.3840E+02
KOEFFICIENT b2 = 7.2905E+02
NEJ.V PORADI c.: 1
NEJ :
      exp n2 = 3.872090E+00
      koef b2 = 7.511964E+02
KOEf. b2 MET.SIN b2 = 8.8640E+02
-----
UZOREK CISLO : 2
TYP MAT. FORMY = AS+50XS10 -10
POC.TEPLOTA (C): 107
EXPONENT n2 = 1.2583E+00
EXPONENT n2 = 3.2394E+00
EXPONENT n2 = 1.9558E+00
EXPONENT n2 = 2.3154E+00
KOEFFICIENT b2 = 8.7005E+02
KOEFFICIENT b2 = 7.4295E+02
KOEFFICIENT b2 = 8.0544E+02
KOEFFICIENT b2 = 7.7713E+02
NEJ.V PORADI c.: 1
NEJ :
      exp n2 = 1.258310E+00
      koef b2 = 8.700443E+02
KOEf. b2 MET.SIN b2 = 8.5941E+02
-----

```

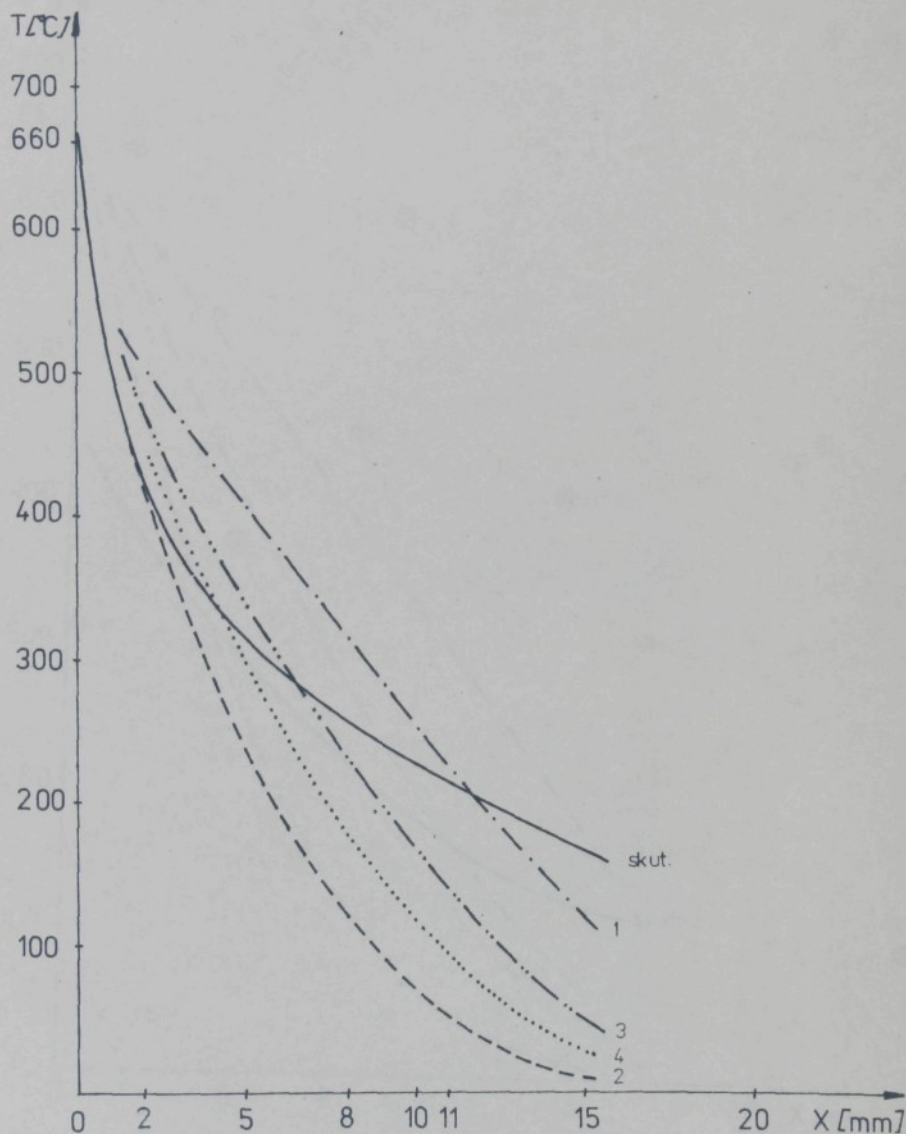
Ukázka výpisu vypočtených hodnot dle programu
na přílohách s. 31 - 34



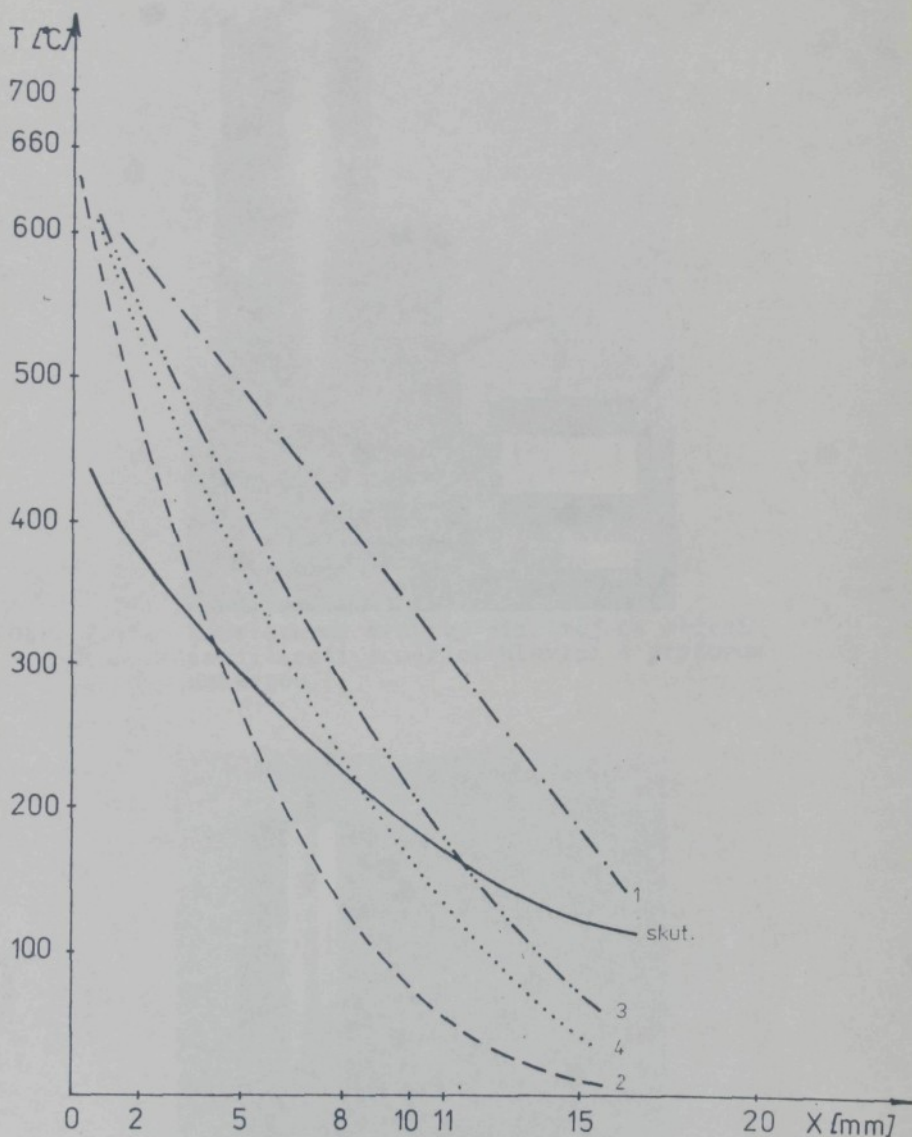
Nahrazení skutečného průběhu teplotního gradientu ve stěně formy ze směsi stavební sádky s 50% SiC ($T_{2\text{poč}} = 100^\circ\text{C}$)
 1 ... regrese mocnin (nejlepší), 2 ... výpočet dle Vejnika,
 3 ... linearizace vzhledem k parametru n_2 , 4 ... vyvážený
 linearizovaný vztah



Nahrazení skutečného průběhu teplotního gradientu ve stěně
 formy z čisté alabastrové sádky ($T_{2\text{poč}} = 20^{\circ}\text{C}$)
 1 ... regrese mocnin, 2 ... výpočet dle Vejnika (nejlepší),
 3 ... linearizace vzhledem k parametru n_2 , 4 ... vyvážený
 linearizovaný vztah



Nahrazení skutečného průběhu teplotního gradientu ve stěně formy ze směsi stavební sádky s 50% Al_2O_3 ($T_{2\text{poč}} = 100^\circ\text{C}$)
 1 ... regrese mocnin, 2 ... výpočet dle Vejnika, 3 ...
 linearizace vzhledem k parametru n_2 (nejlepší), 4 ... vyvá-
 žený linearizovaný vztah.



Nahrazení skutečného průběhu teplotního gradientu ve stěně formy ze směsi stavební sádky s 50% SiC ($T_{2\text{poč}} = 20^{\circ}\text{C}$)
 1 ... regrese mocnin, 2 ... výpočet dle Vejnika,
 3 ... linearizace vzhledem k parametru n_2 , 4 ... vyvážený
 linearizovaný vztah (nejlepší)



Obr. 7.11. Laboratorní zvonový přístroj na měření prodyšnosti s měřicí hlavici s pryžovou manžetou



Obr. 7.12. Laboratorní přístroj na měření prodyšnosti s hlavicí dle prof. Odstrčila



Obr. 7.13. Rozložená měřicí hlavice dle prof.Odstrčila



Obr. 7.14. Přístroj na měření prodyšnosti LPiLR 1 (PLR)

Tab. 7.1 Naměřené hodnoty a vypočtené výsledky měření b_2 , R_{mt} a D

Formovací materiál	VS [ml/g]	t_{2p} [°C]	teplota [°C ve vzdálenosti [mm]					τ_3 [s]	x_2 [mm]	n_2	b_2 [W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]	R_{mt} [MPa]	D [pSi]	pozn.
			2	5	8	11	15							
100% AS (alabastr.sádra)	0,75	20	356	270	184	136	107	355	20	2,3419	683	1,799	6,3	2.
90% AS + 10% Al ₂ O ₃	0,70	20	273	258	209	160	122	419	20	3,5726	595	0,861	6,4	2.
		100	291	277	184	180	140	338	20	2,2926	782			3.
70% AS + 30% Al ₂ O ₃	0,65	20	318	289	227	149	127	486	20	1,9643	600	0,483	7,1	4.
		100	378	347	291	209	187	434	20	1,6831	710			3.
50% AS + 50% Al ₂ O ₃	0,55	20	419	282	204	140	82	363	20	2,3312	675	0,360	8,0	2.
		100	337	322	269	206	144	406	20	2,0189	730			3.
90% AS + 10% SiC	0,55	20	282	258	170	156	113	318	20	3,6173	683	1,024	5,3	2.
		100	324	309	220	204	158	509	20	1,0808	815			1.
70% AS + 30% SiC	0,50	20	400	289	220	156	104	278	20	2,1736	755	0,610	5,4	2.
		100	474	362	293	229	158	298	20	2,1197	830			2.
50% AS + 50% SiC	0,45	20	360	293	237	158	122	278	20	1,9632	794	0,470	7,3	4.
		100	390	330	280	200	157	372	20	1,2583	865			1.
GLORIA special	0,35	20	279	202	162	104	76	302	20	2,9047	718	0,210	5,3	2.
		100	312	233	191	135	98	374	15	2,6264	772			2.
50% AS + 50% SS nenapěněná	0,80	20	331	269	176	138	104	399	20	2,4068	641	0,329	4,1	2.
		100	360	297	208	163	129	507	20	2,8878	649			2.
50% AS + 50% SS napěněná	0,75	20	458	358	301	238	198	567	20	2,0576	551	0,192	12	2.

Tab. 7.1 pokračování

Formovací materiál	VS [ml/g]	t _{2p} [°C]	teplota [°C] ve vzdálenosti [mm]					τ ₃ [s]	x ₂ [mm]	n ₂	b ₂ [W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]	R _{mt} [MPa]	D [pSi]	pozn.
			2	5	8	11	15							
100% HG (Hartgips)	0,82	20	261	229	173	142	98	469	20	3,9111	557	0,347	4,7	2.
		100	475	376	333	297	200	471	20	1,3741	745			3.
90% HG + 10% Al ₂ O ₃	0,85	20	298	280	200	140	73	440	20	2,5181	607	0,306	4,8	4.
		100	371	343	275	213	148	472	20	2,3127	650			2.
70% HG + 30% Al ₂ O ₃	0,75	20	327	296	216	167	162	455	20	2,0421	616	0,342	6,1	2.
		100	393	313	234	186	136	441	20	2,6214	689			2.
50% HG + 50% Al ₂ O ₃	0,60	20	236	207	156	107	89	318	20	4,0935	650	0,543	6,8	2.
		100	308	274	236	176	136	485	20	1,4119	760			1.
90% HG + 10% SiC	0,80	20	381	260	197	113	80	366	20	2,5122	665	0,279	4,3	2.
		100	390	293	237	155	122	380	20	3,0655	782			4.
70% HG + 30% SiC	0,60	20	302	234	141	122	82	290	20	2,7631	738	0,210	4,7	2.
		100	327	280	189	164	127	308	20	3,6014	810			4.
50% HG + 50% SiC	0,55	20	345	233	189	118	77	237	20	2,6314	821	0,184	5,4	2.
		100	390	275	206	142	95	390	14	1,5664	855			1.
100% SS (staveb. sádra)	0,75	20	325	232	184	139	86	332	20	2,5629	697	0,720	4,5	2.
		100	306	247	198	158	103	433	16	1,5659	815			1.
75% SS + 25% ZrO ₂	0,68	20	338	249	191	148	107	306	20	3,2480	704	1,204	2,4	2.
		100	371	295	240	202	162	430	20	1,9277	704			3.

Tab. 7.1 pokračování

Formovací materiál	VS [ml/g]	t _{2p} [°C]	teplota [°C] ve vzdálenosti [mm]					τ ₃ [s]	x ₂ [mm]	n ₂	b ₂ [W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]	R _{mt} [MPa]	D [μSI]	pozn.
			2	5	8	11	14							
90% SS + 10% ZrO ₂	0,82	20	380	304	244	193	140	270	20	2,6362	769			2.
		100	470	375	255	211	162	363	20	1,9070	852			3.
90% SS + 10% SiO ₂	0,78	20	548	382	307	202	149	307	20	1,6139	780	0,539	1,7	2.
		100	525	385	311	220	167	321	20	1,6131	895			1.
80% SS + 20% SiO ₂	0,72	20	396	302	230	180	131	266	20	2,7721	770	0,440	1,9	2.
		100	515	372	283	175	122	368	20	2,0315	890			4.
70% SS + 30% SiO ₂	0,62	20	460	356	258	207	131	253	20	1,9534	832	0,240	1,7	2.
		100	485	324	224	204	100	287	15	1,4444	960			4.
60% SS + 40% SiO ₂	0,55	20	282	160	96	40	27	198	19	5,0400	837	0,067	1,8	4.
		100	427	350	202	178	136	216	20	2,3384	950			2.
97,5% SS + 2,5% Al ₂ O ₃	0,80	20	331	272	238	162	127	189	20	3,0823	901	0,850	1,7	2.
		100	348	299	268	200	144	293	20	1,5887	980			1.
95% SS + 5% Al ₂ O ₃	0,86	20	413	267	244	142	102	171	20	2,2867	987	0,660	1,7	2.
		100	416	286	273	169	135	198	20	2,0030	1105			1.
92,5% SS + 7,5% Al ₂ O ₃	0,86	20	304	267	227	222	147	252	20	1,0183	1090	0,426	1,7	2.
		100	473	373	296	227	149	178	20	1,7439	1180			1.
90% SS + 10% Al ₂ O ₃	0,88	20	414	327	260	219	162	126	20	1,7772	1199	0,293	1,7	2.
		100	316	240	211	171	122	125	20	3,2163	1250			1.

Tab. 7.1 pokračování

Formovací materiál	VS [ml/g]	t _{2p} [°C]	teplota [°C] ve vzdálenosti [mm]					τ ₃ [s]	x ₂ [mm]	n ₂	b ₂ [W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]	R _{mt} [*] [MPa]	D [μS]	pozn.
			2	5	8	11	14							
95% SS + 5% Al (0,4)	0,85	20	501	424	242	169	113	216	20	1,7749	916			4.
		100	573	424	278	202	144	288	20	2,3674	865			4.
95% SS + 5% SiC	0,86	20	387	260	218	172	138	333	20	3,0971	678	0,653	2,1	2.
		100	364	309	225	185	176	351	20	2,1195	760			3.
90% SS + 10% SiC	0,84	20	297	233	144	131	92	269	20	2,5629	820	0,663	1,7	3.
		100	385	336	274	243	196	313	20	1,7474	832			3.
85% SS + 15% SiC	0,76	20	331	268	233	154	109	126	20	3,5473	1086	0,701	1,8	2.
		100	358	307	271	214	174	238	20	3,4671	978			2.
80% SS + 20% SiC	0,70	20	381	296	269	180	162	216	20	1,9396	902	0,641	1,7	2.
		100	390	329	299	271	178	353	20	0,8959	1085			1.
75% SS + 25% SiC	0,64	20	411	324	249	209	162	236	20	1,6257	890	0,625	1,9	2.
		100	452	383	235	211	169	193	20	2,3384	1000			2.
70% SS + 30% SiC	0,63	20	499	362	300	198	158	225	20	1,6684	908	0,680	1,7	2.
		100	481	335	297	189	144	294	20	1,9296	1005			1.
60% SS + 40% SiC	0,58	20	419	276	256	153	111	180	20	2,1814	969	0,635	1,7	2.
		100	504	342	289	169	133	202	20	2,3006	1050			1.
50% SS + 50% SiC	0,54	20	567	413	351	171	138	171	20	1,5497	1056	0,612	1,7	2.
		100	487	366	318	260	207	207	20	1,3152	1135			1.
60% SS + 40% SiC (0,4)	0,60	20	313	182	144	98	64	117	20	3,9942	1113			2.
		100	384	286	244	189	164	164	20	2,0561	1126			3.

Tab. 7.1 pokračování

Formovací materiál	VS [ml/g]	t _{2p} • [°C]	teplota [°C] ve vzdálenosti [mm]					τ ₃ [s]	x ₂ [mm]	n ₂	b ₂ [W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]	R _{mt} [MPa]	D [μSi]	pozn.
			2	5	8	11	15							
95% SS + 5% Al ₂ O ₃	0,90	20	357	163	123	89	69	255	20	3,9035	756	0,630	2,4	2.
		100	442	230	198	194	167	307	20	2,5090	800			4.
90% SS + 10% Al ₂ O ₃	0,85	20	347	260	216	211	189	567	20	3,4045	771	0,640	2,4	2.
		100	374	335	242	204	180	417	20	1,5528	790			1.
80% SS + 20% Al ₂ O ₃	0,76	20	242	147	127	118	111	235	20	4,5859	775	0,635	1,9	2.
		100	302	193	189	167	136	293	20	3,3874	805			4.
70% SS + 30% Al ₂ O ₃	0,74	20	336	167	111	96	82	230	20	3,9965	793	0,614	2,4	2.
		100	429	302	253	229	162	303	20	1,8373	845			3.
60% SS + 40% Al ₂ O ₃	0,69	20	171	144	140	96	91	199	20	5,3887	831	0,572	2,9	2.
		100	264	244	202	189	166	269	20	2,5452	852			4.
50% SS + 50% Al ₂ O ₃	0,56	20	340	193	136	111	73	183	20	3,7419	896	0,495	2,4	2.
		100	415	306	253	235	166	259	20	1,7783	934			3.
97,5% SS + 2,5% Fe	0,86	20	249	191	140	109	78	207	20	4,3644	830	1,131	2,4	2.
		100	362	264	222	167	129	172	20	2,0561	1102			3.
95% SS + 5% Fe	0,90	20	470	307	256	153	107	216	20	2,0914	890	0,905	2,8	2.
		00	480	351	311	220	167	261	20	1,2199	1176			1.
90% SS + 10% Fe	0,88	20	438	330	233	158	91	162	20	2,4861	1002	0,735	3,2	2.
		100	455	387	278	209	131	189	18	1,7439	1160			1.

Tab. 7.1 pokračování

třídící materiál	VS [ml/g]	t _{2p} [°C]	teplota [°C] ve vzdálenosti [mm]					τ ₃ [s]	x ₂ [mm]	n ₂	b ₂ [W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]	R _{mt} [MPa]	D [μs]	pozn.
			2	5	8	11	14							
% SS + 15% Fe	0,85	20	320	238	192	149	118	112	20	3,6248	1149	0,535	3,7	2.
		100	320	245	216	176	127	126	20	3,2163	1244			2.
% SS + 20% Fe	0,80	20	413	270	184	100	69	108	20	5,0081	1196	0,294		2.
		100	466	363	285	197	173	151	20	2,1583	1210			1.
% SS+25%SiC+1%Fe	0,67	20	451	321	275	213	167	284	20	1,6194	814	0,768	1,8	4.
		100	451	344	299	238	205	337	20	1,0703	933			1.
% SS+25%SiC+2%Fe	0,67	20	313	260	184	113	78	251	20	3,5276	769	0,825	1,8	2.
		100	534	398	324	233	180	315	20	1,6131	903			1.
% SS+25%SiC+3%Fe	0,68	20	466	368	293	226	202	369	20	1,5732	721	0,952	1,8	4.
		100		377	302	238	224	387	20	1,0455	878			1.
% SS+47%SiC+3%Fe	0,50	20	309	220	156	111	78	171	20	3,7592	926	1,254	2,4	2.
		100	371	305	245	200	158	205	20	1,9465	1025			3.
84, 5%SS+15%SiC+0, 5%AlB0	0,75	20	376	256	177	142	104	162	20	3,1993	969	0,671	2,4	2.
		100	484	320	291	278	236	297	20	0,7981	1071			1.
79, 5%SS+20%SiC+0, 5%AlB0	0,68	20	476	391	302	249	138	198	20	2,8601	889	0,878	1,6	2.
		100	504	391	323	279	210	297	20	1,1264	991			1.
74, 5%SS+25%SiC+0, 5%AlB0	0,68	20	356	276	206	176	144	223	20	2,9269	882	0,913	1,9	2.
		100	409	322	261	219	189	371	20	1,1115	883			1.

Tab. 7.1 pokračování

Urmovací materiál	VS [ml/g]	t _{2p} [°C]	teplota [°C] ve vzdálenosti [mm]					τ ₃ [s]	x ₂ [mm]	n ₂	b ₂ [W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]	R _{mt} [MPa]	D [pSi]	pozn.
			2	5	8	11	14							
SS+15%SiC+1%AlBO	0,69	20	366	264	210	156	108	189	20	3,1942	897	0,668	1,6	2.
		100	360	296	230	178	122	153	20	2,1583	1203			1.
		20	322	272	237	211	156	224	20	2,0714	875	0,925	2,2	4.
		100	456	374	323	300	256	256	20	3,3741	1010			3.
SS+25%SiC+1%AlBO	0,67	20	403	258	179	152	105	217	20	2,7862	852	0,687	2,5	2.
		100	431	298	220	200	144	270	20	1,4335	930			1.
		20	433	248	209	158		261	20	2,4908	789	0,530	2,0	4.
		100	468	281	237	188		298	20	2,9295	907			1.
SS+23%SiC+2%AlBO	0,84	20	287	149	133	118	96	166	20	4,2759	928			2.
		100	344	331	302	149	35	192	12	2,2665	1101			1.
			2	4	6	10	15							
D ₂ písek + furan		20	384	344	313	229	171	227	20	1,5442	918			4.
		140	391	320	251	233	198	233	20	1,0269	1221			1.
		20	353	294	252	180	120	129	20	3,2373	1086			2.
		20	353	284	191	147		106	20	3,2931	1193			4.

Tab. 7.1 pokračování

Zkoušený materiál	VS [ml/g]	t _{2p} [°C]	teplota [°C] ve vzdálenosti [mm]					τ ₃ [s]	x ₂ [mm]	n ₂	b ₂ [W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]	R _{mt} [MPa]	D [pSi]	pozn.
			2	4	6	10	15							
ARASIN	0,40	20	229	183	149	125	79	252	20	5,1138	741	0,575	2	2.
		95	358	289	224	184	102	350	18	2,7631	760			1.
		140	388	331	252	211	143	429	16	2,1343	759			1.
		154	392	340	275	213	120	463	14	1,8082	788			1.
		187	400	362	291	220	131	420	14	3,373	809			1.
		240	420	383	308	260	205	529	14	3,8721	800			1.

Tab. 7.1 pokračování

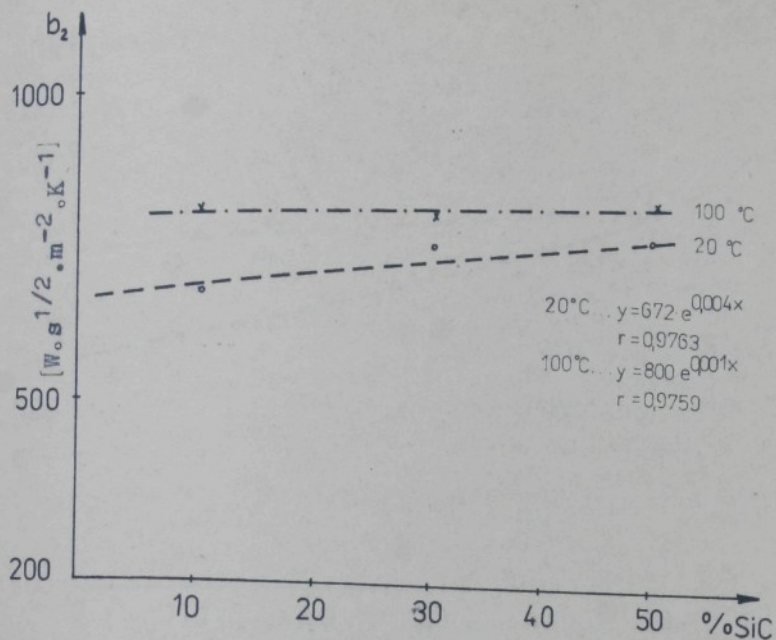
Formovací materiál	t_{2p} [°C]	teplota [°C] ve vzdálenosti [mm]					t_3 [s]	x_2 [mm]	n_2	b_2 [W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]	pozn.
		0	3	6	10	15					
čistá kovová forma (ČSN 11 373)	20	152	91	71	67	44	7,5	20	6,6894	4214	2.
	196	322	320	311	310	273	11,5	20	sin	5770	sin
	298	437	431	411	401	344	14	20	sin	6757	sin
		2	5	8	11	14					
	344	575	558	542	522	460	18	20	0,8655	7544	4.
	447	584	567	556	544	496	22,5	20	0,8706	9995	1.
kovová forma (ČSN 11373) + nátěr ZrO ₂	500	630	613	605	591	549	27	20	0,8356	12282	1.
		0	3	6	10	15					
	238	440	353	349	342	313	22	20	1,7194	4377	1.
	331	500	456	448	436	407	28,5	20	1,4151	5124	1.
		2	5	8	11	14					
	302	527	487	451	428	411	40,5	20	0,5607	5045	1.
kovová forma (ČSN 11373) + isolační nátěr	400	549	507	498	478	460	36	20	1,6580	5592	1.
	500	602	584	573	564	544	63	20	1,3244	7187	1.
	300	460	436	427	402	378	45	20	1,7522	3575	1.
	400	531	500	496	471	462	54	20	1,6822	4553	1.
	500	580	567	560	540	532	108	20	sin	5484	sin

Tab. 7.1 pokračování

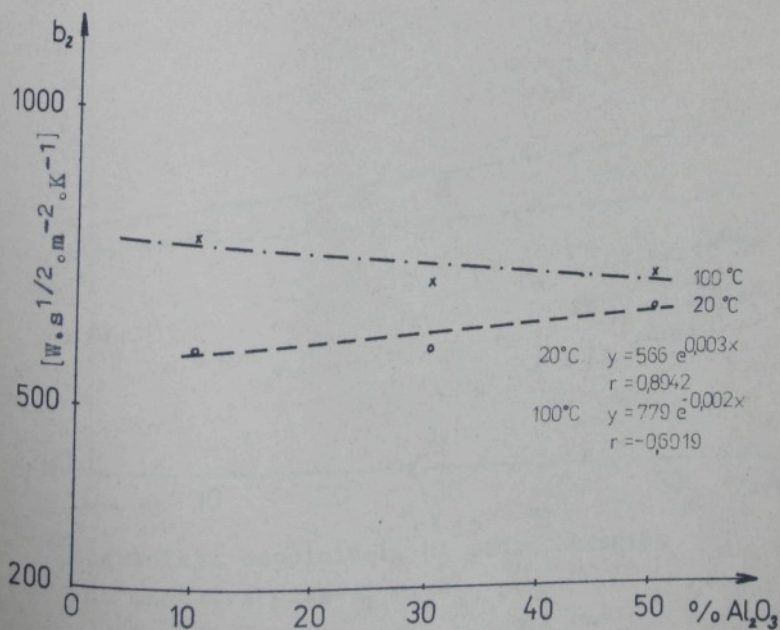
Formovací materiál	t _{2p} [°C]	teplota [°C] ve vzdálenosti [mm]					τ ₃ [s]	x ₂ [mm]	n ₂	b ₂ [W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]	pozn.
		2	5	8	11	14					
kovová forma (ČSN 11373) + nátěr ACHESON	312	464	447	437	426	402	45	20	1,4570	13832	1.
	400	542	536	526	511	491	63	20	1,0907	4622	1.
	500	586	582	576	557	536	77	20	sin	7342	sin
kovová forma (ČSN 11373) + nátěr POSECO	251	424	407	402	386	371	38	20	sin	3618	sin
	407	537	504	500	495	469	45	20	1,5426	5206	1.
	500	584	577	571	566	540	117	20	1,1822	5311	1.

Ve sloupci pozn. jsou uvedeny metody výpočtu n₂ :

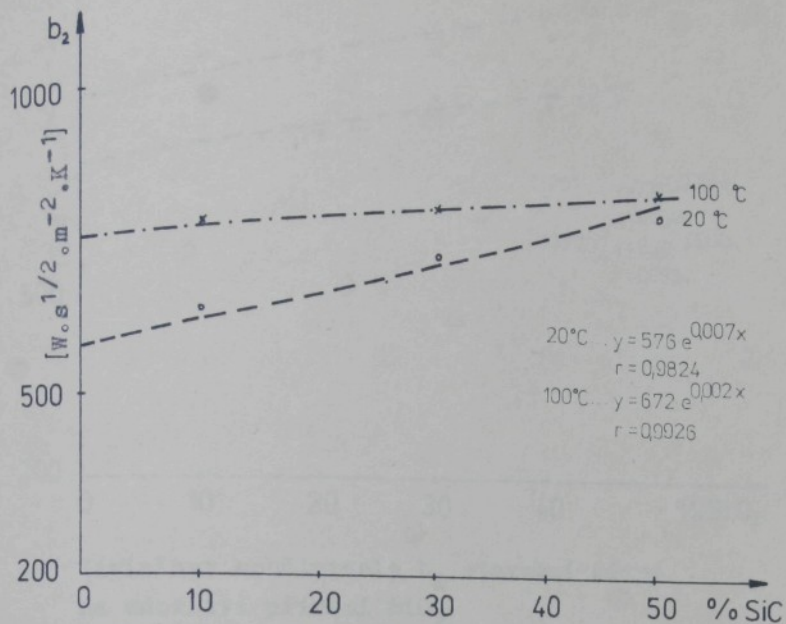
1. regrese mocnin
2. výpočet dle VEJNIKA
3. linearizace vzhledem k parametru n₂
4. vyvážená linearizovaný vztah



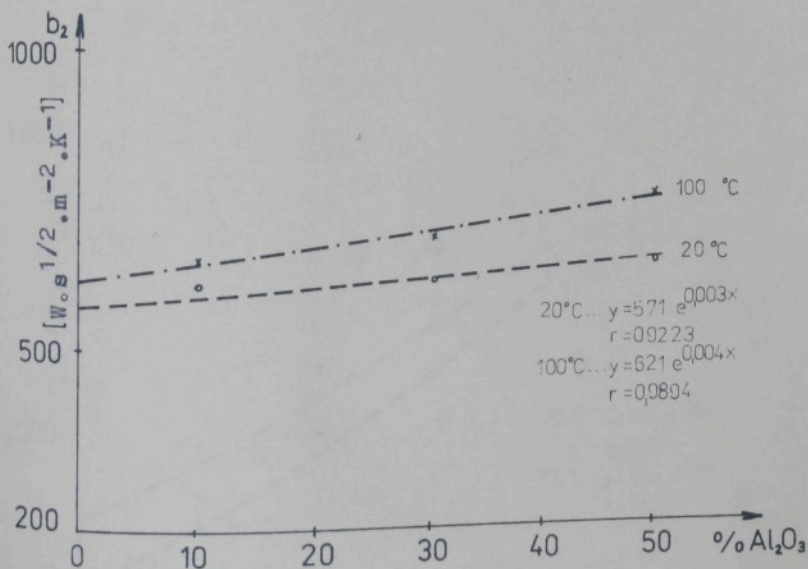
Závislost součinitele b_2 alabastrové sádry na množství příměsi SiC



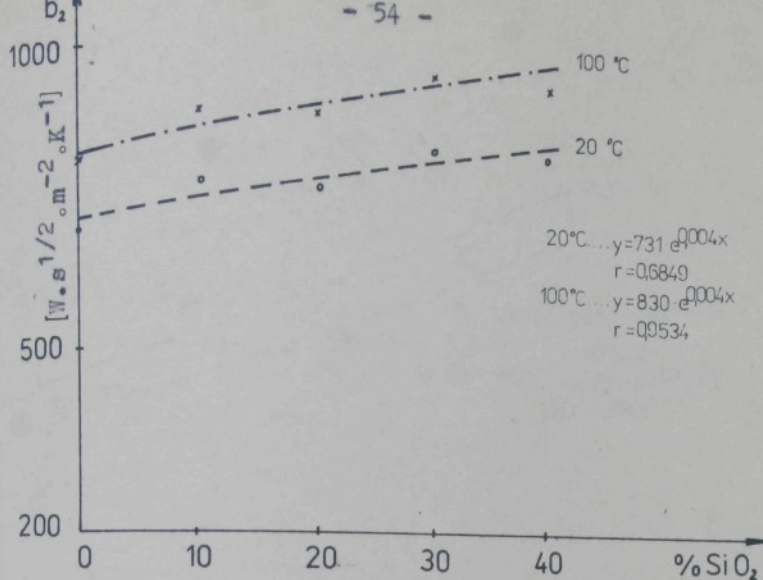
Závislost součinitele b_2 alabastrové sádry na množství příměsi Al_2O_3



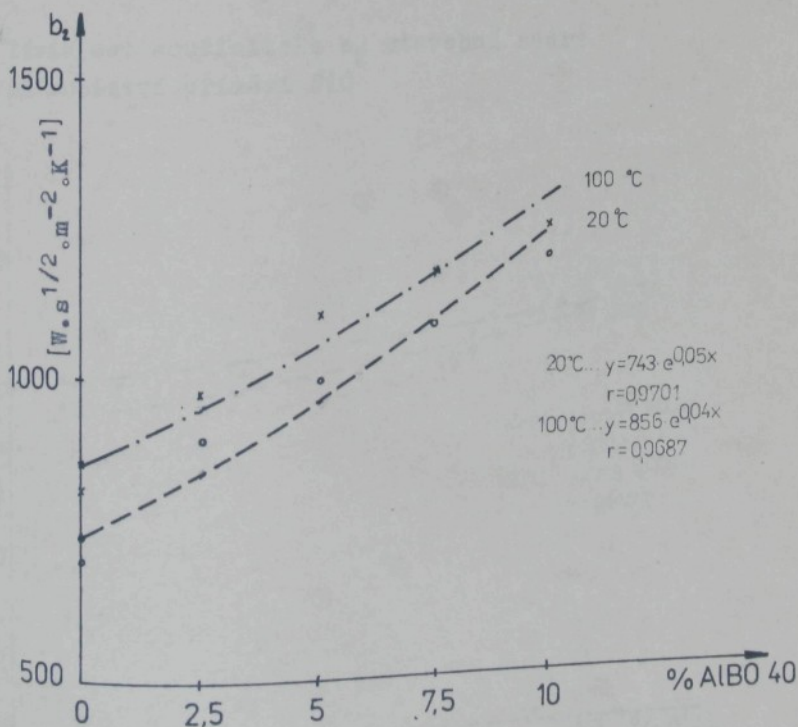
Závislost součinitele b_2 sádry Hartgips
na množství příměsi SiC



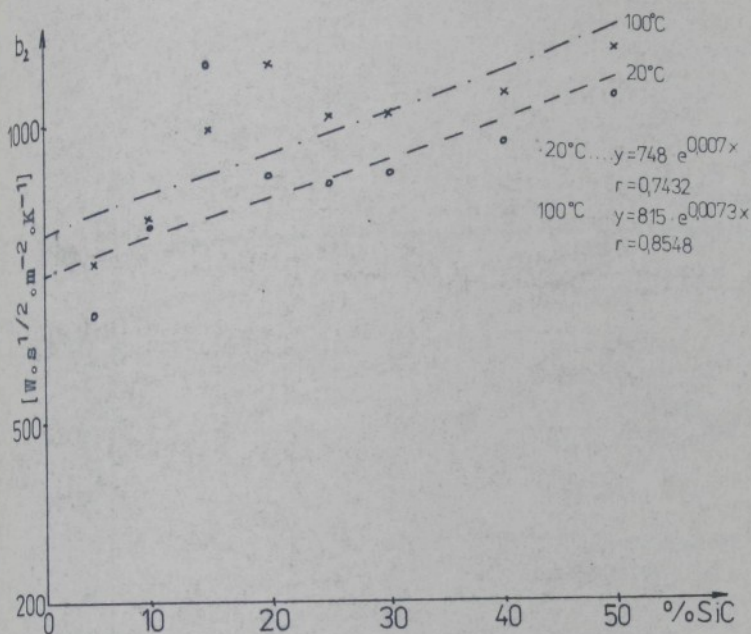
Závislost součinitele b_2 sádry Hartgips
na množství příměsi Al_2O_3



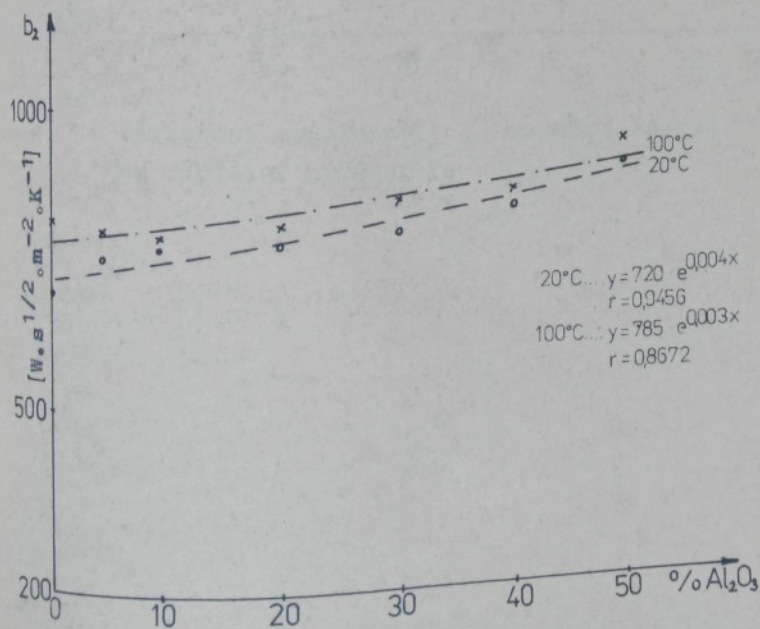
Závislost součinitele b_2 stavební sádky na množství příměsi SiO_2



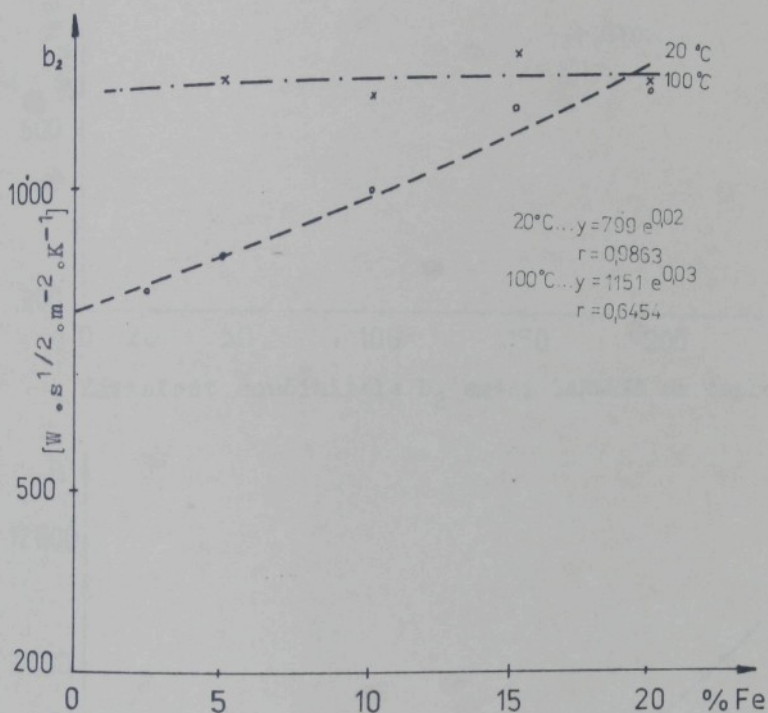
Závislost součinitele b_2 stavební sádky na množství příměsi $AlBO_{40}$



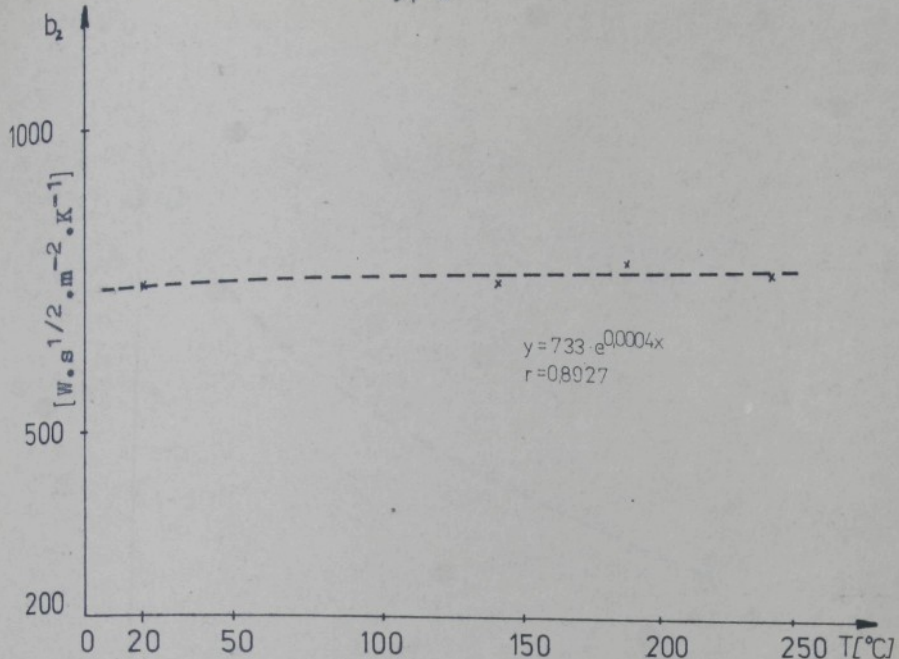
Závislost součinitele b_2 stavební sádky
na množství příměsi SiC



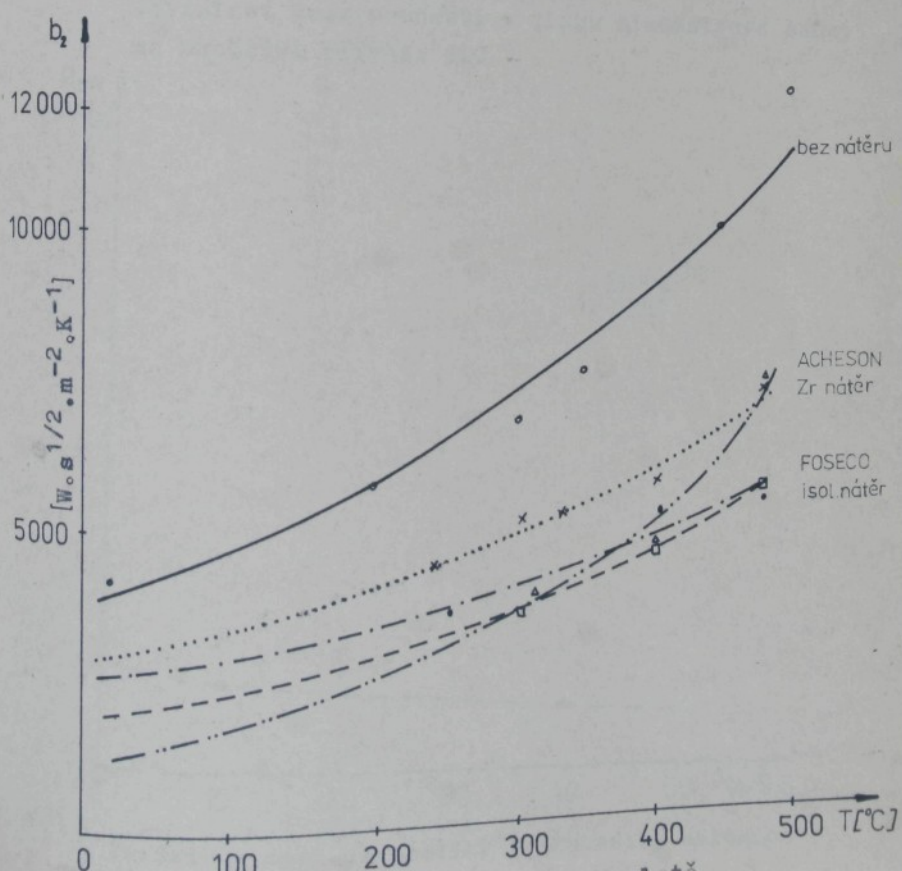
Závislost součinitele b_2 stavební sádky
na množství příměsi Al₂O₃

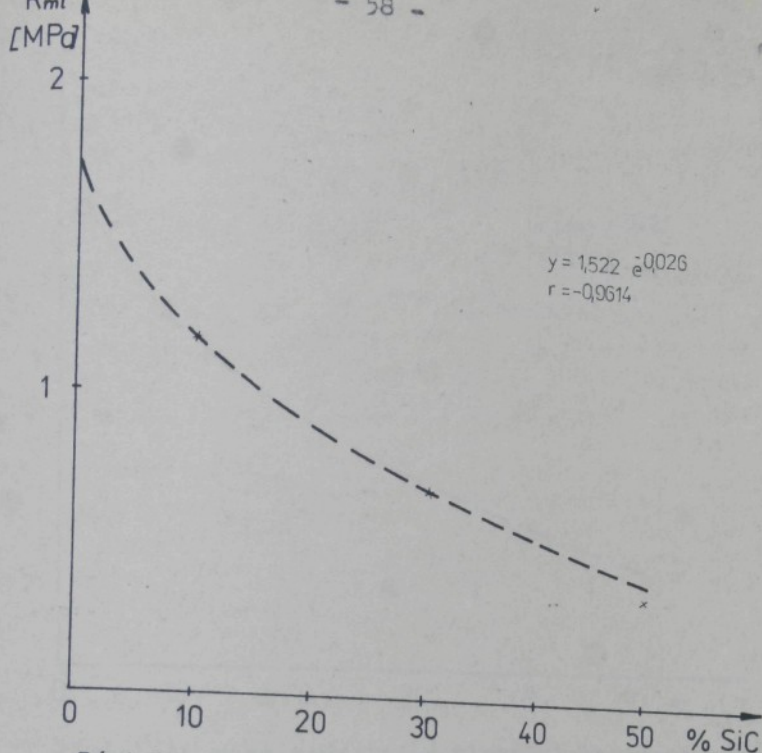


Závislost součinitele b_2 stavební sádky
na množství příměsi Fe

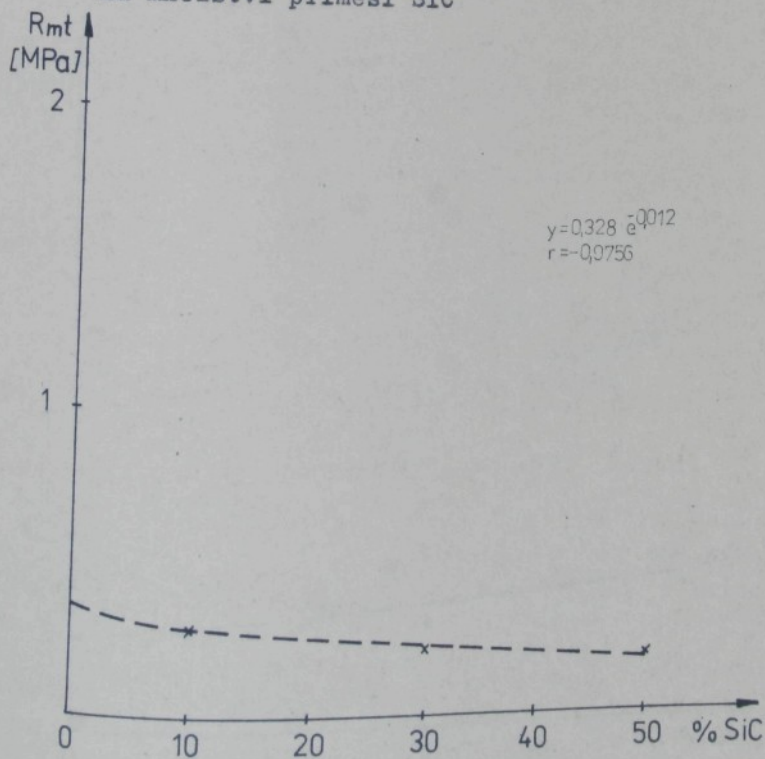


Závislost součinitele b_2 směsi GARASIN na teplotě

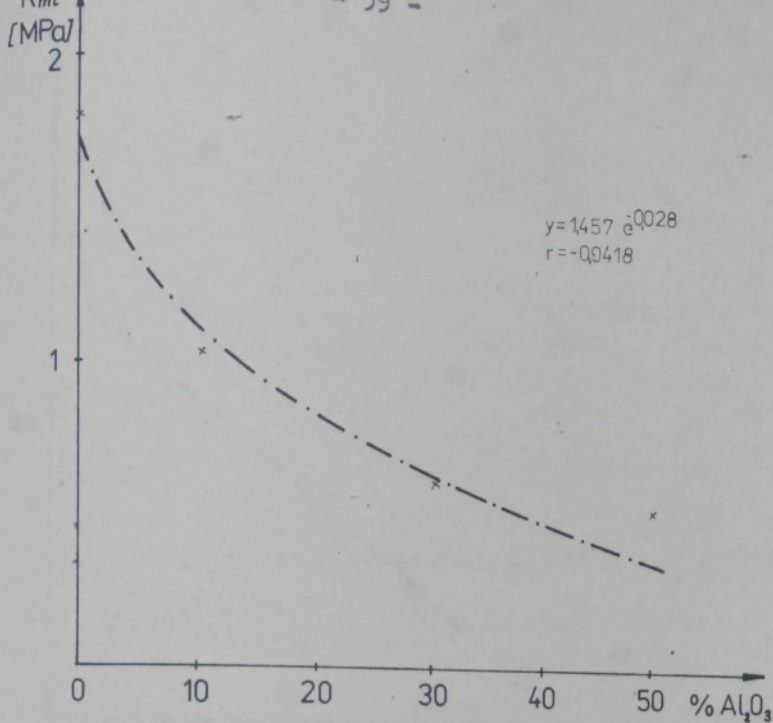




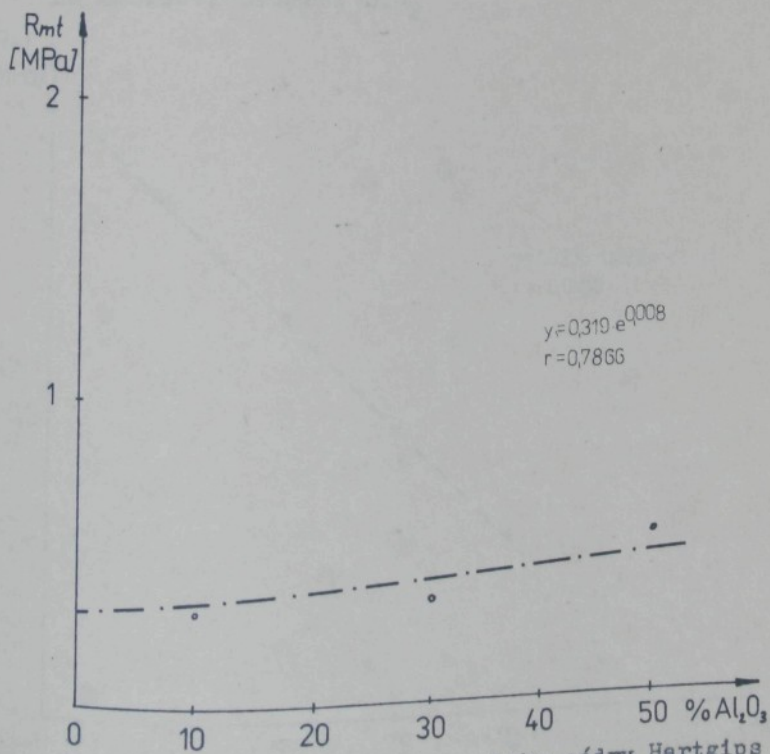
Závislost meze pevnosti v tlaku alabastrové sádky
na množství příměsi SiC



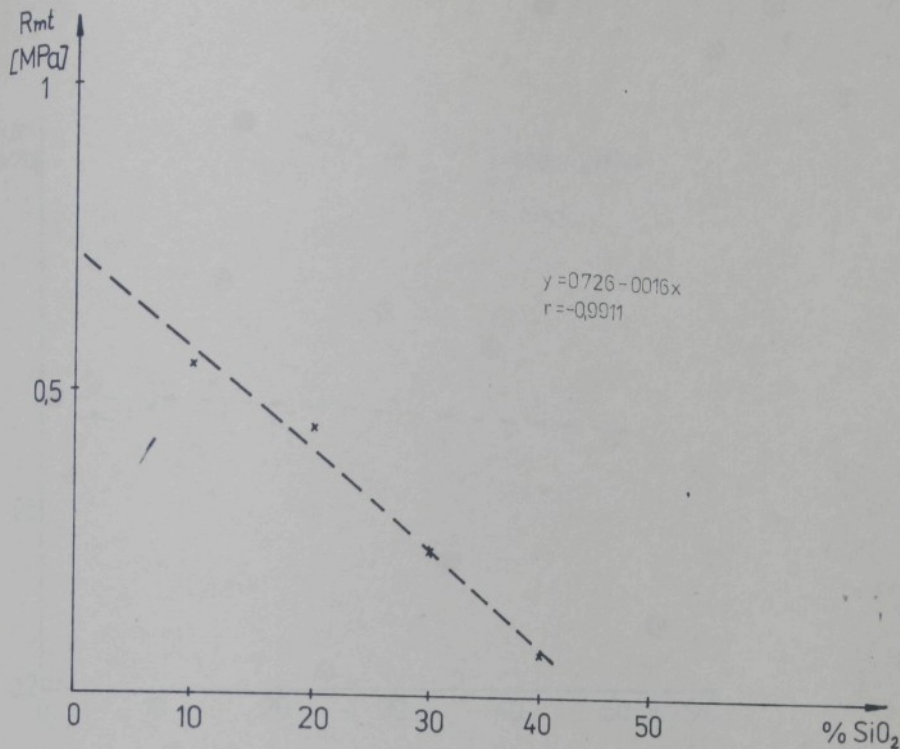
Závislost meze pevnosti v tlaku sádky Hartgips



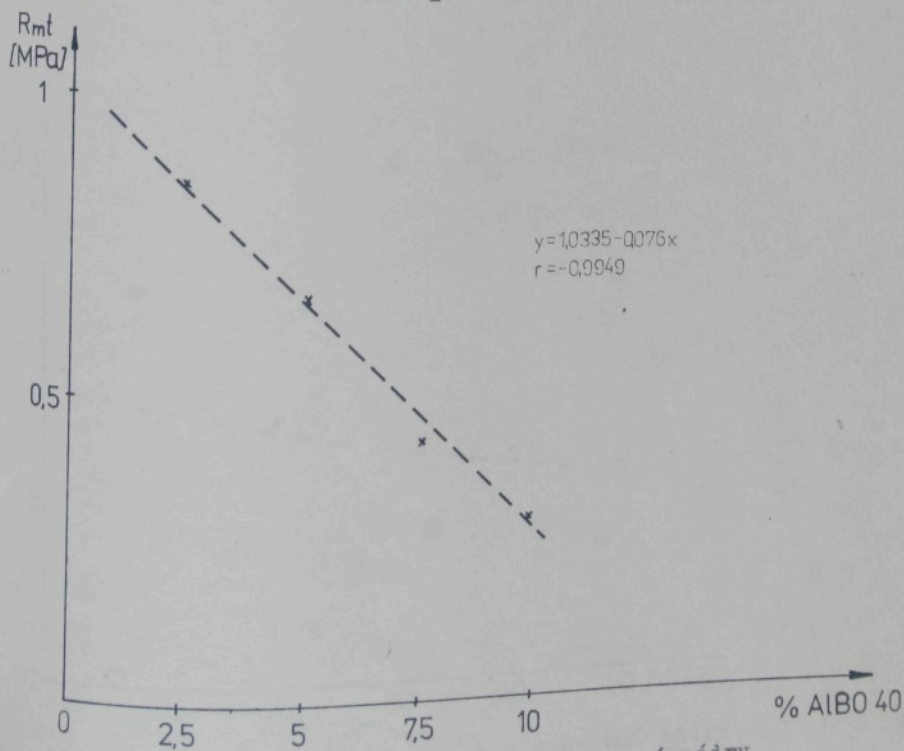
Závislost meze pevnosti v tlaku alabastrové sádry
na množství příměsi Al_2O_3



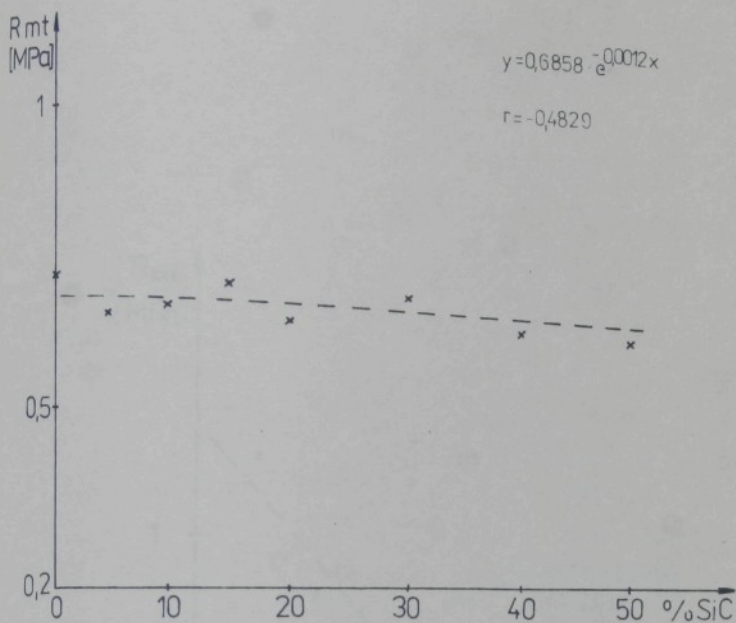
Závislost meze pevnosti v tlaku sádry Hartgips



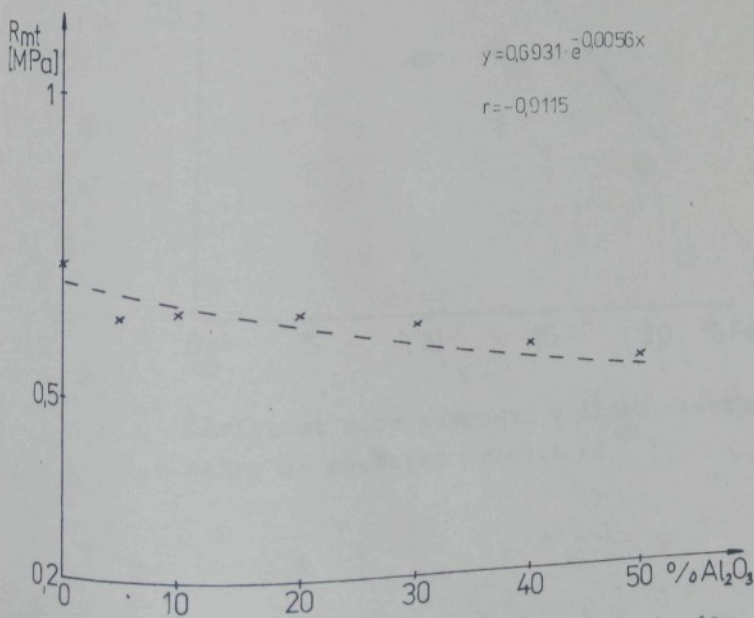
Závislost meze pevnosti v tlaku stavební sádry
na množství příměsi SiO₂



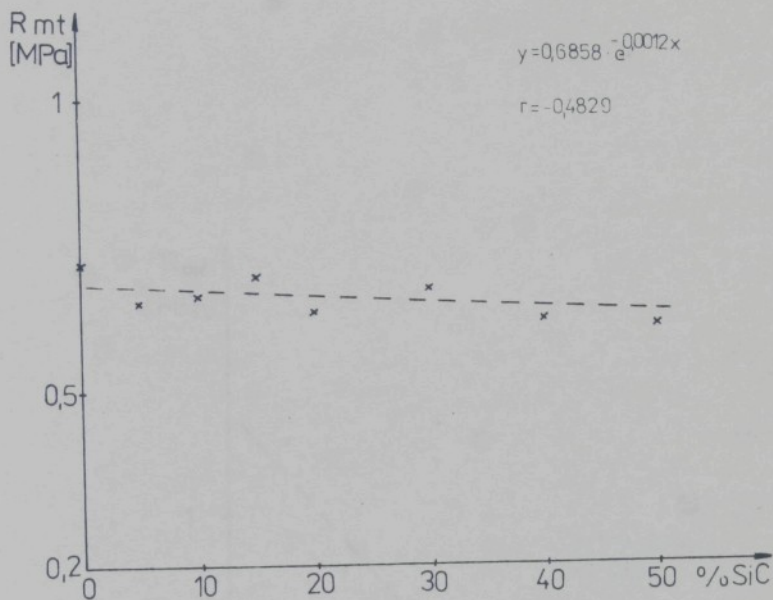
Závislost meze pevnosti v tlaku stavební sádry
na množství příměsi AlBO 40



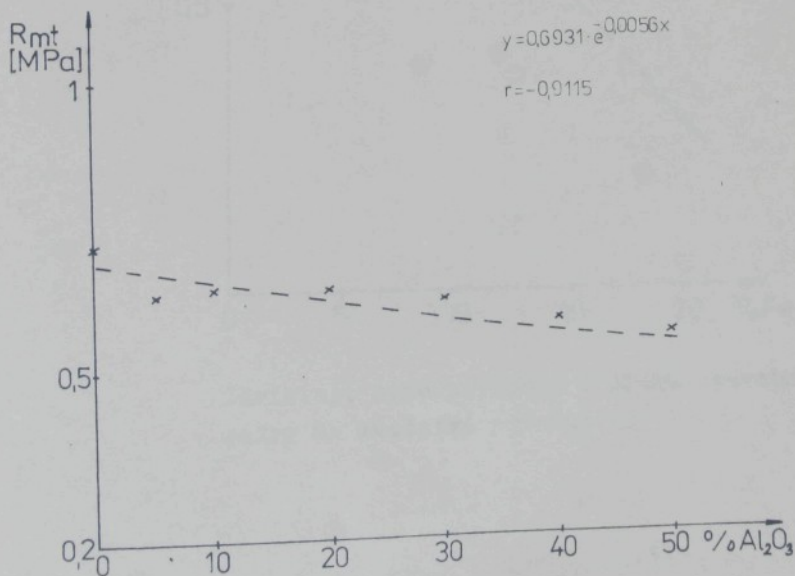
Závislost meze pevnosti v tlaku stavební sádky na množství příměsi SiC



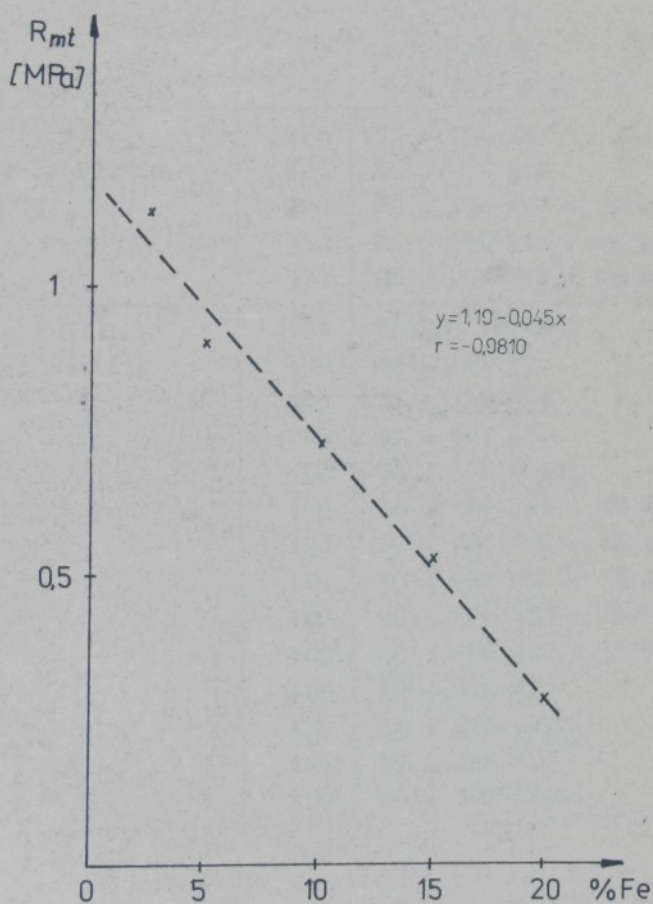
Závislost meze pevnosti v tlaku stavební sádky



Závislost meze pevnosti v tlaku stavební sádky
na množství příměsi SiC



Závislost meze pevnosti v tlaku stavební sádky
na množství příměsi Al₂O₃



Závislost meze pevnosti v tlaku stavební
sádky na množství příměsi Fe

Ověřované kombinace formovacích materiálů při odlévání deskových odlitků z čistého Al

kovová část formy	T _{2poč} [°C]	sádrová část formy	T _{2poč} [°C]
ocel ČSN 11 373 + nástřík ZrO ₂	150	Garasin	150
	20	SS + 15% Fe	100
	20	SS + 20% Fe	100
	20	SS + 50% SiC	100
	20	SS + 2,5% AlBO 40	100
ocel ČSN 11 373 + nástřík F4 FOSECO Dycote 39	320	SS + 10% Fe	20
	320	SS + 15% SiC	20
	320	SS + 15% SiC + 1% AlBO	20
	320	SS + 20% SiC + 1% AlBO	20
	320	SS + 25% SiC + 1% Fe	20
ocel ČSN 11 373 + isolační nástřík	400	GLORIA special	20
	400	SS + 10% Fe	20
	400	SS + 15% SiC	20
	400	SS + 50% SiC	20
	400	SS + 50% Al ₂ O ₃	20
	400	SS + 15% SiC + 1% AlBO	20
	400	SS + 20% SiC + 1% AlBO	20
	400	SS + 49% SiC + 1% AlBO	20
	400	SS + 25% SiC + 1% Fe	20
	400	SS + 50% SiC + 3% Fe	20
	400	AS + 50% SiC	20
	400	AS + 50% Al ₂ O ₃	20
	400	HG + 50% SiC	20
	400	HG + 50% Al ₂ O ₃	20

Pozn. : SS ... stavební sádra
AS ... Modelgips (alabastrová sádra)
HG ... Hartgips

Eureka: The Solver, Version 1.0
Saturday April 9, 1988, 2:55 am.
Name of input file: C:\USR\SIMON\AS+50%SiC

$f(x) := a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$
 $f(0) = 119$
 $f(3) = 131$
 $f(6.5) = 144$
 $f(10) = 143$
 $f(13.5) = 136$
 $f(17) = 129$
 $f(20) = 118$
\$ substlevel=0

Solution:

Variables	Values
a	= .0070792773
b	= -.45795547
c	= 6.3230630
d	= 118.22830

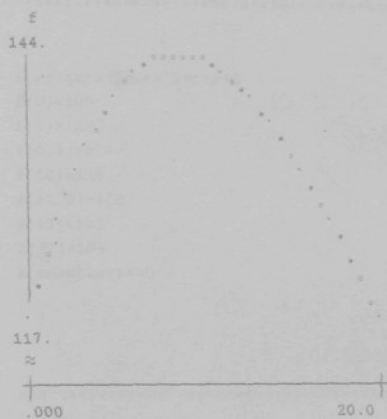
Maximum error is 2.2670319

List of function values.

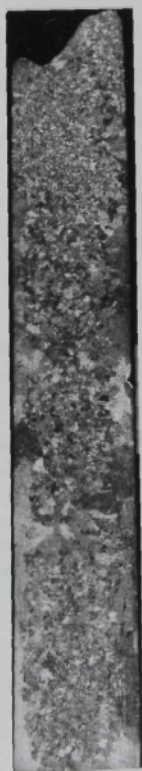
f

x	f(x)
3.0000000	133.26703
6.5000000	141.92374
10.000000	142.74266
13.500000	137.54494
17.000000	128.15173
20.500000	116.38416

Eureka: The Solver, Version 1.0 Page 2
Saturday April 9, 1988, 2:55 am.
Name of input file: C:\USR\SIMON\AS+50%SiC



sádrová směs AS + 50% SiC



kovová forma + isolační nástřík

Eureka: The Solver, Version 1.0
Saturday April 9, 1988, 2:56 am.
Name of input file: C:\USR\SIMON\AS+50%A1 0
*****²3*****

f(x):=a*x³+b*x²+c*x+d
f(0)=100
f(3)=113
f(6.5)=126
f(10)=124
f(13.5)=118
f(17)=113
f(20)=104
\$ subatlevel=0

Solution:

Variables		Values
a	=	.0095501045
b	=	-.51121808
c	=	6.6531972
d	=	99.392670

Maximum error is 2.3378144

List of function values.

f

x	f(x)
3.0000000	115.00915
6.5000000	123.66219
10.000000	124.35294
13.500000	119.53818
17.000000	111.67466
20.500000	103.21916

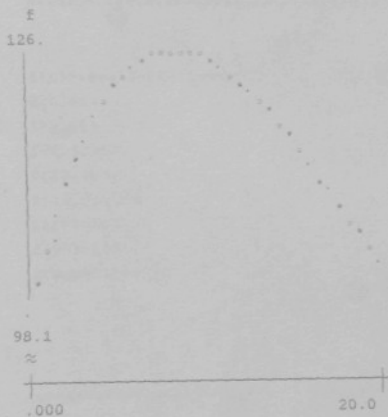
Eureka: The Solver, Version 1.0

Page 2

Saturday April 9, 1988, 2:56 am.

Name of input file: C:\USR\SIMON\AS+50%Al O

*****²5*****



sádrová směs AS + 50% Al_2O_3



kovová forma + isolační nástřik

Eureka: The Solver, Version 1.0

Saturday April 9, 1988, 2:57 am.

Name of input file: C:\USR\SIHON\SS+50%SiC

$f(x) := a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$

$f(0) = 66$

$f(3) = 63$

$f(6.5) = 90$

$f(10) = 111$

$f(13.5) = 108$

$f(17) = 105$

$f(20) = 100$

\$ substlevel=0

Solution:

Variables	Values
a	= -.0036367566
b	= -.11618401
c	= 5.4249097
d	= 66.099627

Maximum error is 5.9064338

List of function values.

f

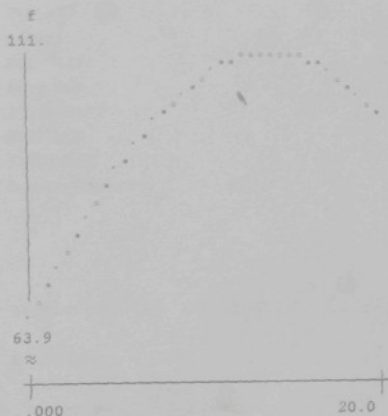
x	f(x)
3.0000000	81.230507
6.5000000	95.454021
10.000000	105.09357
13.500000	109.21359
17.000000	106.87853
20.500000	97.152833

Eureka: The Solver, Version 1.0

Page 2

Saturday April 9, 1988, 2:57 am.

Name of input file: C:\USR\SIHON\SS+50%SiC



kovová forma + izolační nástřik



sádrová směs SS + 50% SiC

Eureka: The Solver, Version 1.0
Saturday April 9, 1988, 2:58 am.
Name of input file: C:\USR\SIMON\SS+50%AI O

*****²3*****

$f(x) := a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$
f(0)=73
f(3)=79
f(6.5)=82
f(10)=85
f(13.5)=57
f(17)=45
f(20)=20
\$ substlevel=0

Solution:

Variables	Values
a	= .0029982103
b	= -.40610423
c	= 4.3365395
d	= 71.812665

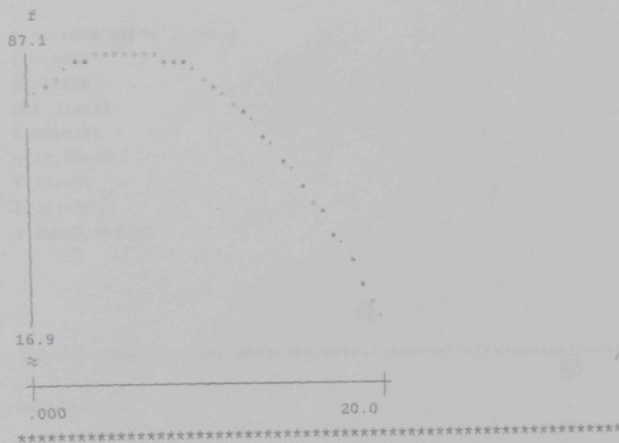
Maximum error is 7.4341528

List of function values.

f

x	f(x)
3.0000000	81.248297
6.5000000	83.665651
10.000000	77.565847
13.500000	63.720174
17.000000	42.899921
20.500000	15.876378

Eureka: The Solver, Version 1.0 Page 2
Saturday April 9, 1988, 2:58 am.
Name of input file: C:\USR\SIMON\SS+50%Al O
***** 8 *****



sádrová směs SS + 50% Al_2O_3



kovová forma + izolační nástřík


```
*****
Eureka: The Solver, Version 1.0
Saturday April 9, 1988, 2:59 AM.
Name of input file: C:\USR\SIMON\HG+50%SiC
*****
```

```
f(x):=a*x^3+b*x^2+c*x+d
f(0)=100
f(3)=108
f(6.5)=114
f(10)=115
f(13.5)=97
f(17)=89
f(20)=75
$ substlevel=0
```

```
*****
```

Solution:

Variables		Values
a	=	.0077039211
b	=	-.46736188
c	=	5.0643254
d	=	98.987408

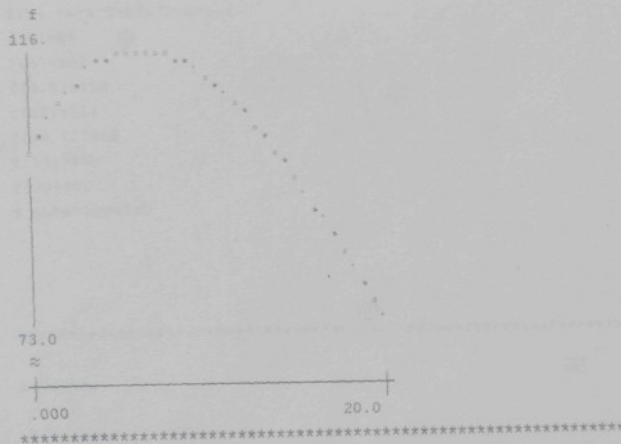
Maximum error is 4.4016044

List of function values.

f

x	f(x)
3.0000000	110.18213
6.5000000	114.27517
10.000000	110.59840
13.500000	101.13363
17.000000	87.862722
20.500000	72.767493

Eureka: The Solver, Version 1.0
Saturday April 9, 1988, 2:59 am. Page 2
Name of input file: C:\USR\SIMON\HG+50%SiC



sádrová směs HG + 50% SiC



kovová forma + isolační nástřik

Eureka: The Solver, Version 1.0
Saturday April 9, 1988, 2:59 am.
Name of input file: C:\USR\SIMON\HG+50\A1 0

$f(x) := a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$
 $f(0) = 86$
 $f(3) = 102$
 $f(6.5) = 118$
 $f(10) = 114$
 $f(13.5) = 109$
 $f(17) = 100$
 $f(20) = 90$
\$ substlevel=0

Solution:

Variables	Values
a	= .011771086
b	= -.63101058
c	= 8.1556168
d	= 85.290326

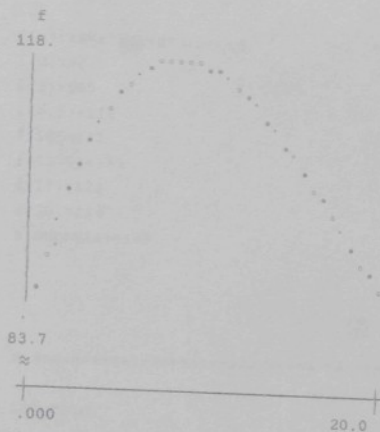
Maximum error is 3.1257267

List of function values.

f

x	f(x)
3.000000	104.39590
6.500000	114.87427
10.000000	115.51652
13.500000	109.35076
17.000000	99.405099
20.500000	88.707650

 Eureka: The Solver, Version 1.0
 Saturday April 9, 1988, 2:59 am. Page 2
 Name of input file: C:\USER\SIMON\HG+50%Al O



sádrová směs HG + 50% Al_2O_3



kovová forma + isolační nástřík

Eureka: The Solver, Version 1.0
Saturday April 9, 1988, 3:00 am.
Name of input file: C:\USR\SIMON\47SS+SiC+3Fe

$f(x) := a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$
f(0)=90
f(3)=105
f(6.5)=119
f(10)=132
f(13.5)=129
f(17)=124
f(20)=114
\$ substlevel=0

Solution:

Variables	Values
a	= -.0028456249
b	= -.18767372
c	= 6.0937705
d	= 89.397606

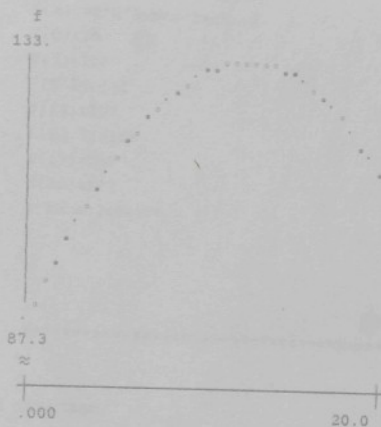
Maximum error is 3.2776858

List of function values.

f

x	f(x)
3.0000000	105.91302
6.5000000	120.29642
10.000000	128.72231
13.500000	130.45867
17.000000	124.77344
20.500000	110.93461

 Eureka: The Solver, Version 1.0
 Saturday April 9, 1988, 3:00 am. Page 2
 Name of input file: C:\USR\SIMON\47SE+SiC+3Fe



kovová forma + isolační nástřík



sádrová směs SS + 50% SiC + 3% Fe


```

*****
Eureka: The Solver, Version 1.0
Saturday April 9, 1988, 3:01 am.
Name of input file: C:\USR\SIHON\50SS+49SiC+1AlBo
*****

```

```

f(x):=a*x^3+b*x^2+c*x+d
f(0)=95
f(3)=118
f(6.5)=131
f(10)=157
f(13.5)=160
f(17)=159
f(20)=152
$ substlevel=0

```

```

*****

```

Solution:

Variables	Values
a	= -.0080648162
b	= -.045409371
c	= 6.9274587
d	= 95.427112

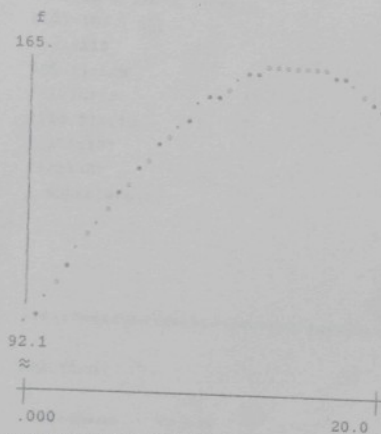
Maximum error is 5.3222473

List of function values.

f

x	f(x)
3.0000000	115.58305
6.5000000	136.32225
10.000000	152.09595
13.500000	160.82947
17.000000	160.44816
20.500000	148.87733

 Eureka: The Solver, Version 1.0
 Saturday April 9, 1988, 3:01 am. Page 2
 Name of input file: C:\USR\SINOW\50SS+49SiC+1AlBo



kovová forma + isolační nástřik



sádrová směs SS + 49% SiC + 1% Al₂O₃ 40

Eureka: The Solver, Version 1.0
Saturday April 9, 1988, 3:27 am.
Name of input file: C:\USR\SIMON\GLORIA

$f(x) := a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$
 $f(0) = 102$
 $f(3) = 115$
 $f(6.5) = 128$
 $f(10) = 123$
 $f(13.5) = 112$
 $f(17) = 107$
 $f(20) = 97$
\$ substlevel=0

Solution:

Variables	Values
a	= .014658304
b	= -.67422579
c	= 7.4437547
d	= 101.12940

Maximum error is 2.9466936

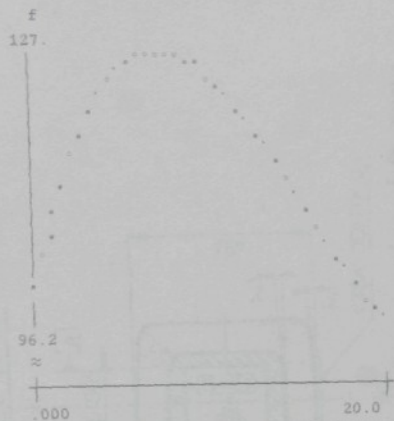
List of function values.

f

x	f(x)
3.0000000	117.78841
6.5000000	125.05331
10.000000	122.80268
13.500000	114.80737
17.000000	104.83823
20.500000	96.666106

Eureka: The Solver, Version 1.0
Saturday April 9, 1988, 3:27 am.

Page 2



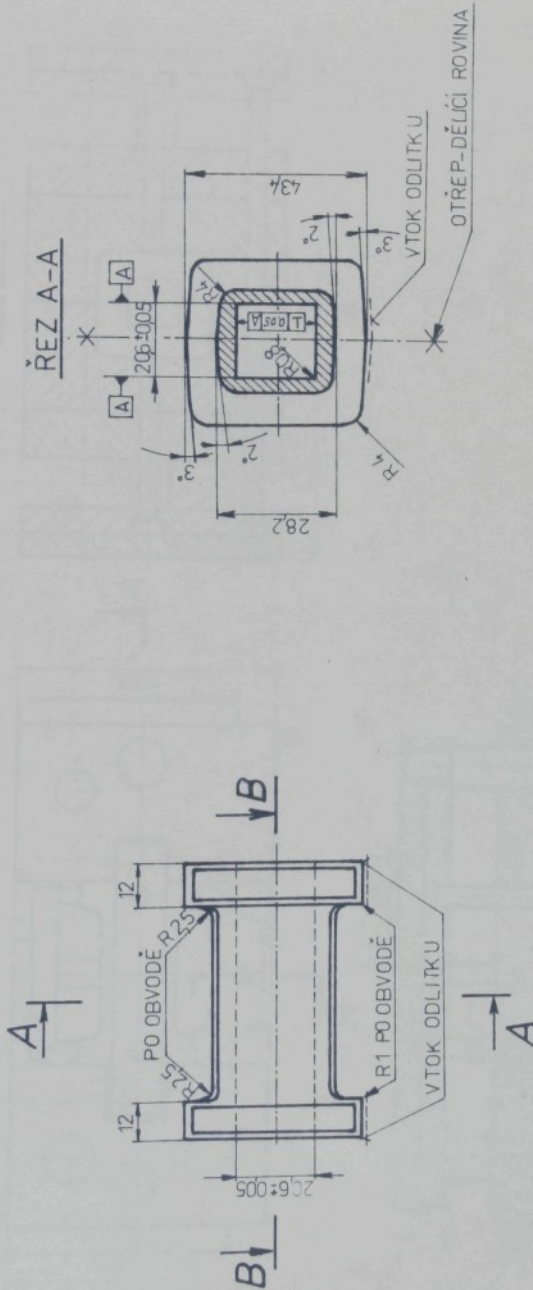
sádrová směs GLORIA special



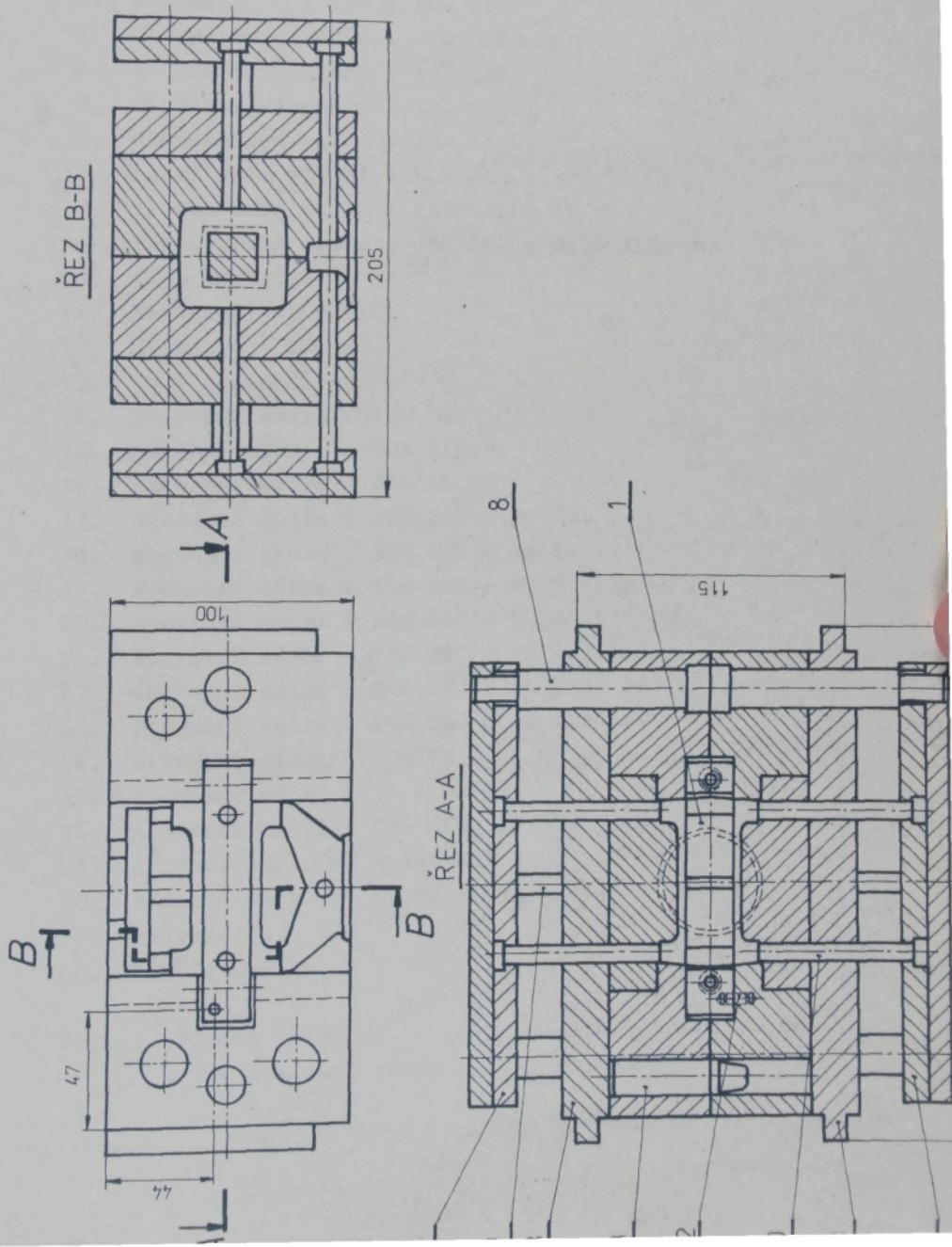
kovová forma + isolační nástřík

Odlitek "těleso dolařovacího členu"

~ 15 (~ 15)



Kovová forma pro odlitek "těleso doladovacího členu"



Seznam sáder a sádrových směsí s různými aditivy ověřovaných
poloprovozním odléváním odlitků na nízkotlakém lisícím zařízení

1. 100% alabastrová sádra
2. alabastrová sádra + 10% SiC
3. alabastrová sádra + 30% SiC
4. alabastrová sádra + 50% SiC
5. alabastrová sádra + 10% Al_2O_3
6. alabastrová sádra + 30% Al_2O_3
7. alabastrová sádra + 50% Al_2O_3
8. alabastrová sádra + 2,5% ALBO 40
9. alabastrová sádra + 15% SiC + 0,5% ALBO 40
10. 100% Hartgips
11. Hartgips + 50% SiC
12. Hartgips + 50% Al_2O_3
13. 100% stavební sádra
14. stavební sádra + 15% SiC
15. stavební sádra + 50% SiC
16. stavební sádra + 50% Al_2O_3
17. stavební sádra + 25% SiC + 3% Fe
18. stavební sádra + 50% SiC + 3% Fe
19. stavební sádra + 15% SiC + 0,5% ALBO 40
20. stavební sádra + 25% SiC + 0,5% ALBO 40
21. stavební sádra + 15% SiC + 1% ALBO 40
22. stavební sádra + 20% SiC + 1% ALBO 40
23. stavební sádra + 49% SiC + 1% ALBO 40
24. stavební sádra + 20% Fe
25. stavební sádra + 5% ALBO 40
26. stavební sádra + 10% ALBO 40
27. sádrová směs "B" + 50% SiC
28. sádrová směs "B" + 50% Al_2O_3
29. sádrová směs "B"
30. GLORIA special

Pozn.: sádrová směs "B" je směs 50% alabastrové sádry
a 50% stavební sádry

Tab. 9.1. Podmínky odlévání, rozměry dutiny a jakost povrchu dutiny zkušebních odlitků

Materiál jádra	Rozměry jaderníku [mm]	Rozměry dutiny odlitku [mm]	Nástřik	Jakost povrchu [μm]		T _{tav} [°C]	T _f [°C]	T _j [°C]	Tlak		Dotlak	
				R _a	R _{max}				[kPa]	[s]	[kPa]	[s]
100% alabastr.sádra	20,7x20,7	20,4 x20,1	ACHESON	2,1	19	659	475	115	12	4	70	12
AS + 10% SiC	20,7x20,7	20,29x20,29	ACHESON	1,175	-	638	338	151	10	3,5	80	12
AS + 30% SiC	20,7x20,7	20,28x20,28	ACHESON	1,85	-	640	378	151	10	3	75	13
AS + 50% SiC	20,7x20,7	20,3 x20,3	isolační	2,7	25	660	400	130	5	3	80	25
AS + 50% SiC	20,7x20,7	20,29x20,29	ACHESON	2,27	-	640	340	151	10	3	70	12
AS + 50% SiC	20,7x20,7	20,28x20,28	ACHESON	2,8	18	659	475	115	12	4	70	12
AS + 10% Al ₂ O ₃	20,7x20,7	20,25x20,25	ACHESON	1,4	-	638	320	151	10	3	75	13
AS + 30% Al ₂ O ₃	20,7x20,7	20,25x20,27	ACHESON	1,8	-	640	394	151	10	3	70	12
AS + 50% Al ₂ O ₃	20,7x20,7	20,31x20,31	isolační	3	20	660	400	130	5	3	80	25
AS + 50% Al ₂ O ₃	20,7x20,7	20,29x20,29	ACHESON	3,1	-	640	375	151	10	3	80	15
AS + 50% Al ₂ O ₃	20,7x20,7	20,25x20,25	ACHESON	3,6	18,5	659	475	115	12	4	70	12
AS+15%SiC+Q,5%AlB ^o	20,7x20,7	20,15x20,15	ACHESON	1,8	-	640	340	151	10	2,5	70	12
AS + 2,5% AlB ^o 40	20,7x20,7	20,1 x20,15	ACHESON	1,225	-	640	342	151	10	3	70	12
100% Hartgips	20,7x20,7	20,22x20,22	ACHESON	4,1	21	659	475	115	12	4	70	12
HG + 50% SiC	20,7x20,7	20,2 x20,2	isolační	1,7	10	660	460	130	5	3	80	25
HG + 50% SiC	20,7x20,7	20,2 x20,2	ACHESON	2,55	14	659	475	115	12	4	70	12
HG + 50% Al ₂ O ₃	20,7x20,7	20,3 x20,27	isolační	2,1	16	660	380	130	5	3	80	25
HG + 50% Al ₂ O ₃	20,7x20,7	20,13x20,13	ACHESON	4,25	21	659	475	115	12	4	70	12
GLORIA special	20,7x20,7	20,53x20,55	ACHESON	2,6	-	641	359	151	10	2,5	70	10

Tab. 9.1. pokračování

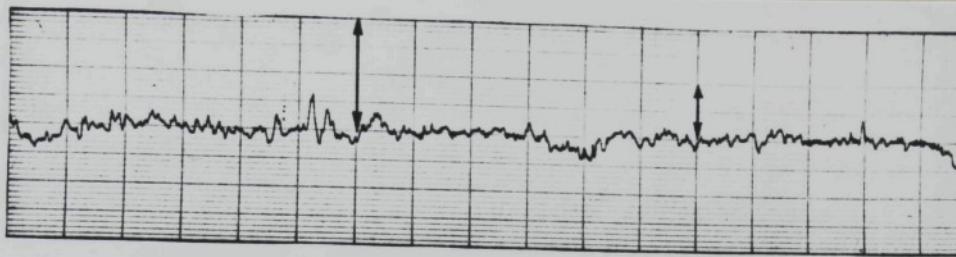
Materiál jádra	Rozměry jádrovníku [mm]	Rozměry dutiny odlitku [mm]	Nástřík	Jakost povrchu [μm]		T _{tav} [°C]	T _f [°C]	T _j	Tlak		Dotlak	
				R _a	R _{max}				[kPa]	[s]		
100% stavební sádra	20, 7x20, 7	20, 25x20, 25	ACHESON	2,1	18	659	475	115	12	4	70	12
SS + 15% SiC	20, 7x20, 7	20, 0 x20, 0	FOSECO	2	8	660	352	94	10	3	80	8
SS + 15% SiC	20, 7x20, 7	20, 0 x20, 0	isolační	3	24	635	405	88	10	3	80	8
SS + 50% SiC	20, 7x20, 7	20, 2 x20, 2	isolační	1,9	18	660	370	130	5	3	80	25
SS + 50% SiC	20, 7x20, 7	20, 15x20, 15	FOSECO	3,5	18,5	660	240	65	10	3	80	8
SS + 50% SiC	20, 7x20, 7	20, 15x20, 15	isolační	5,3	35	635	380	90	10	3	80	8
SS + 50% Al ₂ O ₃	20, 7x20, 7	20, 1 x20, 1	isolační	3,3	21	660	380	130	5	3	80	25
SS + 5% ALBO 40	20, 7x20, 7	20, 1 x20, 07	isolační	3,7	19	635	378	105	10	3	80	8
SS + 5% ALBO 40	20, 7x20, 7	20, 1 x20, 1	FOSECO	5,1	35	628	367	90	10	3	80	8
SS + 10% ALBO 40	20, 7x20, 7	20, 1 x20, 1	isolační	2,4	13	635	407	86	10	3	80	8
SS + 10% ALBO 40	20, 7x20, 7	20, 1 x20, 1	FOSECO	6	35	628	367	90	10	3	80	8
SS + 20% Fe	20, 7x20, 7	20, 1 x20, 1	isolační	5,6	35	635	385	95	10	3	80	8
SS + 20% Fe	20, 7x20, 7	20, 15x20, 1	FOSECO	1,4	8	628	365	87	10	3	80	8
SS + 50% SiC + 3% Fe	20, 7x20, 7	20, 2 x20, 2	isolační	1,6	7	660	385	130	5	3	80	25
SS + 25% SiC + 3% Fe	20, 7x20, 7	20, 2 x20, 2	isolační	4	23	635	375	100	10	3	80	8
SS + 25% SiC + 3% Fe	20, 7x20, 7	20, 2 x20, 2	FOSECO	1,4	7,5	628	368	91	10	3	80	8
SS+25%SiC+0,5%ALBO	20, 7x20, 7	20, 2 x20, 2	isolační	2,5	15	635	369	97	10	3	80	8
SS+25%SiC+0,5%ALBO	20, 7x20, 7	20, 2 x20, 2	FOSECO	1,0	10	628	375	92	10	3	80	8
SS+15%SiC+0,5%ALBO	20, 7x20, 7	19, 95x20, 0	isolační	1,1	11	635	369	97	10	3	80	8

Tab. 9.1. pokračování

Materiál jádra	Rozměry jádrovníku [mm]	Rozměry dutiny odlitku [mm]	Nástřik	Jakost povrchu [μm]		T _{av} [°C]	T _f [°C]	T _j [°C]	Tlak		Dotlak	
				R _a	R _{max}				[kPa]	[s]		[kPa][s]
SS+15%SiC+0,5%AlB0	20,7x20,7	20,0 x20,0	POSECO	1,6	11	660	230	65	10	3	80	8
SS+15%SiC+1%AlB0 40	20,7x20,7	20,0 x20,0	isolační	3,5	17	635	407	86	10	3	80	8
SS+15%SiC+1%AlB0 40	20,7x20,7	20,0 x20,0	POSECO	2,5	10,5	628	390	93	10	3	80	8
SS+20%SiC+1%AlB0 40	20,7x20,7	20,05x20,0	isolační	3,5	25	635	380	97	10	3	80	8
SS+20%SiC+1%AlB0 40	20,7x20,7	20,05x20,05	POSECO	2,5	16	628	412	84	10	3	80	8
SS+49%SiC+1%AlB0 40	20,7x20,7	20,15x20,15	isolační	1,9	18	660	390	130	5	3	80	25
směs"B"+50% SiC	20,7x20,7	20,2 x20,25	isolační	2,2	11	660	400	130	5	3	80	25
směs"B"+50% SiC	20,7x20,7	20,3 x20,3	ACHESON	2,6	21	659	475	115	12	4	70	12
směs"B"+50% Al ₂ O ₃	20,7x20,7	20,2 x20,2	isolační	2,9	24	660	400	130	5	3	80	25
směs"B"+50% Al ₂ O ₃	20,7x20,7	20,3 x20,3	ACHESON	2,7	24	659	475	115	12	4	70	12
ocel ČSN 19 552	20,6x20,6	20,5 x20,5	isolační	5,9	30	660	370	430	5	3	80	25
ocel ČSN 19 552	20,6x20,6	20,5 x20,5	ACHESON	9	56	659	475	475	12	3,5	70	15

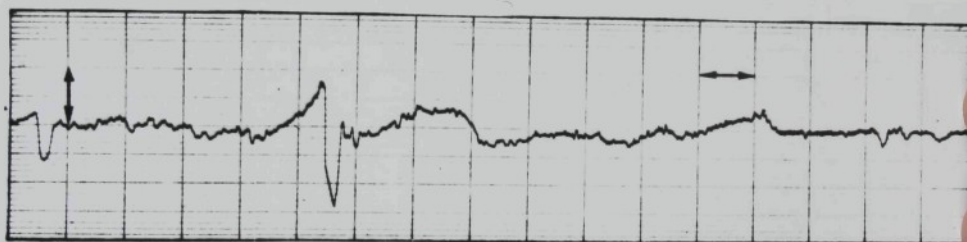
Grafické záznamy jakosti povrchu dutiny některých
zkušebních odlitků

horizontální zvětšení : 1 cm = 300 μm
vertikální zvětšení : 1 cm = 10 μm



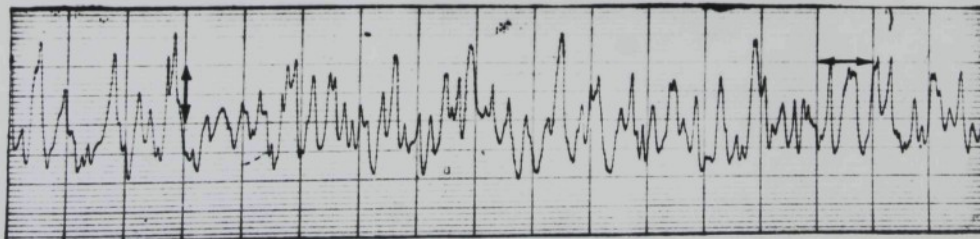
$R_a = 1,9 \mu\text{m}$,

jádro ze směsi 50% stavební sádra + 49% SiC + 1% AlBO 40
teplota jádra : 130°C



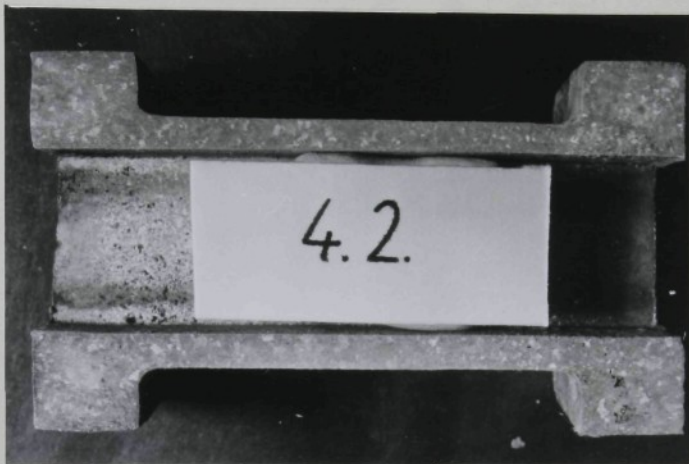
$R_a = 1,9 \mu\text{m}$,

jádro ze směsi 50% stavební sádra + 50% SiC
teplota jádra : 130°C

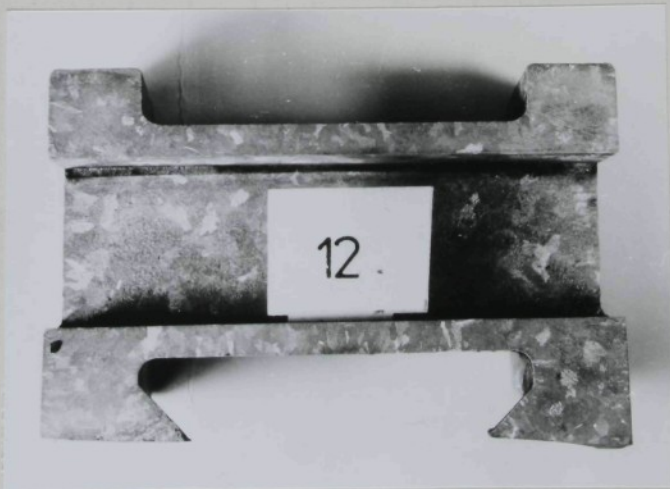


$R_a = 5,9 \mu\text{m}$,

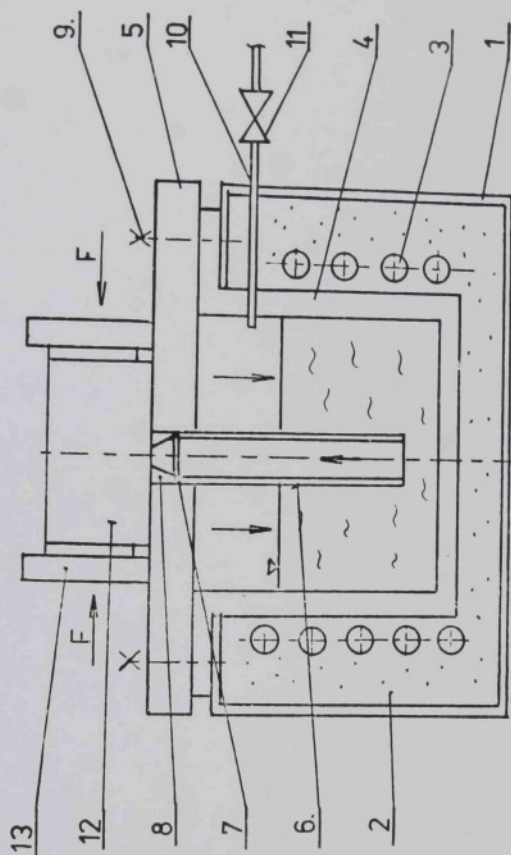
kovové jádro opatřené izolačním nástřikem
teplota jádra : 370°C



Obr. 9.7. Odlitek s mikropórovitostí



Obr. 9.8. Zdravý odlitek



1. plášť pece
2. vyzdívká
3. topné těleso
4. vnitřní plášť pece
5. horní základní deska
6. výtlačná trubice
7. těsnění
8. tryska
9. spojovací šrouby
10. tlaková trubice
11. trojcestný ventil
12. forma
13. přítlačné zařízení formy

Schema nízkotlakého lité