

Vysoká škola strojní a textilní
Liberec

Bezdotykové měření teplot a měření emisivity

Kandidátská dizertační práce

Vědní obor: 39-02-9 termomechanika a mechanika tekutin

Vypracoval: ing. Jan PTÁČEK

Školitel : Doc. ing. Luboš HES, CSc

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Univerzitní knihovna
Voroněžská 1329, Liberec 1
PSČ 461 17

Praha, 1992

U271 S

A N O T A C E

V první části je uveden stručný přehled základních zákonů a vztahů, které mají vliv na bezdotykové měření teplot pomocí infračerveného záření. Na jeho základě je provedeno nové rozdělení, které zahrnuje všechny typy bezdotykových snímačů teploty včetně infračervených zobrazovacích snímačů (termovizí). Při rozdělení je preferován pohled uživatele, s ohledem na snadnější volbu měřící metody a zejména na společnou metodu určování chyby měření pro danou skupinu pyrometrů.

V další části je popsán návrh a realizace zařízení pro měření emisivity technických materiálů v běžných provozních (oxidačních) podmínkách. Byla proměřena emisivita 30 značek ocelí a 5 druhů keramických materiálů. Měření bylo prováděno v rozsahu teplot 550 až 1200 °C, ve spektrální oblasti s efektivní vlnovou délkou cca 0,85 μm . Naměřené hodnoty byly zpracovány metodou lineární regrese do rovnice max. 3. řádu.

Z hodnocení výsledků měření vyplývá, že drsnost povrchu oceli do 50 HRC nemá vliv na emisivitu povrchu oceli. Vliv chemického složení oceli ani jednotlivých prvků na výslednou emisivitu nebylo možno prokázat.

Pro snadnější použití výsledků těchto měření byly materiály s blízkou teplotní závislostí emisivity soustředěny do skupin se společnou teplotní závislostí emisivity - charakteristickou křivkou. Materiály byly zařazeny do 7 skupin, pět skupin je vyhrazeno ocelím a dvě keramickým materiálům.

Získané výsledky měření jsou dobrým podkladem pro zpřesnění bezdotykového měření teplot, zejména v metalurgických a chemických provozech a těžkém strojírenství. Provedené rozdělení pyrometrů umožňuje uživateli snadnější orientaci o vlastnostech a určení daného typu pyrometru.

O b s a h

Důležité upozornění ke struktuře práce

Seznam použitých symbolů a indexů 1

Seznam obrázků, tabulek a grafů 3

I.	<u>ÚVOD - SOUČASNÝ STAV</u>	6
II.	<u>CÍL PRÁCE</u>	8
III.	<u>ZVOLENÁ METODA ZPRACOVÁNÍ</u>	10
1.0	ZÁKLADNÍ ZÁKONY ZÁŘENÍ.	10
1.1	Tepelné záření.	10
1.2	Záření těles.	13
1.2.1	Planckův zákon.	13
1.2.2	Wienův zákon.	15
1.2.3	Stefan-Boltzmanův zákon.	16
1.3	Modely černých těles.	16
2.0	SNÍMAČE PRO BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLOT.	17
2.1	Subjektivní pyrometry.	20
2.1.1	Jasové pyrometry.	20
2.1.2	Barvové pyrometry.	21
2.2	Energetické pyrometry.	22
2.2.1	Monochromatické pyrometry.	22
2.2.2	Pásmové pyrometry.	22
2.2.3	Pyrometry celkového záření.	24
2.3	Poměrové pyrometry.	24
2.4	Zobrazovací metody.	25
3.0	VLASTNOSTI LÁTEK	25
3.1	Emisivita	25
3.2	Chyby způsobené emisivitou povrchu tělesa.	26
3.2.1	Monochromatické a pásmové pyrometry.	27
3.2.2	Pyrometry celkového záření.	28

4.0	MĚŘENÍ EMISIVITY	29
4.1	Metody měření emisivity	29
4.2	Návrh a ověření měřicí metody	31
4.3	Zařízení pro ověření navržené metody	34
4.3.1	Černý zářič	34
4.3.2	Vytápěný vzorek	34
4.3.3	Optická soustava	36
4.3.4	Vyhodnocovací část	37
4.4	Ověření navržené metody	37
5.0	INOVOVANÁ MĚŘICÍ METODA	38
5.1	Zařízení pro ověření inovované metody	41
5.2	Měření na zkušebním přípravku	42
6.0	ROZBOR VÝSLEDKŮ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ EMISIVITY	45
6.1	Vliv drsnosti měřeného povrchu	45
6.2	Vliv způsobu zpracování na emisivitu oceli	83
6.3	Vliv chemického složení oceli na její emisivitu	85
IV.	<u>VÝSLEDKY DIZERTACE JEJICH VYUŽITÍ V PRAXI</u>	89
7.0	CHARAKTERISTICKÉ KŘIVKY EMISIVIT	89
8.0	ZAŘÍZENÍ PRO POLOAUTOMATICKÉ MĚŘENÍ EMISIVITY	99
V.	<u>SOUHRN A ZHODNOCENÍ</u>	105
	Použitá literatura	109
	Vlastní publikace	113

Důležité upozornění ke struktuře práce

Pro získání přehledu o původnosti kapitol jsou převzaté části vytištěny v hustším řádkování.

Vlastní publikace mají v textu i v seznamu před číslem publikace pásmeno P např. [P127].

Seznam použitých symbolů indexů a označení

- a - absorbtance $a = E_a/E$,
a(z) - konstanta
 b_1 - Wienova konstanta pro výpočet maximální monochromatické intenzity záření při teplotě T a vlnové délce
 $(b_1 = 1,286 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{K}^{-5})$
c - rychlost šíření světla ve vakuu $(c = 2,9397925 \cdot 10^8 \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$
 c_1 - 1. Planckova vyzařovací konstanta
 $(c_1 = 2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot h = 3,7441832 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2})$
 c_2 - 2. Planckova vyzařovací konstanta
 $(c_2 = c \cdot h \cdot k^{-1} = 1,438786 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K})$
d - průměr otvoru ve vrcholu dutiny (zaměřovací otvor) (m)
h - Planckova konstanta $(h = (6,626176 \pm 0,000036) \cdot 10^{-34}) \text{ J} \cdot \text{s})$
k - Boltzmanova konstanta
 $(k = R/N_A = (1,380662 \pm 0,000044) \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1})$
p - transmittance, $p = E_p/E$
r - reflektance, $r = E_r/E$,
s - vzdálenost okraje dutiny od měřeného povrchu (m)
t - teplota ($^{\circ}\text{C}$)
 Δt - teplotní rozdíl (K)
w - vlnové číslo
x - proměnná Wienova polynomu, $x = c_2/T$
D - průměr zrcadlové dutiny (m)
E - iradiance $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
intenzita vyzařování
I - zářivost $(\text{W} \cdot \text{sr}^{-1})$
L - exitance $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
M - zář, plošná zářivost $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$
 N_A - Avogadrova konstanta, $N_A = 6,0220439 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$,
P - korekční faktor

R - molová plynová konstanta, $R = 8,31441 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
T - teplota (K), $T = t + 273,16$
 ΔT - teplotní rozdíl (K)
U - napětí (V)
NEP - prahová citlivost detektoru (Noise Equivalent Power) záření při níž se dopadající energie záření

vyvolá výstupní signál rovný vnitřnímu indukované-
mu šumu detektoru ($V \cdot W^{-1}$)

α - zaměřovací úhel ($^{\circ}$)

ϵ - emisivita (1)

σ - Stefan-Bolzmannova konstanta,

$$\sigma = \pi^2 \cdot k^4 \cdot (60 \cdot h^3 \cdot c^2)^{-1} = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Ω - jednotkový prostorový úhel = 1 Steradián (prostorový
úhel dělený 2π)

π - Ludolfovo číslo $\pi = 3,14159$

λ - vlnová délka záření (μm)

ν - frekvence záření (Hz)

Značka v závorce:

(λ) - spektrální (monochromatická), na vlnové délce λ

(T_x) - při teplotě T_x

1. Index:

a - absorbtance

d - dopadající

ef - efektivní

i - indikovaný

m - měřený

max - maximální

min - minimální

n - normálový

p - povrchu

r - reflektance,

s - sférický

z - vzorku

0 - černého tělesa (zářiče)

D - detektoru

T - pro teplotu T

2. Index:

c - dotykovým teploměrem

p - pyrometrem

l - vzorku

T - pro teplotu T

Seznam obrázků tabulek a grafů

Obrázky:

- 1: Schéma technického využívání elektromagnetického záření.
- 2: Závislost intenzity elektromagnetického záření na vlnové délce a teplotě
- 3: Vznik černého zářiče v dutině pomocí mnohonásobného odrazu záření od stěn dutiny
- 4: Rozdělení bezdotykových snímačů teploty
- 5: Schéma jasového pyrometru s proměnným proudem napájení srovnávací žárovky
- 6: Spektrální emisivita některých technických materiálů
- 7: Závislost chyby měření monochromatického a pásmového pyrometru na teplotě povrchu tělesa, při konstantní spektrální emisivitě $\epsilon = 0,8$ a několika vlnových délkách
- 8: Závislost chyby údaje pyrometru celkového záření na měřené teplotě a emisivitě povrchu tělesa
- 9: Nejjednodušší způsob určování zdánlivé emisivity
- 10: Schéma měření pásmové emisivity dle [12]
- 11: Schéma navržené metody pro měření monochromatické emisivity
- 12: Dutinový černý zářič ACT 1 600 [63]
- 13: Vzorky materiálu určené k měření emisivity
- 14: Zařízení pro ohřev vzorků při měření emisivity
- 15: Princip inovované metody měření emisivity
- 16: Závislost emisivity černého zářiče podle obr. 3.15 na emisivitě povrchu vzorku při poměrných rozměrech dutiny $d/D=1:5$ a reflektanci r vnitřního povrchu
- 17: Teplotní pole měřeného vzorku
- 18: Teplotní závislost emisivity oceli 11 340
- 19: Teplotní závislost emisivity oceli 11 416
- 20: Teplotní závislost emisivity oceli 11 523
- 21: Teplotní závislost emisivity oceli 11 900
- 22: Teplotní závislost emisivity oceli 12 040
- 23: Teplotní závislost emisivity oceli 12 050

- 24: Teplotní závislost emisivity oceli 12 060
- 25: Teplotní závislost emisivity oceli 12 124
- 26: Teplotní závislost emisivity oceli 12 140
- 27: Teplotní závislost emisivity oceli 12 142
- 28: Teplotní závislost emisivity oceli 13 123
- 29: Teplotní závislost emisivity oceli 13 124
- 30: Teplotní závislost emisivity oceli 14 140
- 31: Teplotní závislost emisivity oceli 15 121
- 32: Teplotní závislost emisivity oceli 15 128
- 33: Teplotní závislost emisivity oceli 15 235
- 34: Teplotní závislost emisivity oceli 15 341
- 35: Teplotní závislost emisivity oceli 15 421
- 36: Teplotní závislost emisivity oceli 16 341
- 37: Teplotní závislost emisivity oceli 16 540
- 38: Teplotní závislost emisivity oceli 17 247
- 39: Teplotní závislost emisivity oceli 10GN2MFA
- 40: Teplotní závislost emisivity oceli 15CH2MFA
- 41: Teplotní závislost emisivity oceli 15CH3MFA
- 42: Teplotní závislost emisivity oceli 18CH2MFA
- 43: Teplotní závislost emisivity oceli 25CH2MFA
- 44: Teplotní závislost emisivity oceli 55CH
- 45: Teplotní závislost emisivity oceli 22K
- 46: Teplotní závislost emisivity oceli 55CHC
- 47: Teplotní závislost emisivity oceli 2p
- 48: Teplotní závislost emisivity šamotu SII
- 49: Teplotní závislost emisivity šamotu SIII
- 50: Teplotní závislost emisivity šamotu STIII
- 51: Teplotní závislost emisivity keramického vyzdívkového mate-
riálu Dinas
- 52: Teplotní závislost emisivity slinutého korundu

- 53: Teplotní závislost emisivity kované oceli 12 050
- 54: Charakteristická křivka 1 teplotní závislosti emisivity skupiny značek ocelí
- 55: Charakteristická křivka 2 teplotní závislosti emisivity skupiny značek ocelí
- 56: Charakteristická křivka 3 teplotní závislosti emisivity skupiny značek ocelí
- 57: Charakteristická křivka 4 teplotní závislosti emisivity skupiny značek ocelí
- 58: Charakteristická křivka 5 teplotní závislosti emisivity skupiny značek ocelí
- 59: Charakteristická křivka 6 teplotní závislosti emisivity šamotových vyzdívkových materiálů
- 60: Charakteristická křivka 7 teplotní závislosti emisivity vysokoteplotních keramických materiálů
- 61: Schéma zařízení pro poloautomatické měření emisivity
- 62: Schéma zařízení pro poloautomatické měření emisivity při kalibraci pyrometru
- 63: Vývojový diagram programu pro řízení zařízení pro měření emisivity

Tabulky:

- 1: Materiály určené pro měření emisivity
- 2: Konstanty regresních křivek rovnice (43) naměřených teplotních závislostí emisivity ocelí
- 3: Rozložení naměřených hodnot emisivit proti určené regresní křivce podle rovnice (43)
- 4: Chemické složení ocelí určených pro měření emisivity
- 5: Chemické složení keramických materiálů určených pro měření emisivity
- 6: Přiřazení materiálů do jednotlivých charakteristických křivek
- 7: Konstanty regresní rovnice (43) křivek teplotní závislosti emisivity charakteristických křivek materiálů
- 8: Chemické složení skupin ocelí zařazených do charakteristických křivek jejich emisivit
- 9: Chemické složení skupin keramických materiálů zařazených do charakteristických křivek jejich teplotních závislostí emisivit

I. ÚVOD - SOUČASNÝ STAV

V řadě technických oblastí zejména v hutích, těžkém průmyslu a sklářství si nelze představit dodržování technologických předpisů a požadavků bez bezdotykového měření teploty pomocí pyrometrů. Bez měření teploty pyrometry se prakticky neobešly takové provozy jako kovářny, válcovny plechu, ohřívací pece, lisovny skla a další.

Bezdotykové měření teploty je jednou z oblastí měření teplot, která stále se rozvíjí. Zejména v posledních dvaceti letech došlo k bouřlivému vývoji jednotlivých druhů pyrometrů a pronikavému zlepšení jejich technických parametrů.

Velký pokrok byl zaznamenán hlavně v oblasti energetických pyrometrů. To bylo umožněno rozvojem fyziky, mikroelektroniky i sdělovací techniky, který přinesl této oblasti nejen jednočipové mikropočítače, světlovody, ale i detektory záření se zlepšenými vlastnostmi. Byly vyvinuty nové typy detektorů nejen pro blízkou oblast infračerveného záření (cca 1 μm), ale též pro střední a vzdálenou oblast (cca do 20 μm) tohoto záření. Nové typy detektorů též obvykle vynikají vyšší citlivostí (detektivitou) a hlavně vysokou dlouhodobou stabilitou. U některých typů detektorů se též podařilo omezit jejich závislost na vlastní teplotě detektoru. To umožnilo tak výrazné zvýšení přesnosti pyrometrů, že pomocí pásmového pyrometru s fotovoltaiickým detektorem je interpolována teplotní stupnice nad teplotou tání stříbra (961,78 °C). Použití speciálních světlovodů umožňuje bezdotykové měření teploty v místech se silným rušivým polem, (zejména elektromagnetickým a elektrostatickým), dále v místech, kde z důvodů prašnosti nebo vysokých teplot prostředí, nebylo možno pyrometr zabudovat nebo v místech, kde pro se značné nebezpečí jeho zničení, ekonomika neumožňovala jeho použití.

Současné se také rozvíjely i další oblasti bezdotykového měření teploty. Na příklad v oblasti poměrových pyrometrů byly v USA a v SNS vyvinuty nové typy provozních pyrometrů pro měření teplot materiálů s nízkou nebo proměnnou emisivitou, tj. zejména hliníku a jeho slitin. Tyto pyrometry určují teplotu na základě

předem stanovené závislosti měřených intenzit záření v několika (obvykle třech někdy až šesti) poměrně úzkých spektrálních oblastech.

Byly vyvinuty i nové typy termografických zobrazovacích zařízení (termovizí). Termovize, dříve téměř výhradně používané pouze k diagnostice různých technologických poruch, se zejména díky novým typům detektorů s termoelektrickými chladiči a speciální výpočetní technice staly skutečným zařízením pro plošné bezdotykové měření teplot. Některé typy již nepotřebují chlazení detektoru kapalným dusíkem. Jiné typy zavedením CCD detektorů, nevyžadují již mechanický rozklad snímaného obrazu. Současná termovizní zařízení umožňují nejen snímat infračervený obraz a převést jej do digitální formy, ale též korigovat teplotu různých objektů na jednom obraze podle jejich individuálních fyzikálních vlastností. Sloučení výpočetní techniky s termovizí též umožnilo zjednodušit a zpřesnit tepelné výpočty těles v nichž je používána prvá okrajová podmínka - rozložení teplot na povrchu tělesa. Rozložení teplot na sledovaném tělese včetně jeho časové změny, změřené experimentálně termovizním zařízením, lze zadat přímo z digitálně zpracovaného termovizního obrazu sledovaného tělesa.

Toto co bylo dosud popsáno je pouze přístrojová oblast bezdotykového měření teplot. Dnes není zvláštností výrobcem udávaná chyba i dlouhodobá stabilita pyrometru 0,5 %. Chybu pyrometru udávanou výrobcem lze označit jako přístrojovou chybu. Výsledná chyba bezdotykového měření teplot se skládá z výše vzpomenuté přístrojové chyby pyrometru a chyby měřicí metody. Do chyby měřicí metody patří všechny chyby způsobené vnějšími vlivy, které za provozu působí na pyrometr i na záření emitované měřeným tělesem. K vnějším vlivům, které působí na pyrometr patří změna vnějších podmínek, zejména teplota okolního prostředí a čistota optiky. Obvykle největší vliv nejen na chybu měřicí metody, ale i na výslednou chybu bezdotykového měření teploty mají ty faktory,

Poznámka:

U pyrometru lze přístrojovou přesnost definovat jako přesnost odezvy pyrometru na definovanou intenzitu záření dopadající na jeho vstupní optiku.

kteřé při určité teplotě měřeného předmětu ovlivňují intenzitu dopadajícího záření na vstupní optiku pyrometru. Mezi ně patří zejména emisivita povrchu měřeného tělesa, transmitance atmosféry mezi měřeným tělesem a pyrometrem a odražené záření jiných těles.

Prakticky všechny typy moderních energetických pyrometrů mají zabudovány korekční obvody emisivity měřeného tělesa. Výrobci pyrometrů prakticky bez výjimky zdůrazňují přesnost svého pyrometru a emisivitu měřeného tělesa v lepších případech udávají jako konstantu pro danou látku (ocel, měď, beton, ap.) bez ohledu na její stav a vnější podmínky.

To vede k tomu, že zejména v provozní praxi jsou chyby způsobené emisivitou podceňovány a emisivita měřeného tělesa je považována za konstantu, a to i v těch případech, kdy technologie vyžaduje měřit teplotu s chybou ± 10 K nebo dokonce menší. V těchto případech změna emisivity pouze o několik procent může u některých typů pyrometrů vyčerpat celou dovolenou chybu měření.

Přesto se dosud měření emisivity těles, zejména za provozních - reálných - podmínek, věnuje nepatrná pozornost. V Evropě jsou známa čtyři pracoviště, která i když v omezené míře se zabývala určováním emisivity těles pro potřeby pyrometrie. Z nich jmenujme na př. Institut vysokých teplot AV SNS Moskvě [9], kde kolektiv pracovníků se zabýval měřením teplot látek zejména tavenin za vysokých teplot. Měřením emisivity na vysoké úrovni se zabýval G. Neuer a F. Günter [12] z Institutu für Kernenergie University ve Stuttgartu. Tato metoda měření emisivity umožňuje sledovat časovou závislost změny emisivity při oxidaci povrchu oceli (růstu okují).

II. CÍL PRÁCE

Mnoho uživatelů postrádá v dostupné literatuře takové rozdělení bezdotykových snímačů teploty, které již jeho zařazením do určité skupiny samo dávalo informace o jeho základních vlastnostech a tím i o jeho hlavním určení. Dosud publikované rozdělení bezdotykových snímačů teploty např. [1], [6], [9] a [26] je vždy vedeno hlavně pohledem výrobce. V některých případech se pyrometry dělily na přenosné, provozní a laboratorní nebo podle typu na pyrometry s mizejícím vláknem, fotoelektrické a barvové.

V žádné z dosud publikovaných rozdělení nebyly zahrnuty ani všechny typy bezdotykových snímačů teploty. Většina rozdělení nezahrnovala ani všechny typy snímačů teploty např. nebyly brány v úvahu termovizní systémy ap.

Při přesném bezdotykovém měření teplot zejména v metalurgických provozech je stále více postrádána znalost emisivity jednotlivých značek ocelí ve stavu v jakém se nacházejí v průběhu ohřevu kování, válcování nebo tepelného zpracování. Běžně udávané literární podklady na př. [22], [9], [10] nelze pro přesné bezdotykové měření teplot prakticky použít, neboť většinou chybí přesné údaje o značce oceli a v jiných případech nebylo měření prováděno za stejných podmínek jaké jsou v běžných provozech (oxidační podmínky).

V rámci této části dizertační práce byly stanoveny následující cíle :

- 1) Provést univerzální rozdělení bezdotykových snímačů teploty které bude respektovat zejména pohled uživatele a uvést přehled hlavních typů snímačů reprezentujících danou skupinu.
- 2) Navrhnout a odzkoušet zařízení pro měření emisivity zejména ocelí v podmínkách obdobným metalurgickým provozům.
- 3) Proměřit emisivity vybraných typů ocelí a keramických vyzdívkových materiálů podle potřeb zadávajícího provozu.
- 4) Naměřené hodnoty emisivit převést do tvaru, který umožní jejich operativní použití v provozních podmínkách.
- 5) Povést zhodnocení jednotlivých vlivů na emisivitu materiálu.

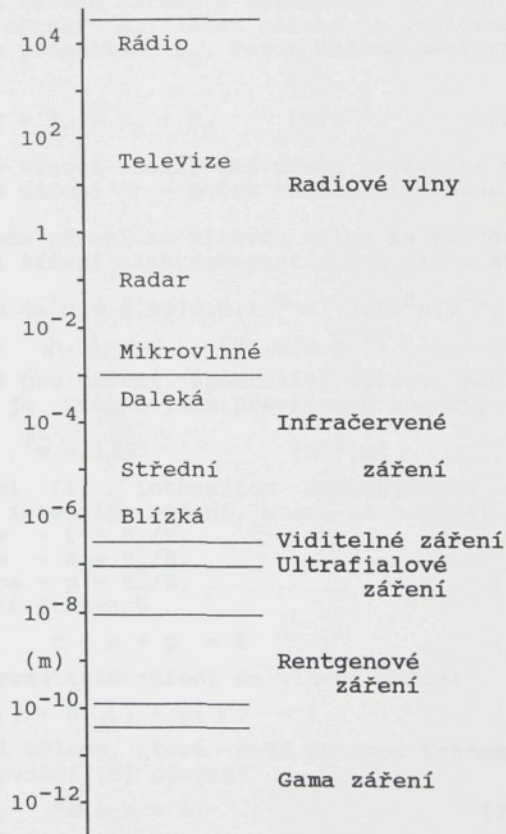
III. ZVOLENÁ METODA ZPRACOVÁNÍ

Znalost skutečné okamžité emisivity povrchu měřeného tělesa je jedním ze základních předpokladů přesného měření teploty bezdotykovými snímači teploty - pyrometry. Při úvaze o pyrometrii, emisivitě těles a vzájemném působení je nutno alespoň v krátkosti se zmínit o základních zákonech podle nich tělesa vyzařují do prostoru elektromagnetické záření.

1. ZÁKLADNÍ ZÁKONY ZÁŘENÍ.

1.1 Tepelné záření.

Každé těleso vyzařuje do okolí elektromagnetické záření na různých vlnových délkách λ (μm) - obr.1. Část záření, která vzniká tepelným pohybem částic pevných těles, kapalin nebo i ply-



Obr.1 : Schéma technického využívání elektromagnetického záření.

nů a plazmy se nazývá tepelné záření. U pevných těles vzniká toto záření kmitáním atomů v prostorové mřížce, v kapalinách kmitáním volných atomů. V plynech a plazmě vzniká tepelné záření otáčivým pohybem molekul. Tento mechanismus vzniku tepelného elektromagnetického záření platí přibližně do 4000°C. Při vyšších teplotách toto záření vzniká ionizací a disociací v atomu.

Tělesa podle způsobu pohlcování tepelného záření dělíme na opticky tenká a tlustá. Opticky tlustá tělesa část dopadajícího záření odrazí a zbytek pohltí. Oproti tomu opticky tenká tělesa část dopadajícího záření odrazí, část pohltí a zbylé záření propustí. Záření tělesem propuštěné jím prochází beze změny a vystupuje na druhé straně do prostředí. Optické vlastnosti těles závisí na vlnové délce dopadajícího záření. U opticky tenkých těles závisí množství pohlceného záření na materiálu tělesa a jeho tloušťce - optické dráze záření. Pokud záření proniká do tělesa můžeme hloubku proniknutí záření vypočítat podle Lambertova zákona.

Dopadá-li na povrch tělesa záření s intenzitou E , část záření se od povrchu tělesa odrazí E_r , část záření je pohlcena (absorbována) E_a , a část je propuštěna E_p . Potom můžeme psát rovnici zachování energie

$$E = E_r + E_a + E_p \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (1)$$

Poznámka: Někdy se místo vlnové délky též udává frekvence elektromagnetického záření ν - počet kmitů za sekundu (Hz).

Převod frekvence záření na vlnovou délku se provádí pomocí rychlosti šíření elektromagnetických vln i světla.

Rychlost světla ve vakuu je $c = 2,997925 \cdot 10^8 \approx 3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$.

$$\nu \cdot \lambda = c \quad (Hz, m, m \cdot s^{-1}) \quad (2)$$

Někteří autoři též pro určení spektrální oblasti používají vlnového čísla w , které je určeno jako převrácená hodnoty vlnové délky

$$w = 1/\lambda \quad (m^{-1}, m) \quad (3)$$

Vydělíme-li rovnici (1) intenzitou dopadajícího záření E dostaneme tři poměrné intenzity záření, které se nazývají

$$\begin{aligned} & - \text{reflektance} \quad - r = E_r/E, \\ & - \text{absorbance} \quad - a = E_a/E, \\ & - \text{transmitance} \quad - p = E_p/E, \end{aligned} \quad (4)$$

a rovnici (1) lze přepsat do tvaru

$$r + a + p = 1 \quad (5)$$

Obdobně pro monochromatické záření na vlnové délce:

$$r(\lambda) + a(\lambda) + p(\lambda) = 1 \quad (6)$$

Pro opticky tlustá tělesa, která mají nulovou transmitanci (propustnost), můžeme rovnici (5) přepsat

$$r + a = 1 \quad (7)$$

nebo pro monochromatická záření

$$r(\lambda) + a(\lambda) = 1 \quad (8)$$

U reálných těles je absorbtance (pohltivost), transmitance (propustnost) i reflektance (odrazivost) závislá na materiálu a jeho povrchu, teplotě tělesa, vlnové délce a úhlu dopadu záření na povrch tělesa.

Těleso, které veškeré záření pohlcuje ($a = 1$) nazýváme **černým tělesem**. Černá tělesa jsou idealizovanými povrchy, kterými se povrchy skutečných těles více nebo méně přibližují. Obdobně tělesa, která vyzařují veškeré záření odpovídající jejich teplotě se nazývají **černé zářiče**. V praxi jsou černá tělesa (zářiče) nahrazována modely černých těles, o nichž bude pojednáváno dále v této kapitole.

Veličiny tepelného záření těles tvoří čtyři skupiny, které zasahují do různých oblastí fyziky

- energetické veličiny,
- fotometrické veličiny,
- veličiny chromatičnosti,
- veličiny určující vlastnosti látek.

1.1.1 Kirchhofův zákon.[26]

Tento zákon je odvozen z 1. a 2. zákona termodynamiky pro sdílení tepla zářením. Říká, že poměr spektrální plošné zářivosti L libovolného tělesa, vyzařující na vlnové délce λ (μm), s teplotou povrchu $T(K)$, je roven spektrální plošné zářivosti černého tělesa L_0 se stejnou povrchovou teplotou $T(K)$, na téže vlnové délce λ (μm), vynásobené spektrální absorbtancí povrchu daného tělesa

$$L(\lambda, T) = a(\lambda, T) \cdot L_0(\lambda, T) \quad (9)$$

1.1.2 Lambertův zákon.[26]

Tento zákon je také nazýván **kosinovým zákonem**. Vyjadřuje, že záření tělesa se mění v závislosti na kosinu úhlu α , který svírá směr pozorování s normálou zářícího povrchu

$$M = M_n \cdot \cos \alpha \quad (10)$$

Na základě platnosti tohoto zákona lze dostat integraci spektrální plošné zářivosti vztah mezi spektrální intenzitou vyzařování L a spektrální plošnou zářivostí M

$$L = \Omega_0 \cdot \pi \cdot M \quad (11)$$

Skutečná tělesa se chovají podle Lambertova zákona pouze výjimečně. Tělesa pro něž tento zákon platí se nazývají **kosinovými zářiči**. Příkladem ideálního kosinového zářiče je černý zářič. Pro reálná tělesa Lambertův zákon obvykle platí do úhlu pozorování 40° od normály sledovaného povrchu.

1.1.3 Emisivita těles.[7]

Je-li těleso v tepelné rovnováze - tzn. že se jeho teplota nemění - musí být záření tělesem pohlcené rovné energii, kterou těleso v daném časovém úseku vyzařuje do okolí

$$E_a = L \quad ; \quad W_a = W \quad ; \quad M_a = M \quad (12)$$

Z toho lze pomocí Kirchhoffova zákona odvodit, že poměr monochromatické plošné zářivosti skutečného tělesa k monochromatické spektrální plošné L_0 zářivosti černého zářiče na téže vlnové délce λ a při stejné teplotě T je roven monochromatické emisivitě tohoto tělesa

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{L(\lambda, T)}{L_0(\lambda, T)} \quad (13)$$

Emisivita v obecném případě závisí na materiálu daného tělesa, vlnové délce λ , na kvalitě a stavu povrchu tohoto tělesa a úhlu zaměření α (úhlem mezi normálou zaměřovaného povrchu a osou zaměření). Proto je určována monochromatická normálová emisivita

$$\epsilon_n(\lambda, T) = \frac{L_n(\lambda, T)}{L_0(\lambda, T)} \quad (14)$$

monochromatická emisivita pod zaměřovacím úhlem

$$\epsilon(\lambda, T, \alpha) = \frac{L(\lambda, T, \alpha)}{L_0(\lambda, T, \alpha)} \quad (15)$$

sférická spektrální emisivita - což je poměr energií vyzářených do poloprostoru

$$\epsilon_s(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)}{M_0(\lambda, T)} \quad (16)$$

Emisivita tělesa v určité spektrální oblasti (λ_1, λ_2) se nazývá pásmovou emisivitou $\epsilon(\lambda_1, \lambda_2)$ a lze ji podle Kirchhoffova zákona určit

$$\epsilon_p(\lambda_1, \lambda_2, T) = \frac{\lambda_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda}{\lambda_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(\lambda, T) d\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda, T) d\lambda \quad (17)$$

Emisivita ve spektrální oblasti $<0, \infty>$ se nazývá integrální emisivita. Lze ji určit úpravou mezí v rovnici (17).

1.2 Záření těles.

Záření černých zářičů lze popsat následujícími zákony:

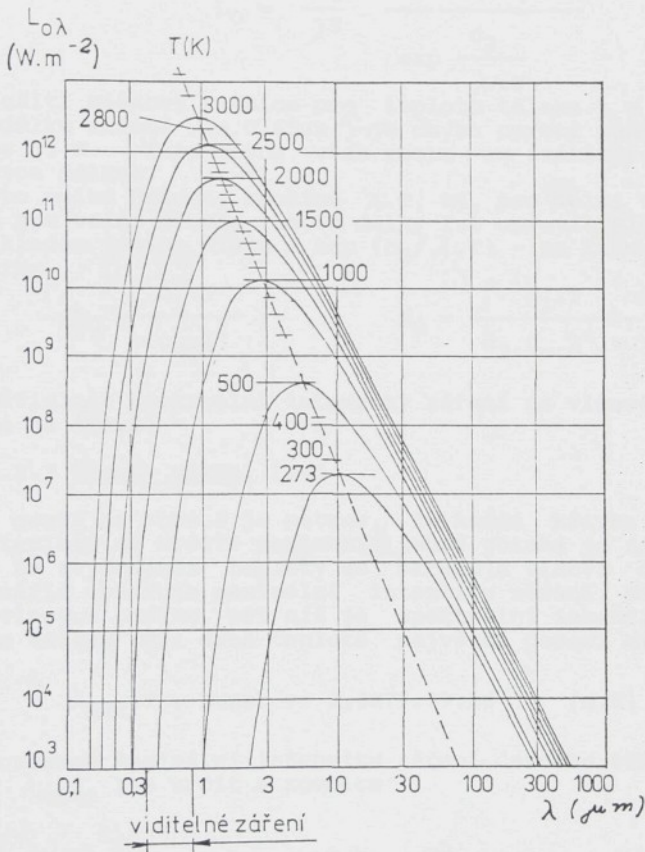
1.2.1 Planckův zákon. [26]

Tento zákon udává jaké množství energie vyzáří do poloprostoru za jednotku času v nekonečně úzkém intervalu vlnových délek $\lambda + d\lambda$ černý zářič s povrchovou teplotou T . Spektrální intenzita vyzářování se rovná

$$L_O = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp \frac{c_2}{\lambda \cdot T} - 1} \quad (18)$$

Stejný zákon pro energii vyzařování do jednotkového prostorového úhlu - spektrální plošnou zářivost má tvar

$$M_O = \frac{c_1}{\Omega_O \cdot \pi \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp \frac{c_2}{\lambda \cdot T} - 1} \quad (19)$$



Obr.2: Závislost intenzity elektromagnetického záření na vlnové délce a teplotě

Rovnice (18) a (19) platí pro nepolarizované záření, v případě polarizovaného záření je nutno v těchto vzorcích nahradit první Planckovu vyzařovací konstantu c_1 konstantou 0,5.

Pro součin $\lambda \cdot T = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$, tj. pro teploty nižší než 3000 K a pro vlnové délky kratší než $3 \mu\text{m}$, lze s chybou menší než 1 % nahradit rovnici (18) a (19) Wienovou rovnicí

$$M_0 = \frac{c_1}{\Omega_0 \cdot \pi \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp \frac{c_2}{\lambda \cdot T}} \quad (20)$$

$$L_0 = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp \frac{c_2}{\lambda \cdot T}} \quad (21)$$

Při použití Wienovy rovnice pro teplotu tělesa $t = 3000 \text{ }^\circ\text{C}$ a vlnovou délku záření $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$ je chyba oproti použití Planckovy rovnice 3 K. Tato chyba však roste se zvětšující se teplotou a vlnovou délkou.

Pro velké hodnoty součinu $\lambda \cdot T$, tj. pro velmi vysoké teploty a nebo pro velmi dlouhé vlnové délky lze upravit Planckovu rovnici rozkladem jejího členu - $\exp(c_2/\lambda \cdot T)$ - na řadu. Potom získáme vzorec

$$L_0 = \frac{c_1 \cdot T}{c_2 \cdot \lambda^4} ; \quad (22)$$

$$M_0 = \frac{c_1 \cdot T}{c_2 \cdot \Omega_0 \cdot \lambda^4 \cdot \pi} \quad (23)$$

Závislost spektrální intenzity záření na vlnové délce a teplotě je na obr.2.

1.2.2 Wienův zákon. [26]

Z grafu na obr.2 je patrné, že každá křivka intenzity pro danou teplotu má určité maximum, jehož poloha je závislá na teplotě. Se zvyšováním teploty se zkracuje vlnová délka, při níž černý zářič vyzařuje maximální intenzitu záření. Matematicky lze určit vlnovou délku, při níž je spektrální intenzita vyzařování černého tělesa při dané teplotě největší pomocí Wienova zákona posuvu

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{konst} = 2,8977 \cdot 10^{-3} \quad (\text{m.K}) \quad (24)$$

Současně maximální intenzitu záření černého tělesa na vlnové délce $\lambda_{\max}$, lze určit z rovnice

$$L_{0 \max} = b_1 \cdot T^5 \quad (25)$$

1.2.3 Stefan-Boltzmanův zákon.

Integrací rovnice (18)) v celém rozsahu energeticky účinných vlnových délek tepelného záření ($0 - \infty$, m), lze získat rovnici pro celkovou intenzitu záření vyzařovanou jednotkou plochy černého tělesa do poloprostoru. Tato rovnice se nazývá Stefan-Boltzmanův zákon [7]

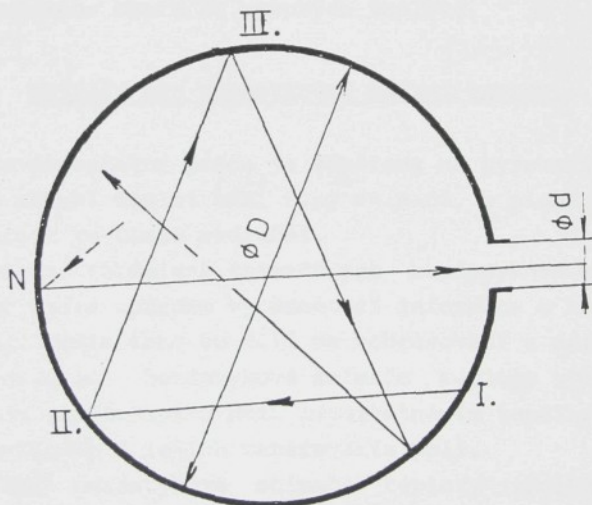
$$L_0 = \int_0^{\infty} L_0(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (26)$$

kde $\sigma = \pi^2 \cdot k^4 \cdot (60 \cdot h^3 \cdot c^2)^{-1} = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

1.3 Modely černých těles. [7]

Jak bylo dříve uvedeno, neexistují ve skutečnosti tělesa, která mají emisivitu nebo absorptanci rovnou jedné a tím se nechovají jako černá tělesa. Ideálním černým tělesem je pouze vnitřní povrch uzavřené dutiny, kde záření emitované povrchem po mnohonásobném odrazu dopadá zpět na uvažovanou část povrchu dutiny. Pro kalibrační nebo zkušební účely si můžeme zhotovit model černého zářiče nebo tělesa, kterým je většinou dutina s dostatečně malým zaměřovacím otvorem oproti vnitřnímu povrchu dutiny.

Černé zářiče podle vlastností povrchu dutiny si můžeme rozdělit na zářiče s difúzním, reflexním nebo smíšeným - reflexně difúzním povrchem. V technické praxi se téměř výhradně používají



Obr.3: Vznik černého zářiče v dutině pomocí mnohonásobného odrazu záření od stěn dutiny

modely černých těles s difuzním povrchem. Dutiny modelů černých těles mají nejčastěji tvar koule, válce, kužele nebo jejich kombinace.

Na obr.3 je model černého zářiče s kulovou dutinou. Je-li teplota vnitřního povrchu dutiny T , potom např. bod I vyzařuje záření s energií L . Toto záření se v bodu II odrazí s energií $L.r$. Po odrazu v bodu III vystupuje záření $L.(1 + r)$ a z bodu IV záření $L.(1 + r).r$ atd. Z toho vyplývá, že záření převládající části vnitřního povrchu dutiny vystupuje z otvoru dutiny po mnohonásobném odrazu. Pro plošnou intezitu vyzařování černého tělesa (zářiče) můžeme psát

$$L.(1 + r + r^2 + r^3 + \dots + r^n) = L.(1 + r)^{-1} = \frac{L}{a_0} = \frac{L}{\epsilon_0} \quad (27)$$

Lze dokázat, že emisivitu ϵ_0 kulového černého zářiče s vnitřním průměrem D kulové dutiny a průměrem d výstupního otvoru, jejíž vnitřní povrch má konstantní teplotu T , lze vypočítat

$$\epsilon_0 = 1 - \frac{(1 - \epsilon_p)}{4} \cdot \left[\frac{d}{D} \right]^2 \quad (28)$$

kde ϵ_p je emisivita vnitřního povrchu dutiny.

Z rovnice (28) plyne, že emisivita černého zářiče roste se zvětšujícím se vnitřním průměrem D dutiny a zmenšujícím průměrem d výstupního zaměřovacího otvoru. Tyto hodnoty lze při konstrukci modelu černého zářiče ovlivnit. Emisivitu vnitřního povrchu dutiny obvykle nelze výrazně ovlivnit, neboť zejména u modelů černých zářičů pro střední a vysoké teploty je výběr materiálů na těleso dutiny poměrně omezený (teplotní odolnost, stabilita vlastností a geometrického tvaru za vysokých teplot).

2.0 SNÍMAČE PRO BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLOT.

Tato disertační práce je zaměřena na pyrometrii, tj. na bezdotykové měření teplot těmi typy snímačů, u nichž přenos informace o teplotě je čistě radiační.

Základní rozdělení snímačů pro bezdotykové měření teplot je provedeno podle způsobu vyhodnocení informace o teplotě zaměřované plochy. Podle toho se dělí na zobrazovací a měřicí. [P103].

Zobrazovací bezdotykové snímače teploty vyhodnocují jednotlivé body zaměřovacího pole zviditelněním tepelného záření předmětů umístěných v jejich zaměřovacím poli.

Měřicí bezdotykové snímače teploty indikují teplotu na základě záření celé zaměřované plochy. U nás jsou všeobecně nazývány **pyrometry**. Tento název je všeobecně používán také na př. v zemích SNS a SRN. V některých zemích, např. v Anglii, USA apod.

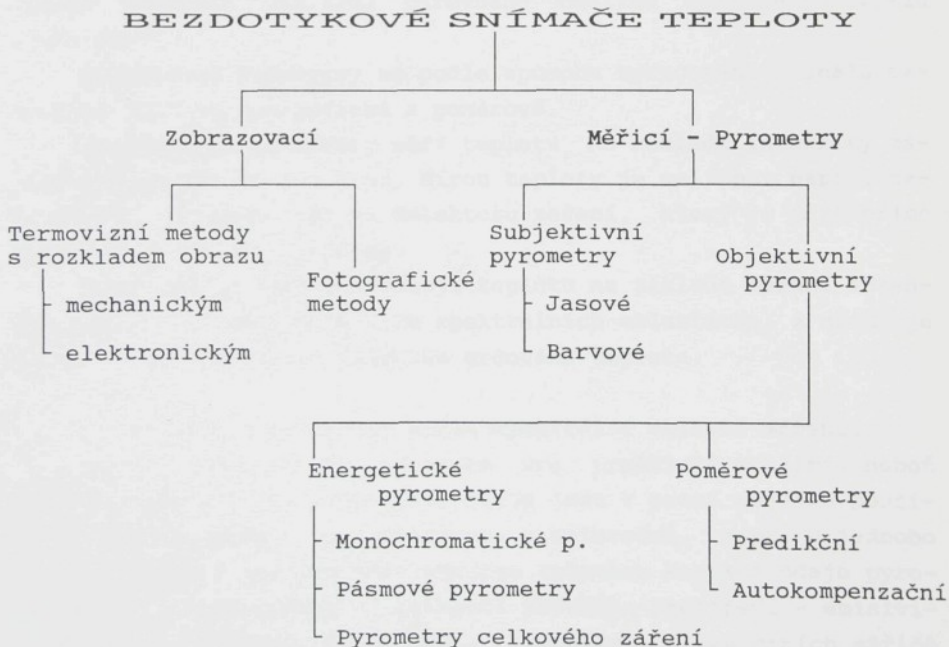
se začíná používat název infračervený teploměr.

Zobrazovací bezdotykové snímače teploty se dále dělí na fotografické a termovizní. Fotografické metody zviditelňují infračervené záření předmětů v zaměřovacím poli zčernáním černobílého fotografického materiálu nebo barevným odstínem barevného fotomateriálu. Termovizní snímače, které jsou také nazývány termovize, převádějí infračervené záření jednotlivých bodů na elektrický signál. Ten je dále zpracováván metodou obdobnou zpracování televizního signálu. Termovize se podle způsobu rozkladu zaměřovaného obrazu na jednotlivé body dělí na termovize s mechanickým rozkladem obrazu a elektronickým rozkladem obrazu.

Rozdělení pyrometrů jako snímačů teploty lze provést z několika hledisek:

A. Rozdělení pyrometrů podle konstrukce.

Tohoto rozdělení často používají výrobci, kteří pyrometry dělí např. podle použité optiky, způsobu zaměřování pyrometru,



Obr.4: Rozdělení bezdotykových snímačů teploty [P103].

způsobu řešení optické cesty, vyhodnocovacích elektronických obvodů a pod. Pro uživatele z hlediska konstrukce pyrometru je důležité rozdělení pyrometrů podle způsobu odvození teploty z dopadajícího záření. Je-li detektorem lidské oko, které srovnává dopadající záření se zářením pomocného zářiče, mluvíme o pyrometrech subjektivních. Převádí-li detektor dopadající záření na elektrický signál, který je dále zpracováván na teplotní údaj, mluvíme o pyrometrech objektivních.

B. Rozdělení pyrometrů podle způsobu zpracování signálu.

Subjektivní pyrometry se podle zpracování signálu dělí na jasové a barvové.

Jasové pyrometry měří teplotu srovnáváním záření na jedné vlnové délce, obvykle 0,65 μm .

U barvových pyrometrů se měření provádí srovnáváním dopadajícího záření se zářením pomocného zdroje na dvou vlnových délkách viditelného záření nebo kombinací srovnávání záření při současném dosažení určitého barevného odstínu fiktivního obrazu v okuláru.

Objektivní pyrometry se podle způsobu zpracování signálu detektorem dělí na energetické a poměrové.

Energetické pyrometry měří teplotu na základě intenzity záření dopadající na detektor. Mírou teploty je velikost napětí nebo proudu vznikajícího na detektoru záření, který je dále přímo zpracováván na údaj teploty.

Poměrové pyrometry odvozují teplotu na základě měření intenzit záření ve dvou nebo více spektrálních oblastech, z nichž je potom ve vyhodnocovací jednotce určována teplota.

C. Rozdělení pyrometrů podle spektrální oblasti měření.

Toto kritérium je významné pro praktické použití, neboť umožňuje energetické pyrometry, které jsou v praxi nejvíce používané dělit do skupin se společnými vlastnostmi. Např. u jednoho druhu pyrometrů lze provádět stejným způsobem korekce údaje pyrometru na základě známých vlastností měřeného prostředí - emisivity měřeného povrchu, propustnosti atmosféry, vlivu cizích zářičů apod.

Energetické pyrometry se podle spektrální oblasti měření dělí na monochromatické, pásmové a pyrometry celkového záření.

Monochromatické pyrometry měří teplotu na základě intenzity záření na vlnové délce λ ve velice úzkém rozsahu vlnových délek $\Delta\lambda$, a lze pro ně použít Planckův zákon (18, 19).

Pásmové pyrometry indikují teplotu na základě měření záření těles v určité oblasti vlnových délek. Tato spektrální oblast je poměrně úzká a jak bude ukázáno dále, je obvykle omezena spektrální citlivostí detektoru a použité optiky. Pro tento typ pyrometru nelze napsat univerzální rovnici vyjadřující závislost intenzity záření na teplotě v dané spektrální oblasti. Řešení umožňuje tzv. efektivní vlnová délka, která je proměnná s teplotou. Potom lze pásmový pyrometr považovat za monochromatický s určenou efektivní vlnovou délkou.

Pyrometry celkového záření indikují teplotu na základě měření záření v celém rozsahu tepelného záření. Pro tyto pyrometry platí (26).

2.1 Subjektivní pyrometry.

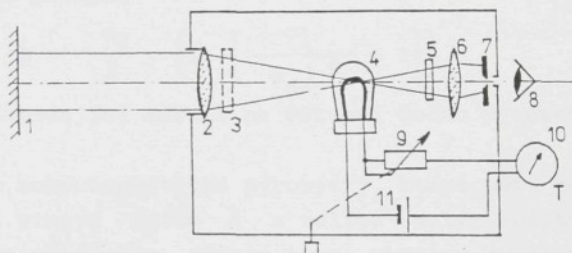
Subjektivní pyrometry nemají detektor záření. Po měření je využíváno oko pozorovatele, které na základě určitého subjektivního vjemu určuje teplotu. Subjektivní pyrometry rozlišujeme na jasové a barvové.

2.1.1 Jasové pyrometry.

Principem funkce jasového pyrometru je srovnávání jasů měřeného předmětu s jasnem srovnávacího zářiče, které provádí pozorovatel. Tyto pyrometry, dříve nazývané pyrometry s mizejícím vláknem, využívají k měření teploty většinou úzký spektrální obor záření o vlnové délce $0,65 \mu\text{m}$. Tento spektrální obor je vymezen červeným filtrem a horní hranicí citlivosti lidského oka.

Schéma jasového pyrometru s proměnným žhavicím proudem je na obr.5. Záření z měřeného předmětu 1 dopadá na vstupní čočku objektivu 2 a je soustředěno do baňky speciální pyrometrické žárovky 4. Po průchodu červeným filtrem 5 je soustředěno čočkou 6 do hledáčku, kde je srovnáván pozorovatelem 8 jas vlákna žárovky s

jasem měřeného povrchu. Pyrometrická žárovka 4 je napájena z baterie 11. Žhavicí proud je regulován potenciometrem 9 ovládaným točátkem 12. Na miliampérmetru 10 s teplotní stupnicí je indikována teplota. Pro měření vyšších teplot zařazuje za objektiv šedý filtr. Údaj jasového pyrometru je nejen závislý na emisivitě měřeného povrchu, ale též je silně závislý na pozorovateli, a proto je určen spíše pro informativní měření.



Obr.5: Schéma jasového pyrometru s proměnným proudem napájení srovnávací žárovky:

- 1 - měřený předmět, 2 - objektiv, 3 - šedý filtr, 4 - pyrometrická žárovka, 5 - červený filtr, 6 - okulár, 7 - clonka, 8 - pozorovatel, 9 - potenciometr, 10 - indikační přístroj, 11 - baterie, 12 - točítka

2.1.2 Barvové pyrometry.

Barvové pyrometry využívají pro měření teplot záření dvou vlnových délek ve viditelné oblasti. Teplota se určuje pomocí barevného vjemu, vyvolaného smíšením dvou monochromatických záření nebo pomocí poměrů jasů ve dvou spektrálních oborech.

Práce s barvovými pyrometry značně náročná. Přesnost měření velice závisí na osobě pozorovatele, podstatně více než u jasového pyrometru. Tyto pyrometry se podstatně nerozšířily a proto není nutno se o nich dále zmiňovat.

2.2 Energetické pyrometry.

Mezi objektivní pyrometry patří energetické pyrometry, které měří teploty na základě množství energie dopadající na jeho detektor.

2.2.1 Monochromatické pyrometry.

Monochromatický pyrometr měří teplotu na základě energie dopadajícího záření ve velice úzké oblasti kolem určité vlnové délky. V souladu s rovnicí (18) - Planckovým zákonem, lze pro jejich údaj napsat rovnici

$$T = \frac{c_2}{\lambda} \cdot \left[\ln \left[\frac{c_1}{W_d \lambda^5} + 1 \right] \right]^{-1} \quad (29)$$

kde W_d - dopadající záření na vstupní čočku pyrometru [W]

Čisté monochromatické pyrometry, které měří teplotu na jedné konstantní vlnové délce λ s velice malým rozptylem $\Delta\lambda$, jsou užívány jen ojediněle. Přesto tato skupina pyrometrů je však důležitá pro popis vlastností určité skupiny pyrometrů a zejména určení chyb nebo korekcí pyrometrů. Pomocí nich jsou popisovány vlastnosti pásmových pyrometrů, u nichž je určena efektivní vlnová délka (viz kap. 2.2.2).

2.2.2 Pásmové pyrometry.

Pyrometry, které odvozují teplotní údaj z energie záření v určité poměrně úzké spektrální oblasti, se nazývají pásmové pyrometry. Spektrální oblast je obvykle omezena spektrální propustností materiálu použité optiky a spektrální citlivostí detektoru. Nejčastěji se používá jako detektor fotoodpor, fotodiodu nebo fotovoltaiický článek.

Pro tento typ pyrometru nelze pro výpočty, zejména identifikace chyb a pod., používat Stefan-Boltzmanův zákon záření, ani Planckův zákon nelze použít přímo. Ten platí pouze pro jednu určitou vlnovou délku. U pásmových pyrometrů zavádí pojem efektivní

vlnové délky pásmového pyrometru. Potom při další identifikaci je pásmový pyrometr považován za monochromatický s vlnovou délkou rovnou jeho efektivní vlnové délce. Pásmové pyrometry jsou proto v některé zahraniční literatuře (např. [11]) nazývány kvazi-monochromatickými pyrometry.

Pro reálné zářiče s emisivitou $\epsilon(\lambda, T)$ a propustností prostředí $p(\lambda)$ můžeme psát výraz

$$\lambda_{ef, T} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(\lambda, T) \cdot \epsilon(\lambda, T) \cdot p(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(\lambda, T) \cdot \epsilon(\lambda, T) \cdot p(\lambda) \cdot \lambda^{-1} \cdot d\lambda} \quad (31)$$

kde $L_0(\lambda, T)$ je spektrální intenzita záření černého tělesa.

Vzorec (31) platí pro $\lambda_1 < \lambda_2$.

Rovnice (31) lze pro skutečný pyrometr a teplotní interval $T_1 - T_2$ upravit a psát pomocí logaritmů pyrometrických signálů při dvou teplotách nebo dvou spektrálních intenzitách záření černého zářiče.

$$\begin{aligned} \lambda_{ef, T_1 T_2} &= \frac{c_2 \cdot \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}{\ln L_0(\lambda_{ef}, T_2) - \ln L_0(\lambda_{ef}, T_1)} = \\ &= \frac{c_2 \cdot \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}{\ln U_0(\lambda_{ef}, T_2) - \ln U_0(\lambda_{ef}, T_1)} \end{aligned} \quad (32)$$

Index λ_{ef} ukazuje, že jsou v rovnici (32) intenzity záření brány

pro černý zářič - emisivita $\epsilon(\lambda, T)$ i $p(\lambda)$ se úpravou rovnice (31) vyrušily. Současně je nutno podotknout, že tato efektivní vlnová délka je určena v teplotním intervalu (T_1, T_2) a např. při teplotě T_1 nebo T_2 je určena s určitou chybou. Tuto chybu lze zmenšovat zužováním teplotního intervalu $\Delta t = T_2 - T_1$. Skutečná hodnota efektivní vlnové délky pásmového pyrometru se rovná

$$\lim_{T_2 \rightarrow T_1} \lambda_{ef, T_1, T_2} = \lambda_{ef, T} \quad (33)$$

Z rovnice (32) současně vyplývá, že efektivní vlnová délka λ_{ef} pásmového pyrometru není konstantní, ale je závislá na měřené teplotě.

2.2.3 Pyrometry celkového záření.

V případě, že pyrometr odvozuje teplotu měřeného předmětu z intenzity záření v celé energeticky účinné oblasti tepelného záření, hovoříme o pyrometru celkového záření nebo dříve nazývaném totálně radiačním pyrometru. Závislost údaje teploty T na dopadající záření E_d je dána Stefan-Boltzmanovým zákonem

$$T = \sqrt[4]{\frac{E_d}{\sigma}} \quad (34)$$

Detektorem pyrometrů celkového záření je některý z tepelných detektorů, obvykle termobaterie, bolometr nebo dnes stále častěji pyroelektrický detektor.

2.3 Poměrové pyrometry.

Poměrové pyrometry jsou založeny na skutečnosti, že vzájemná závislost intenzity vyzařování černého tělesa na různých vlnových délkách se definovaně mění se změnou teploty tohoto tělesa. Dělí se podle počtu spektrálních oblastí z nichž je určována teplota na dvoupásmové a vícepásmové.

U většiny dvoupásmových pyrometrů se teplota určuje pomocí funkce poměru intenzit záření na dvou blízkých vlnových délkách λ_1, λ_2 .

$$T = f \left[\frac{L(\lambda_1, T)}{L(\lambda_2, T)} \right] \quad (35)$$

Vícepásmové pyrometry vycházejí z filosofie, že záření vystupující z měřeného předmětu má v sobě zakódováno dostatek informací o teplotě těles, že při vhodném spektrálním vyhodnocení záření dopadajícího do objektivu pyrometru lze určit jeho teplotu bez znalosti okamžité emisivity. V některých případech jsou tyto pyrometry úspěšně využívány např. pro měření teplot hliníkového pásu se silně proměnou emisivitou povrchu. Současně je nutno upozornit, že pro jiný druh materiálu nebo v některých případech i značku téhož materiálu je nutno způsob vyhodnocení upravit. Pro jejich větší rozšíření je však nutno provést mnoho prací, zejména proměření teplotně-spektrální závislosti mnoha materiálů a současně pokračovat v jejich dalším vývoji, který umožní stavět tyto přístroje v cenově dostupné relaci.

2.4 Zobrazovací metody.

Zobrazovací metody nejsou předmětem této práce a proto se jimi nebude tato práce dále zabývat.

3.0 VLASTNOSTI LÁTEK

Z vlastností látek má na měření teploty pyrometrem největší vliv emisivita měřeného povrchu a transmitance (propustnost) atmosféry. Pyrometr je výrobcem kalibrován na černém zářiči ($\epsilon = 1$). Proto s použitím rovnice (7) pro pyrometr, který měří teplotu předmětu značně vyšší, než je teplota okolních předmětů, můžeme psát

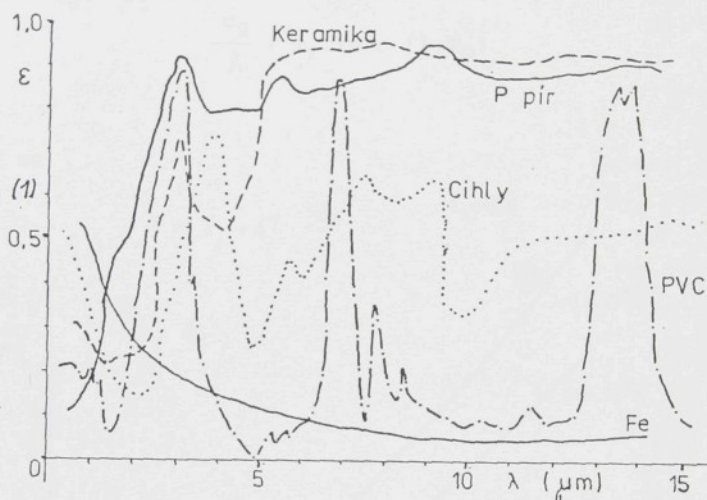
$$L_d(\lambda, T_i) = p(\lambda) \cdot \epsilon(\lambda, T_m) \cdot L_0(\lambda, T_m) \quad (36)$$

3.1 Emisivita

Emisivita povrchu měřeného tělesa je v mnoha případech rozhodujícím faktorem ovlivňujícím přesnost bezdotykového měření teploty. Všeobecně je emisivita tělesa závislá nejen na materiálu tělesa, ale též na jeho teplotě a uvažované vlnové délce. (obr. 6)

V literatuře se vyskytuje poměrně značné množství podkladů o emisivitě různých materiálů, např. [12],[21],[24],[48] apod. Většina těchto údajů nemá uvedeny podmínky měření a nebo toto měření bylo prováděno za prakticky nepoužitelných podmínek např. ve vakuu, v atmosféře inertního plynu apod.

Záření u neprůzračných (opticky tlustých) těles emituje po-



Obr.6: Spektrální emisivita některých technických materiálů.

vrchová vrstva měřeného předmětu. Zejména u technických materiálů kde emituje záření vrstvička oxidů lze používat pouze ty údaje o emisivitě daného materiálu, které byly určeny ^{za} obdobných podmínek, v jakých se bude provádět měření teploty.

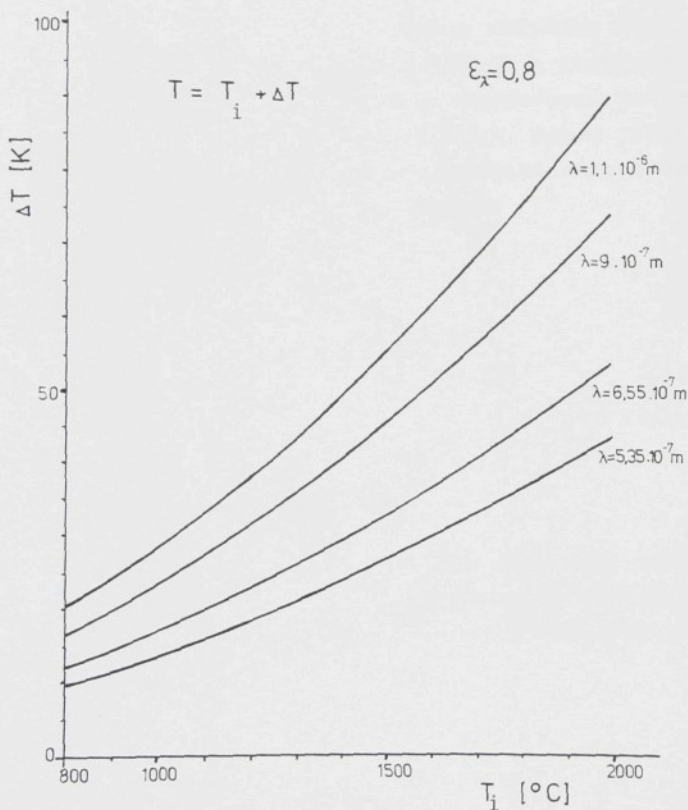
3.2 Chyby způsobené emisivitou povrchu tělesa.

Výrobci výhradně kalibrují pyrometr na černém zářiči, který má emisivitu velice blízkou jedné (vyšší 0,99). Zaměříme-li takto kalibrovaný pyrometr na uvažovanou látku s teplotou T , bude v závislosti na jeho emisivitě pyrometr indikovat teplotu různou od teploty látky T .

3.2.1 Monochromatické a pásmové pyrometry.

Pro monochromatický a i pro pásmový pyrometr s efektivní vlnovou délkou λ_{ef} lze určit s pomocí rovnice (19) určit chybu měření pyrometru $\Delta T = T_0 - T_i$

$$\Delta T = T_0 - T_i = \frac{T_i^2 \cdot \ln \epsilon(\lambda, T_0)}{\frac{c_2}{\lambda} + T_i \cdot \ln \epsilon(\lambda, T_0)} \quad (K) \quad (37)$$



Obr.7: Závislost chyby měření monochromatického a pásmového pyrometru na teplotě povrchu tělesa, při konstantní spektrální emisivitě $\epsilon = 0,8$ a několika vlnových délkách.

Rovnice (37) určuje chybu měření pyrometru způsobenou emisivitou ϵ měřeného tělesa. Při tom je uvažován pyrometr bez zabudované korekce emisivity nebo je korekce nastavena na jedna. Většina současných pyrometrů má již zabudovanou korekci emisivity a výrobce k nim obvykle dodávají tabulky s hrubými údaji o emisivitě základních materiálů. To vede k představě, že nastavením emisivity podle těchto hrubých tabulek je dosaženo potřebné přesnosti měření teploty. Proto je vhodnější vyjádřit chybu měření pyrometrem v závislosti na odchylce emisivit, tj. emisivity nastavené na korekci pyrometru a skutečné emisivity měřeného povrchu.

Je zaveden předpoklad, že na povrch měřeného tělesa nedopadá energeticky významné záření okolních zářičů a transmitance atmosféry mezi povrchem měřeného tělesa a pyrometrem je rovna jedné. Tuto chybu lze odvodit pomocí rovnice (29). Potom je záření dopadající do objektivu pyrometru rovno intenzitě záření vystupujícího z povrchu měřeného tělesa a lze napsat:

$$W_d = W_p = \epsilon \cdot W_0$$

Současně lze zavést substituci

$$\frac{c_2}{\lambda} = A \qquad \frac{c_1}{\lambda^5} = B$$

a napsat upravenou rovnici

$$\frac{A}{T} = \ln \left[\frac{B}{\epsilon \cdot W_0} + 1 \right] \qquad (37a)$$

Pro malé odchylky emisivity lze pro nalezení hledané závislosti chyby měření $\Delta t = T_i - T_p$ na odchylce emisivity $\Delta \epsilon$ použít derivaci $dT/d\epsilon$ rovnice (37a). Tím lze získat výraz :

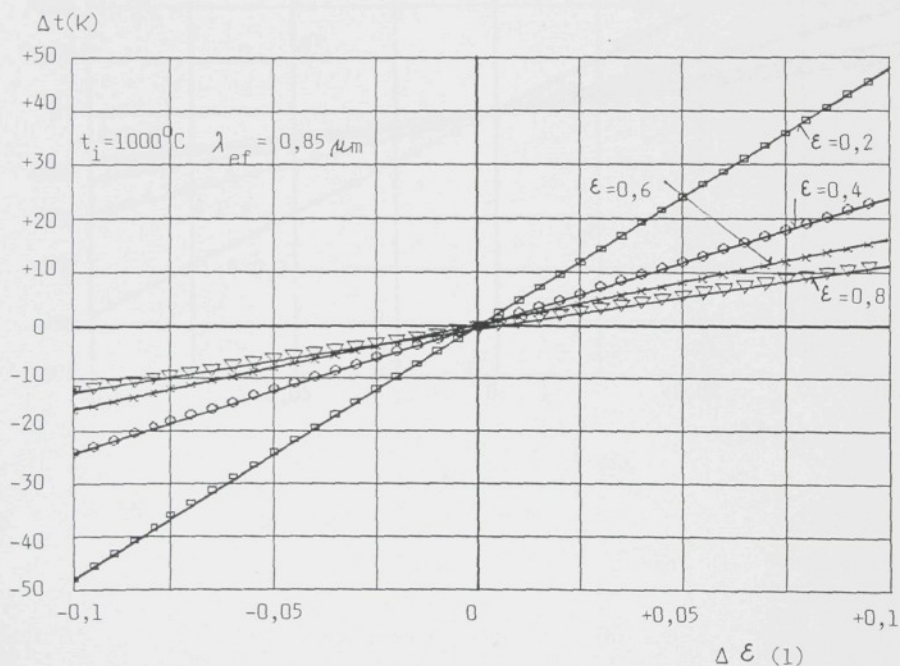
$$\frac{dT}{d\epsilon} = \frac{B}{A} \cdot \frac{T^2}{\epsilon \cdot B + \epsilon^2 \cdot W_0} \qquad (37b)$$

Zpětným dosazením, úpravou a převedením na diferenční tvar lze dostat závislost chyby měření Δt na odchylce $\Delta \epsilon$ emisivity ϵ nastavené na korekci pyrometru a skutečné emisivity ϵ_p měřeného

povrchu:

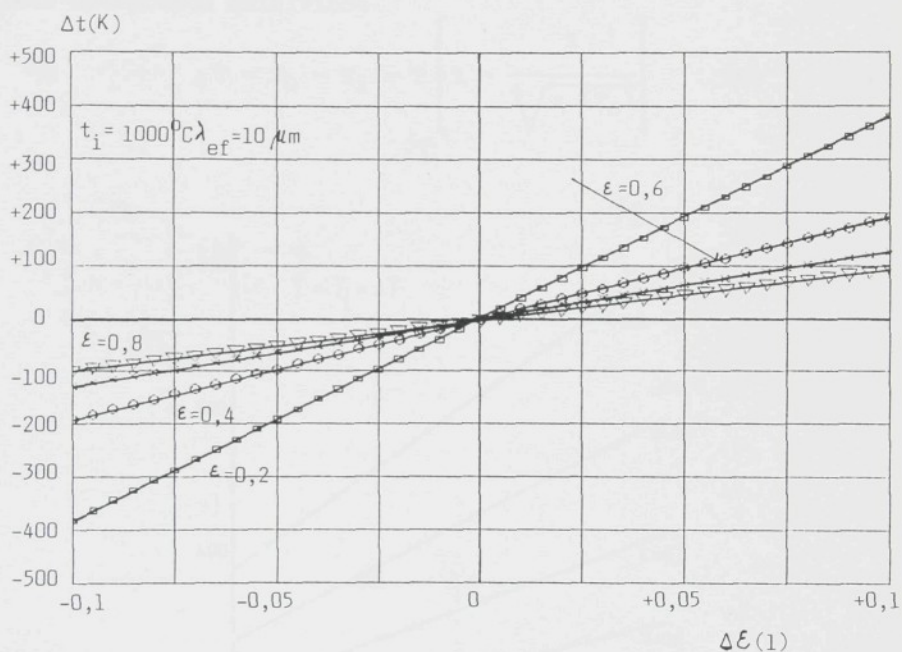
$$a) \quad \Delta t = T_i - T_p = \frac{T_i \cdot \lambda}{\epsilon \cdot c_2} \cdot \frac{\exp \left[\frac{c_2}{\lambda \cdot T_i} \right] - 1}{\exp \left[\frac{c_2}{\lambda \cdot T_i} \right]} \cdot \Delta \epsilon \quad (37c)$$

Pro názornost je na obr. 7a a 7b závislost chyby údaje pyrometru na chybně nastavené emisivitě v rozsahu $(-0,1, +0,1)$ při indikované teplotě $t_i = 1\,000\,^{\circ}\text{C}$ ($T_i = 1273,16\,\text{K}$) a efektivní vlnovou délkou pyrometru $\lambda_{ef} = 0,85\,\mu\text{m}$ a $\lambda_{ef} = 10\,\mu\text{m}$. Z jejich porovnání je patrná výrazná závislost na efektivní vlnové délce pyrometru. Při tom je nutno zdůraznit, že toto není celková chyba měřicí metody, ale pouze její jedna část.



Obr. 7a: Závislost chyby údaje pyrometru na chybě nastavení emisivity při indikované teplotě $1\,000\,^{\circ}\text{C}$ a efektivní vlnové délce pyrometru $0,85\,\mu\text{m}$.

Obr.7b: Závislost chyby údaje monochromatického a pásmového pyrometru na chybě nastavení emisivity při indikované teplotě 1 000 °C a efektivní vlnové délce pyrometru 10 μm.

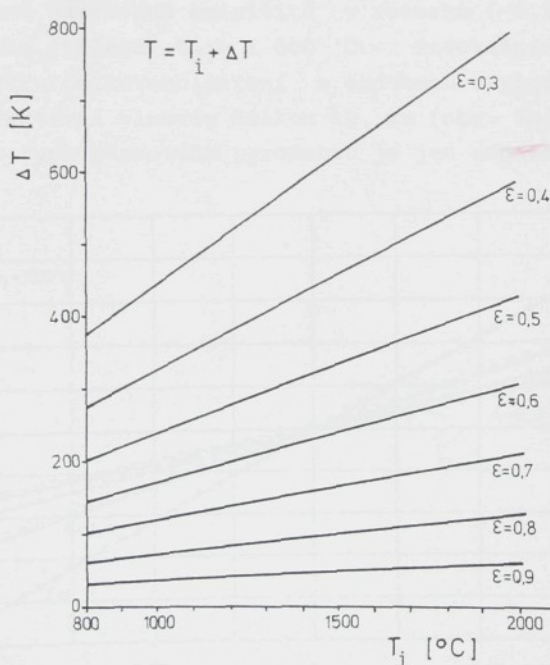


Z rovnice (37) i obr. 7 je patrné, že chyba měření je nejen závislá na emisivitě měřeného povrchu, ale též na vlnové délce použitého pyrometru.

3.2.2 Pyrometry celkového záření.

Pro pyrometr celkového záření, který měří teplotu na základě intenzity záření v celém energeticky účinném oboru infračerveného záření, lze s použitím Stefan-Boltzmanova zákona dostat chybu měření způsobenou emisivitou

$$\Delta T = T_0 - T_i = T \left[1 - \frac{1}{\sqrt[4]{\epsilon (T_0)}} \right] \quad (\text{K}) \quad (38)$$



Obr.8: Závislost chyby údaje pyrometru celkového záření na měřené teplotě a emisivitě povrchu tělesa.

Obdobně jako u monochromatického a pásmového pyrometru je vhodnější i u pyrometru celkového záření vyjádřit chybu Δt měření pyrometrem v závislosti na odchylce $\Delta \epsilon$ emisivity ϵ nastavené na korekci pyrometru a skutečné emisivity ϵ_p měřeného povrchu.

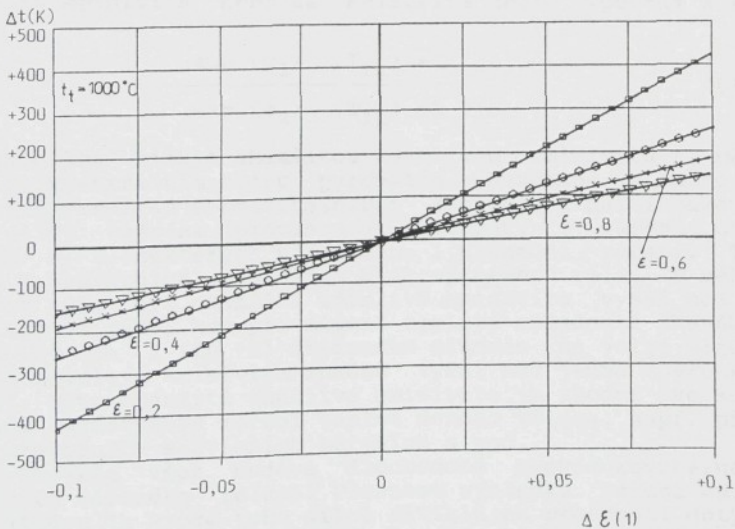
Za předpokladů přijatých pro výpočet chyby způsobené chybně nastavenou emisivitou pro monochromatické a pásmové pyrometry lze derivací rovnice (34) získat výraz

$$\frac{dT}{d\epsilon} = \frac{\frac{4}{\sqrt{W_0}}}{4 \cdot \epsilon^{(3/4)} \cdot \sigma^{(1/4)}} \quad (38a)$$

Úpravou a převedením rovnice na diferenční tvar lze získat výraz

$$\Delta t = T_i - T_p = \frac{T_0}{4} \cdot \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^{(3/4)}} \quad (38b)$$

Na obr. 8a je závislost chyby údaje pyrometru celkového záření na chybně nastavené emisivitě v rozsahu $(-0,1, +0,1)$ při teplotě povrchu tělesa $t_0 = 1\,000^\circ\text{C}$. Porovnáním velikost této chyby pyrometru celkového záření s obdobnou chybou pásmového pyrometru s efektivní vlnovou délkou $10\,\mu\text{m}$ (obr. 7b) je patrné, že chyba tohoto typu pásmového pyrometru je jen nepatrně nižší!



Obr.8a: Závislost chyby údaje pyrometru celkového záření na chybě nastavení emisivity, při teplotě měřeného tělesa $1\,000^\circ\text{C}$.

4.0 MĚŘENÍ EMISIVITY

4.1 Metody měření emisivity

Z literatury je známo velké množství metod měření různých druhů emisivity materiálů z nichž nejčastěji je měřena monochromatická a integrální emisivita. Snad nejúplnější přehled metod měření emisivity uvedl kolektiv sovětských (ruských) autorů v [9], kde jsou metody měření integrální emisivity děleny na:

- radiační
- kalorimetrické
- nestacionární

Metody měření monochromatické emisivity jsou děleny na metody

- černého tělesa
- pomocného etalónu
- pyrometrické
- spektrobolometrické
- pomocného zářiče
- optických konstant (výpočtová metoda)
- měření absorbtance (pohltivosti)

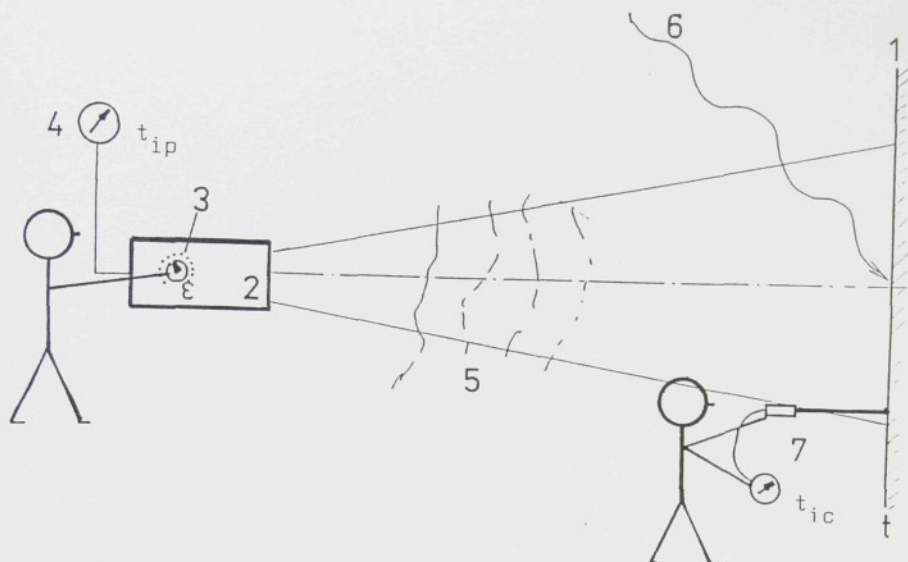
Pro účely bezdotykového měření teplot se obvykle užívá metoda černého tělesa a pyrometrická metoda.

Pyrometrická metoda je v běžné technické praxi nejznámější metodou měření emisivity (obr.9). Jejím principem je současné srovnání teploty povrchu 1 měřeného dotykovým snímačem povrchové teploty 7 a pyrometrem 2. Teplota T_{ip} měřená pyrometrem se točít-kem korekce emisivity nastaví tak, aby se rovnala teplotě T_{ic} mě-
řené dotykovým snímačem povrchové teploty a na displeji pyrometru se odečte emisivita nebo se emisivita určí výpočtem z rovnice (39):

$$\epsilon_z = \frac{\exp(c_2 / T_{ic}) - 1}{\exp(c_2 / T_{ip}) - 1} \quad (39)$$

Takto lze získat okamžitou zdánlivou emisivitu ϵ_z měřeného tělesa ve spektrálním oboru pyrometru. Současně je nutno mluvit o zdánlivé okamžité emisivitě, neboť zahrnuje i další časové proměnné vlivy: zejména propustnost atmosféry 5, záření okolních předmětů 6, v některých případech i sluneční záření. To může zejména v provozních podmínkách hrát významnou roli. V některých případech může být okamžitá zdánlivá emisivita vyšší než jedna. Jsou známy případy, kdy při měření teploty chladnutí žhavého kusu (s teplotou cca 1 100 °C) ozářeného sluncem na volné ploše byla okamžitá zdánlivá emisivita značně vyšší než jedna (pyrometr JO-EL, USA). Tato okamžitá zdánlivá emisivita je vhodná pro současné prováděné bezdotykové měření teplot daného tělesa, např. při provádění provozních servisních měřeních a pod.

Obvykle však nedává dlouhodobě reprodukovatelné údaje o emisivitě měřeného tělesa. Přesnost výsledků měření emisivity touto metodou je kromě toho silně závislá na přesnosti dotykového měření povrchové teploty T_{ic} , kde je nutno určit její absolutní hodnotu. To je zejména obtížné při měření vysokých teplot. Z výše

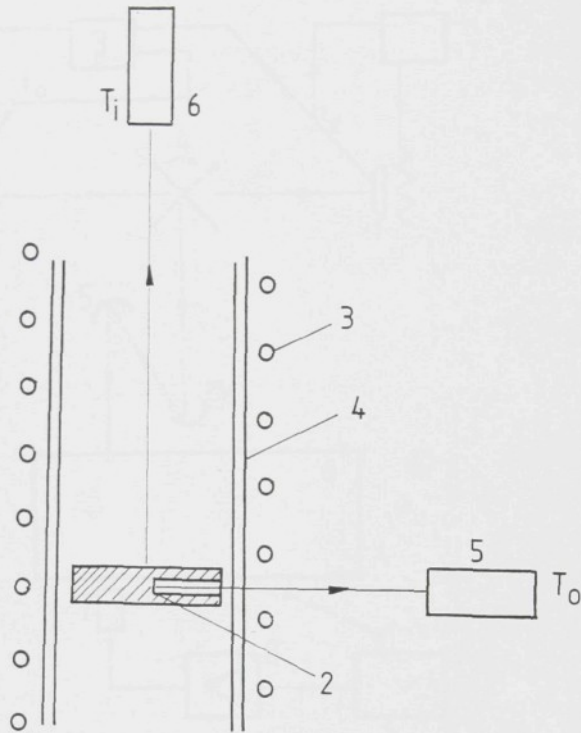


Obr.9: Nejjednodušší způsob určování zdánlivé emisivity.

uvedených důvodů tato metoda není obvykle užívána k měření emisivity těles. Přesto v některých případech např. [50] při laboratorních měřeních stejných materiálů (ocel 17 248) byly touto metodou získány výsledky dobrou shodou s výsledky získanými jinými metodami [12],[23].

Metoda černého tělesa spočívá ve srovnávání intenzity záření černého tělesa se zářením povrchu vzorku měřeného materiálu. Příkladem může být metoda vyvinutá G. Neurem [12] - obr.10, který pro měření použil dvou úzkopaprskových pyrometrů. Pyrometr 6 je zaměřen kolmo na měřený vzorek 1. Druhý pyrometr 5 je zaměřen do otvoru 2 na boku vzorku který představuje černý zářič.

Vzorek je vložen do skleněné trubice 3 a vytápěn pomocí induktoru 4. Tato metoda umožňuje měřit emisivitu vzorku ve vakuu, v běžných oxidačních podmínkách, včetně emisivity v průběhu oxidace povrchu vzorku. Určitou nevýhodou metody je skutečnost, že výsledkem je pásmová emisivita daná spektrálními vlastnostmi použitých pásmových pyrometrů (s křemíkovým fotovoltaiickým detektorem).

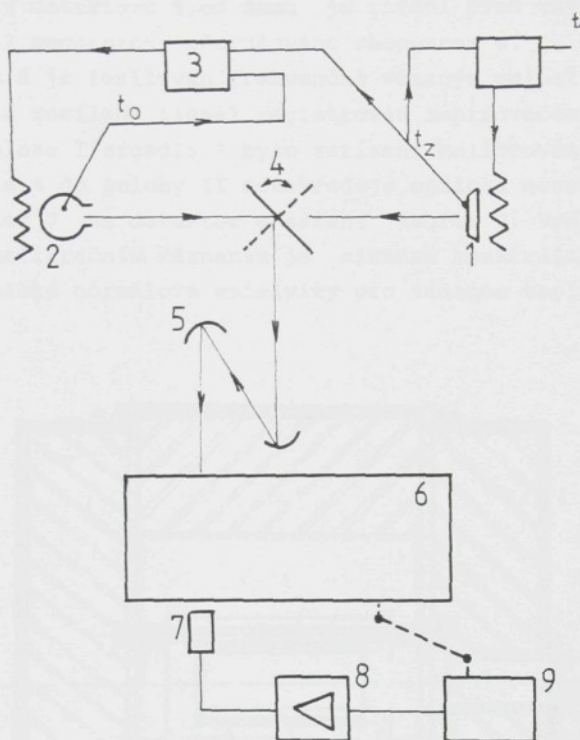


Obr.10: Schéma měření pásmové emisivity dle [12]: 1 - vzorek, 2 - dutina, černý zářič, 3 - induktor, 4 - skleněná trubice, 5,6 - pyrometr.

4.2 Návrh a ověření měřicí metody

Při výběru měřicí metody byla sledována možnost měření emisivity v reálných - oxidačních podmínkách a získání spektrální závislosti monochromatické emisivity v rozsahu 0.4 až 2.5 μm .

Na základě těchto požadavků byla navržena metoda vycházející z metody černého tělesa. Její schéma je na obr. 11. Zařízení se skládá z dutinového černého zářiče 1; oproti němu je umístěn mě-

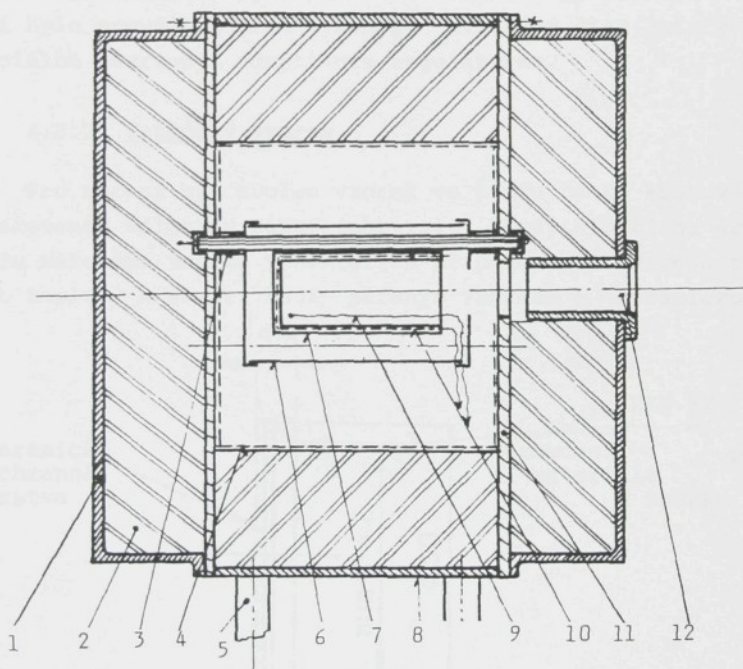


Obr.11: Schéma navržené metody pro měření monochromatické emisivivity v celém spektrálním oboru: 1 - černý zářič, 2 - vytápěný vzorek měřeného materiálu, 3 - regulátor, 4 - překlápěcí zrcadlo, 5 - optická soustava 6 - mechanický přerušovač záření (chopper), 7 - monochromátor, 8 - detektor záření, 9 - selektivní zesilovač 10- zapisovač mechanicky spřažený s pohonem monochromátoru

řeny vytápěný vzorek 2. Regulátor 3 ovládá topení černého tělesa 1 i vzorku 2, tak aby jejich teplota byla udržována na zadané hodnotě v průběhu celého měření. Mezi černým zářičem a vzorkem je umístěno překlápěcí zrcadlo 4, které v poloze I odráží záření černého zářiče 1 na optickou soustavu 5. Optická soustava 5 toto záření soustřeďuje na vstupní clonku monochromátoru 7, za kterým

je umístěn detektor 8. Pro zvýšení odstupu elektrického výstupního signálu detektoru 8 od šumu je záření před vstupem do monochromátoru 7 mechanicky přerušováno chopperem 6. Výstupní signál detektoru 8 je zesilován frekvenčně vázaným selektivním nanovoltmetrem 9 a zesílený signál registrován zapisovačem 10.

V poloze I zrcadla 4 bylo zařízení kalibrováno. Po překlopení zrcadla 4 do polohy II soustřeďuje optická soustava 5 přes monochromátor 7 na detektor 8 záření vzorku 2. Vydělením měřicího záznamu kalibračním záznamem je získána spektrální závislost monochromatické normálové emisivity pro zadanou teplotu.



Obr. 12: Dutinový černý zářič ACT 1 600 [63]: 1 - víko, 2 - izolace, 3 - nosné trubice, 4 - stínění, 5 - stojan, 6 - platínová komůrka, 7 - topné těleso, 8 - plášť, 9 - snímač teploty, 10 - vinutí, 11 - keramická čela, 12 - průzor.

4.3 Zařízení pro ověření navržené metody

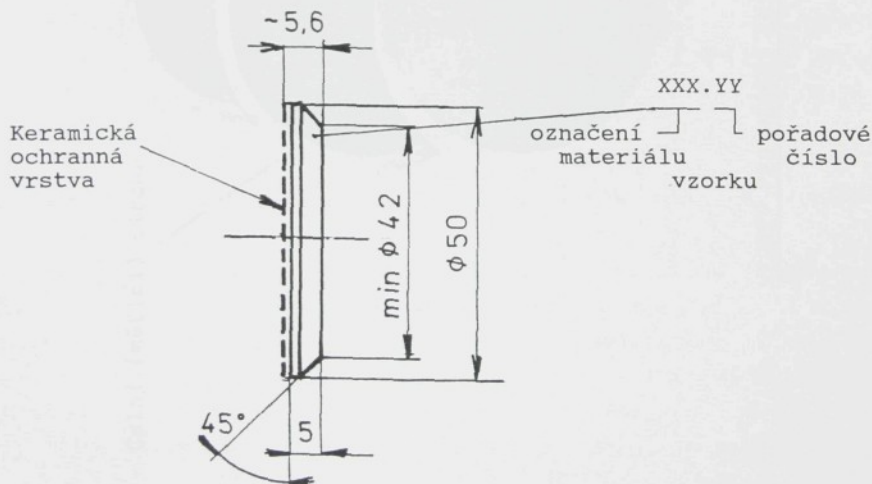
4.3.1 Černý zářič

Byl použit upravený dutinový černý zářič vyvinutý J. Svobodou [63] - obr. 12. Vlastní dutina zářiče je tvořena soustavou keramických kapilár 1, které jsou spojeny keramickým tmelem. V keramických kapilárách je meandrovitě navlečeno topení tvořené platinovým drátem ze slitiny Pt30%Rh o průměru 0.5 mm.

Pro výpočet emisivity dutinového černého zářiče byl použit vzorec (22). Jeho emisivita $\epsilon_0 = 0,99325$ byla dostačující pro provádění těchto měření bez nutnosti korekce naměřených hodnot emisivity. Teplota černého zářiče byla měřena zabudovaným termoelektrickým článkem typu B (Pt30Rh-Pt6Rh) o průměru 0.1 mm. Napájení bylo prováděno přes výkonový triakový člen, který byl řízen speciálně navrženým adaptivním regulátorem.

4.3.2 Vytápěný vzorek

Pro měření byl zvolen vzorek ve tvaru tenké kruhové destičky se skosenou válcovou částí (obr.13). V závislosti na druhu materiálu měřeného vzorku v některých případech, docházelo za vysokých teplot k reakci mezi měřeným vzorkem a keramickou izolací

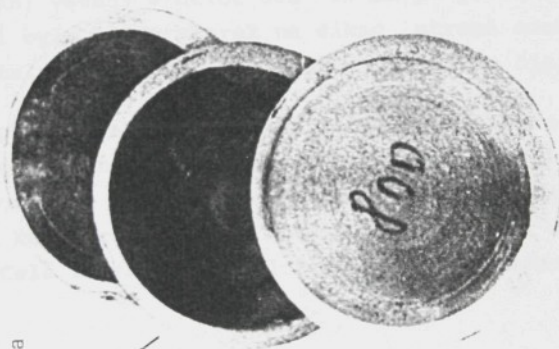


Obr.13: Vzorky materiálu určené k měření emisivity

Strana přiléhající k topení
s plazmově nastříkanou vrstvou
korundu



Čelní (měřicí) strana



Obr. 13a : VZORKY PRO MĚŘENÍ EMISIVITY

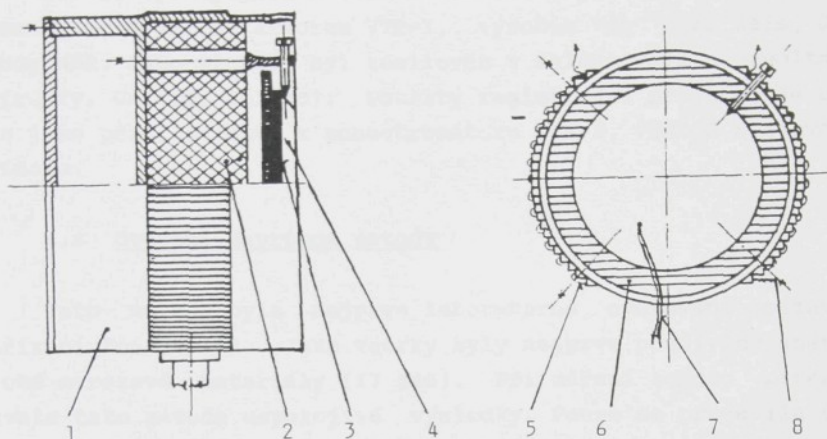
2 topení. Při tom se tvořily eutektoidní slitiny tavitelné za nízkých teplot. Některé materiály, zejména austenitické oceli tř. 17, nebo vysocehlinité keramické materiály s keramickou izolací prakticky nereagovaly. Ostatní materiály reagovaly s keramickou izolací topení velice aktivně a docházelo k rychlému zničení izolace, a následně i platinového vinutí. Proto byly zkoušeny různé ochranné nástříky povrchu vzorků, který dosedá na topení. Po rozsáhlých zkouškách jak materiálu tak její tloušťky, se jako nejvhodnější nakonec ukázal plazmový nástřík korundu s dilatační mezivrstvou. Celková tloušťka ochranné vrstvy byla 0.5 až 0.8 mm.

Měření povrchové teploty vzorku bylo provedeno termoelektrickým článkem typu B (Pt30Rh-Pt6Rh) o průměru 0,1 mm. Měřicí spoj termoelektrického článku byl na čelní plochu vzorku přivařen kondenzátorovým výbojem. Pro vyloučení vlivu odváděného tepla byly termočláňkové dráty izolované tenkou keramickou kapilárou (ϕ 0,4/0,2 mm) vedeny v délce cca 15 mm po povrchu vzorku. Pro identifikaci byl každý vzorek na šikmé straně označen vyraženým typem materiálu a za desetinou tečkou pořadovým číslem.

Pro vytápění vzorků bylo použito ploché deskové keramické těleso tvořené soustavou oválných keramických kapilár stahovaných kovovými kroužky z vysoce žáruvzdorné oceli (obr.14). Na povrch keramických kapilár se pomocí speciálních šroubků upevňoval měřený vzorek. Celé topení bylo vloženo do izolovaného nosného tělesa.

Topný příkon byl ovládán ručně pomocí výkonového triakového členu.

Bylo zkoušeno i otočné vytápěcí zařízení se dvěma vzorky zabudovanými na obou stranách deskového keramického tělesa. U tohoto provedení byl nejprve měřen vzorek na jedné straně a po otočení celého vytápěcího zařízení vzorek na druhé straně. Toto provedení se neosvědčilo pro měření ocelových materiálů pro nekontrolovatelný růst oxidů (okují) na právě neměřeném vzorku.



Obr.14: Zařízení pro ohřev vzorků při měření emisivity:
 1 - těleso, 2 - keramická izolace, 3 - vzorek,
 4 - držák kapilár, 5 - topné vinutí,
 6 - izolační dvoukapiláry, 7 - snímač teploty,
 termoelektrický článek, 8 - nosné šrouby.

4.3.3 Optická soustava

Optickou soustavu tvořilo ploché, ručně překlápěné, zrcadlo. Dalšími částmi byla dvojice kulových dutých zrcadel ($f = 500 \text{ mm}$), která soustřeďovala záření na vstupní clonu monochromátoru. Zrcadlová optika byla volena s ohledem na zajištění její neselektivnosti a proto všechna zrcadla měla odraznou plochu napařenou na vnějším povrchu.

Pro rozklad záření na jednotlivé vlnové délky byl použit monochromátor SPM-2 s křemenným hranolem (výrobek Veb Carl Zeis Jena, tehdy NDR). Monochromátor s hranolem byl výrobcem skalibrován a nastavená vlnová délka byla indikována na zabudované stupnici.

Před vstupem do monochromátoru bylo záření přerušováno mechanickým chopperem, který tvořil rotující kotouč se třemi výřezy poháněný motorem. Pro synchronizaci selektivního nanovoltmetru byla frekvence přerušování záření snímána pomocným snímačem, tvořeným žárovíčkou a fotodiodou.

4.3.4 Vyhodnocovací část

Zařízení vystupující z monochromátoru bylo snímáno - vakuovým termobateriovým detektorem VTH-1, výrobek Veb Carl Zeis, Jena, tehdy NDR. Jeho signál byl zesilován v selektivním nanovoltmetru (výr. fy. Unitra, Polsko). Použitý registrační přístroj je dodáván jako příslušenství k monochromátoru SPM-2, včetně spojovacího hřídele.

4.4 Ověření navržené metody

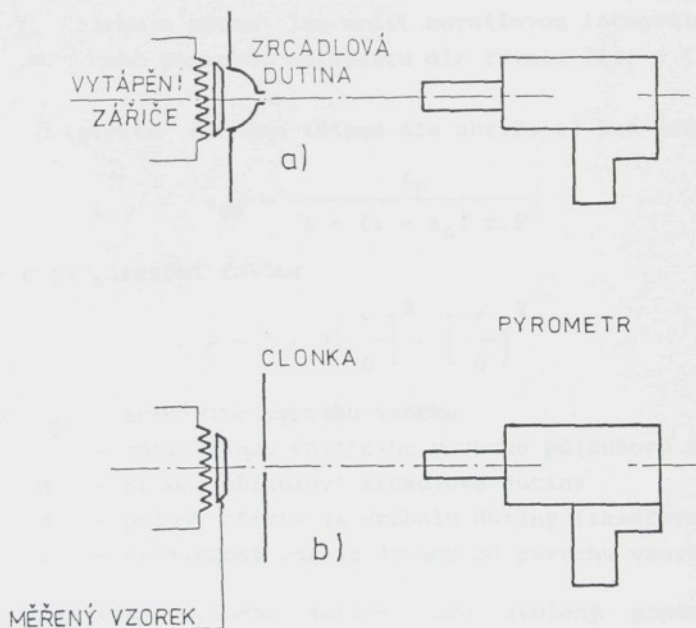
Tato metoda byla nejprve laboratorně ověřována sestavením zařízení "na stole". Jako vzorky byly nejprve používány austenitické nerezové materiály (17 248). Při měření tohoto materiálu dávala tato metoda uspokojivé výsledky. Pouze se projevila relativně nízká citlivost použitého detektoru (NEP) kombinovaná s poměrně značnou ztrátou energie v monochromátoru. To způsobovalo, že měření monochromatické emisivity bylo možno provádět od teploty až cca 850 °C. Snížení minimální teploty měření by bylo možno dosáhnout použitím jiného typu detektoru s nižším NEP a použitím monochromátoru s vyšší energetickou účinností. Měření integrální emisivity však bylo možno provádět od dostatečně nízkých teplot.

Podstatně větší obtíže nastaly při při zkušebních měřeních jiných materiálů. U ocelových materiálů docházelo k velice rychlému odpadnutí přivařeného termoelektrického článku. Příčinou byla oxidace oceli. Po krátké době zoxidovala vrstva kovu k níž byl měřicí spoj termoelektrického článku přivařen. U vzorků z keramických materiálů se neosvědčilo natmelování termoelektrického článku na jeho povrch. Hlavním důvodem byla změna vyzařovacích vlastností povrchu vzorku nanesením keramického tmelu.

Pro běžné kovy se nepodařilo, stejně u keramických materiálů, navrhnout vhodnou metodu měření povrchové teploty vzorků a proto bylo nutno přistoupit návrhu jiné metody měření emisivity.

5.0 INOVOVANÁ METODA MĚŘENÍ EMISIVITY

Při návrhu nové měřicí metody bylo sledováno původně stanovené zadání tj. možnost měřit emisivitu běžných technických materiálů používaných v hutních provozech, zejména ocelí a keramických vyzdívkových materiálů v reálných (oxidačních) podmínkách. Jednoznačně byly s ohledem na zaručení přesnosti a reprodukovatelnosti měření preferovány metody využívající přímé srovnání záření vzorku se zářením černého tělesa. Vzhledem k tomu, že se při



Obr.15: Princip inovované metody měření emisivity

zkouškách dříve popsané metody ukázal jako hlavní problém měření povrchové teploty vzorku a regulace teploty černého tělesa, byla navržena originální metoda, která spočívá ve střídavém mžikovém vytvoření černého tělesa přímo na povrchu vzorku (obr.15).

Pro měření byl uvažován stejný tvar vzorků popsaný v kap. 4.21.2 i stejný typ vytápěcího zařízení. Černé těleso na povrchu vzorku bylo vytvořeno přiklopením jeho měřicí části tělese s vydutou půlkulovou zrcadlovou plochou a s malým otvorem v jejím vrcholu (dále půlkulovou zrcadlovou dutinou). Tím vzniklo černé těleso se smíšeným, difuzně-reflexním povrchem. V této konfiguraci lze změřit intenzitu záření černého tělesa a tím i teplotu vzorku. Výměnou zrcadlové dutiny za clonku stejného průměru jako otvor ve vrcholu zrcadlové dutiny lze měřit intenzitu záření měřeného vzorku a potom lze určit normálovou integrální, monochromatickou nebo pásmovou emisivitu dle rovnic (14) a (17).

Emisivitu černého tělesa dle obr.14-a) lze určit:

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_p}{1 - (1 - \epsilon_p) r \cdot P} \quad (40)$$

kde P je korekční faktor

$$P = 1 - 8 \left[\frac{s}{D} \right]^2 - \left[\frac{d}{D} \right]^2 \quad (41)$$

kde ϵ_p - emisivita povrchu vzorku

r - reflektance vnitřního povrchu půlkulové zrcadlové dutiny

D - průměr půlkulové zrcadlové dutiny

d - průměr otvoru ve vrcholu dutiny (zaměřovacího otvoru)

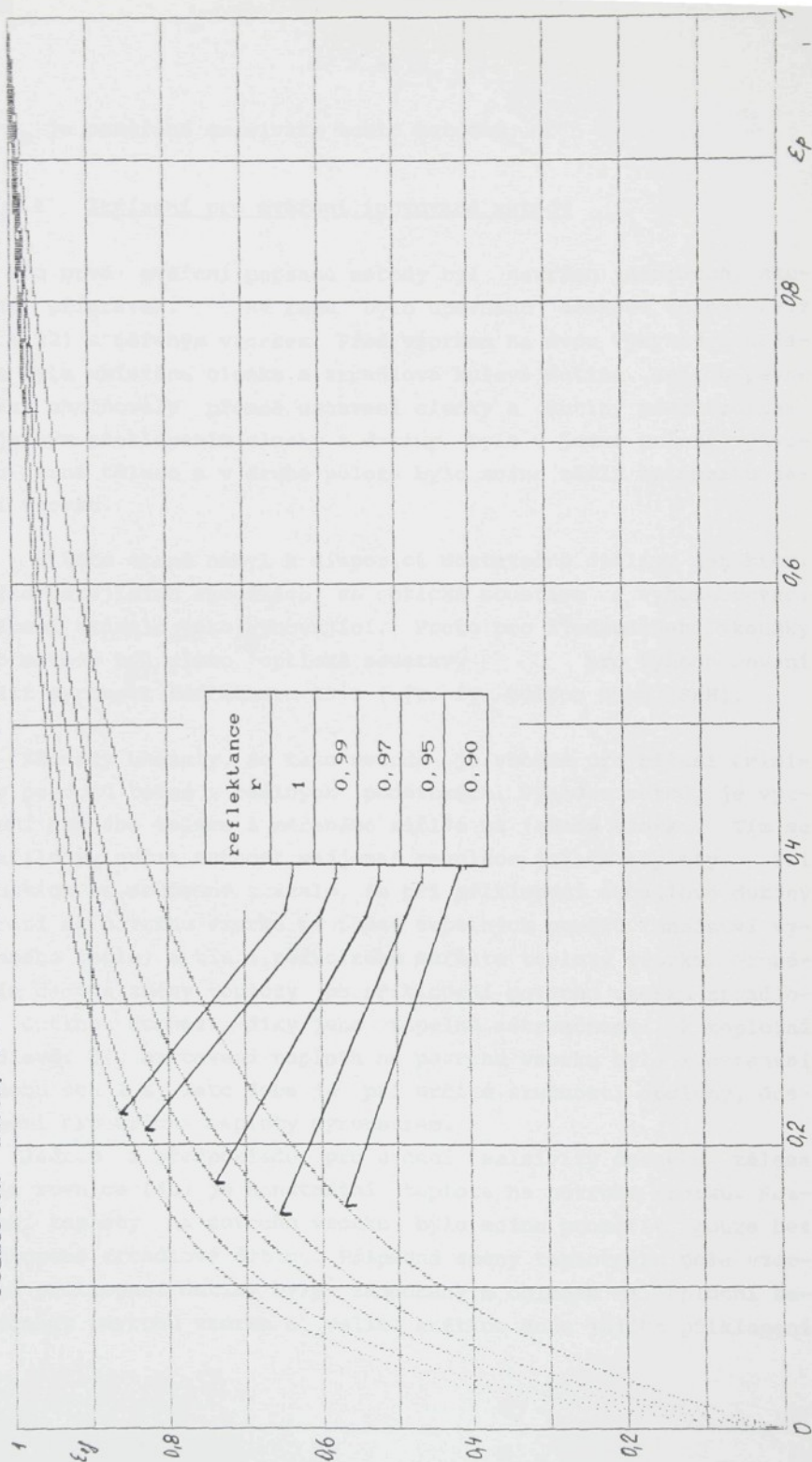
s - vzdálenost okraje dutiny od povrchu vzorku

Emisivita černého zářiče pro zvolený poměr $s/D = 1:40$, $d/D = 1:5$, a různé reflektance vnitřního povrchu kulové dutiny r a v závislosti na emisivitě měřeného povrchu je na obr.16.

Při vyhodnocování měření bude emisivita měřeného povrchu určována v závislosti na reflektanci zrcadlové dutiny dle vztahu:

$$\epsilon_p = \epsilon_m^2 \cdot [1 - (1 - \epsilon_m) \cdot r \cdot P]^{-1} \quad (42)$$

Obr. 16: Závislost emisivity černého zářiče podle obr. 15 na emisivitě povrchu vzorku při poměrných rozměrech dutiny $s/D = 1:40$, $d/D = 1:5$ a reflektanci r jejího vnitřního povrchu



kde ϵ_m je naměřená emisivita touto metodou.

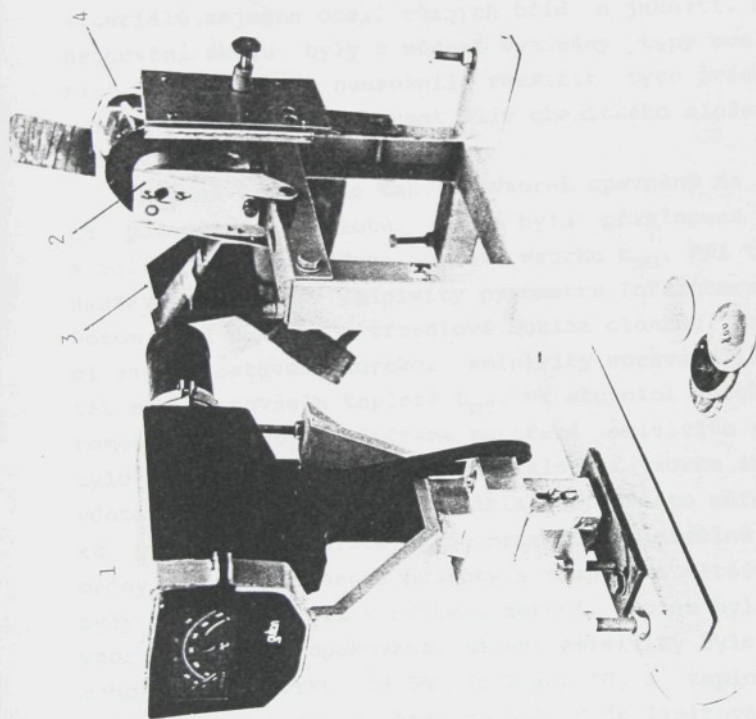
5.1 Zařízení pro ověření inovované metody

Pro první ověření popsané metody byl navržen jednoduchý zkušební přípravek. Na rámu bylo upevněno deskové topení (viz kap.4.22) s měřeným vzorkem. Před vzorkem na dvou výkyvných držácích byla umístěna clonka a zrcadlová kulová dutina. Jejich pevné dorazy umožňovaly přesné ustavení clonky a dutiny před vzorkem. Vzájemným překlopením clonky a dutiny bylo v jedné poloze vytvořeno černé těleso a v druhé poloze bylo možno měřit intenzitu záření vzorku.

V této etapě nebyl k dispozici dostatečně citlivý detektor. V předcházejících zkouškách se optická soustava a vyhodnocovací zařízení ukázalo jako vyhovující. Proto pro zjednodušení zkoušky této metody byl místo optické soustavy pro vyhodnocování použit pyrometr Infratherm IS-3 (výr. fy. Gulton GmbH, SRN).

Zkoušky ukázaly, že tato metoda je vhodná pro měření emisivity povrchů těles v reálných podmínkách. Výhodou metody je vytvoření černého tělesa i měřeného zářiče na jednom vzorku. Tím se podařilo vyloučit nutnost vzájemné regulace jejich teploty. Při zkouškách se současně ukázalo, že při přiklopení zrcadlové dutiny dochází na povrchu vzorku ke změně tepelných poměrů (množství vyzařného tepla) a tím i pozvolnému nárůstu teploty vzorku. Proměněním časové změny teploty po přiklopení povrchu vzorku zrcadlovou dutinou dochází díky jeho tepelné setrvačnosti k teplotní prodlevě. Tj. nastavená teplota na povrchu vzorku byla konstantní po dobu cca 2 s. Tato doba je, při určité zručnosti obsluhy, dostatečná pro určení teploty pyrometrem.

Jedním z předpokladů pro určení emisivity černého tělesa podle rovnice (40) je konstantní teplota na povrchu vzorku. Rozložení teploty na povrchu vzorku bylo možno proměřit pouze bez přiklopené zrcadlové dutiny. Případné změny teplotního pole vzorku po přiklopení dutiny byly zanedbány s ohledem na teplotní setrvačnost povrchu vzorku a velice krátkou dobu jejího přiklopení



Obr. 15a : ZARÍZENÍ PRO OVĚŘENÍ INOVOVANÉ METODY MĚŘENÍ EMISIVITY :

1 - pyrometr, 2 - zrcadlová dutina, 3 - clonka, 4 - topení se vzorkem

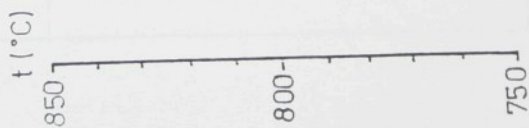
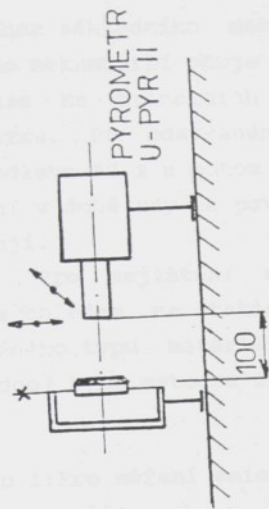
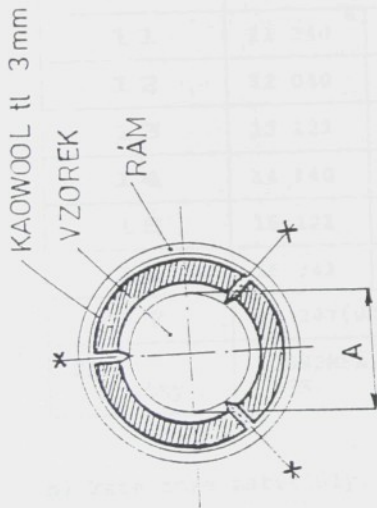
dutinou. Proměření teplotního pole bylo prováděno úzkopaprskovým pyrometrem UHER II (průměr snímané plochy 2mm), zabudovaném na křížovém suportu. Po přidání dodatečné izolace bylo dosaženo dostatečně rovnoměrné teplotní pole v horizontálním směru ($\Delta t = 4 \text{ K}$) - obr.17. Ve vertikálním směru byl změřen teplotní rozdíl $\Delta t = 17 \text{ K}$, který je způsoben prouděním vzduchu ve svislém směru (komínový jev).

5.2 Měření na zkušebním přípravku

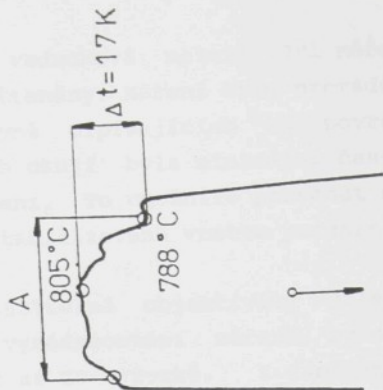
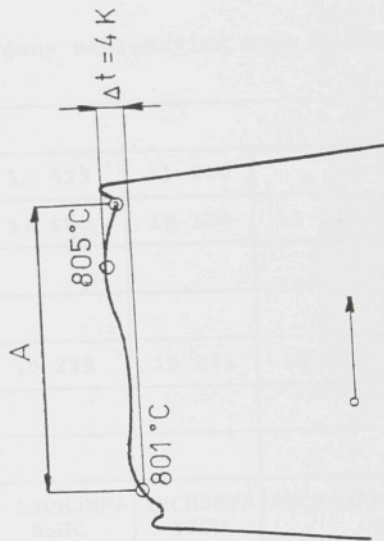
V rámci zkoušek inovované metody byla proměřena řada materiálů zejména ocelí různých tříd a jakostí. S ohledem na financování úkolu byly k měření vybírány typy ocelí podle provozních požadavků. To neumožnilo rozšířit tyto práce na některé návazné výzkumy např. zkoumat vliv chemického složení oceli na její emisivitu a pod.

Měření probíhalo tak, že vzorek upevněný na topení byl ohřát na požadovanou teplotu. Potom byla přiklopena zrcadlová dutina a velice rychle změřena teplota vzorku t_{m0} . Při tomto měření byla nastavena korekce emisivity pyrometru Infratherm IS-3 na $\epsilon = 1$. Potom byla nahrazena zrcadlová dutina clonkou. Na pyrometru pomocí změny nastavené korekce emisivity upravena indikovaná teplota tak aby se rovnala teplotě t_{m0} . Na stupnici korekce emisivity pyrometru, pak byla odečtena naměřená emisivita ϵ_m . Každé měření bylo prováděno tak, aby doba přiklopení vzorku zrcadlovou dutinou včetně měřené teploty nepřesáhla 2 s. Přesto měření jednoho vzorku při každé teplotě bylo prováděno minimálně pětkrát. Nebyly brány v úvahu naměřené hodnoty s rozptylem větším než 5 %, které byly vylučovány již v průběhu měření. Potom byla zvýšena teplota vzorku a měření opakováno. Měření emisivity bylo prováděno v rozsahu teplot vzorku od 550 do 1 200 °C, s teplotním krokem 30 až 50 K. Dolní teplotní hranice 550 °C je limitována rozsahem použití pyrometru. Horní hranici 1 200 °C limitovala životnost topení.

Při vyšších teplotách dochází u některých typů ocel k tvorbě neuplívajících nebo tzv.sekundárních okují. To jsou okuje, jež nejsou pevně spojeny s materiálem vzorku a je mezi nimi a po-



obr. 17: Teplotní pole měřeného vzorku



vrchem základního materiálu vzorku vzduchová mezera. Při měření tyto sekundární okuje byly vždy odstraněny. Měření bylo prováděno pouze na primárních okujích, pevně ulpívajících na povrchu vzorku. Po odstranění sekundárních okují byla minimální časová prodleva 90 s a potom provedeno měření. To umožnilo provádět měření v době kdy na povrchu vzorku stabilizovaná vrstva primárních okují.

Pro zajištění maximálně dosažitelné objektivity výsledků a s ohledem na statistické metody vyhodnocování měření, bylo od každého typu materiálu proměřeno 4 až 20 vzorků. Z naměřených hodnot byla metodou lineární regrese určena výsledná křivka zá-

Tab.1: Pro měření emisivity byly určeny následující typy materiálů:
a) oceli:

Třída	Značka				
11	11 340	11 416	11 523	11 900	
12	12 040	12 050	12 060	12 124	12 140
13	13 123	13 124			
14	14 140				
15	15 121	15 128	15 235	15 341	15 421
16	16 341	16 540			
17	17 247(0X18N10T)				
Cizí značky	10GN2MFA 22K	15CH2MFA 2p	15CH3MFA 55NC	18CH2MFA 55CH	25CH2MFA

b) keramické materiály:

Materiál	Značka			
Šamoty	SII	SIII	STIII	
Vysokoteplotní materiály	Dinas	Slinutý korund		

vislosti emisivity na teplotě tělesa. Při vyhodnocování měření emisivity posledních typů materiálů byla s ohledem na předpokládanou homogenitu výsledné křivky používána lineární regrese pouze do 3. řádu:

$$\epsilon = a(3) * t^3 + a(2) * t^2 + a(1) * t + a(0) \quad (43)$$

Výsledky měření teplotní závislosti emisivity materiálů jsou na obr. 18 až 48. Konstanty regresních křivek rovnice (43) měřených materiálů jsou v tab. 2. Střední kvadratická odchylka naměřených hodnot od regresní křivky se pohybovala od $4,03 \cdot 10^{-3}$ do $3,41 \cdot 10^{-2}$.

Uspokojivou přesnost výsledků měření dokumentuje tabulka 3, kde je uveden i počet měření s udaným rozptylem proti určené regresní křivce (43). Celkově je oproti příslušné regresní křivce:

99,42 % naměřených hodnot s rozptylem 10 %

86,14 % naměřených hodnot s rozptylem 5 %

46,71 % naměřených hodnot s rozptylem 2 %.

6.0 ROZBOR VÝSLEDKŮ

1 MĚŘENÍ EMISIVITY

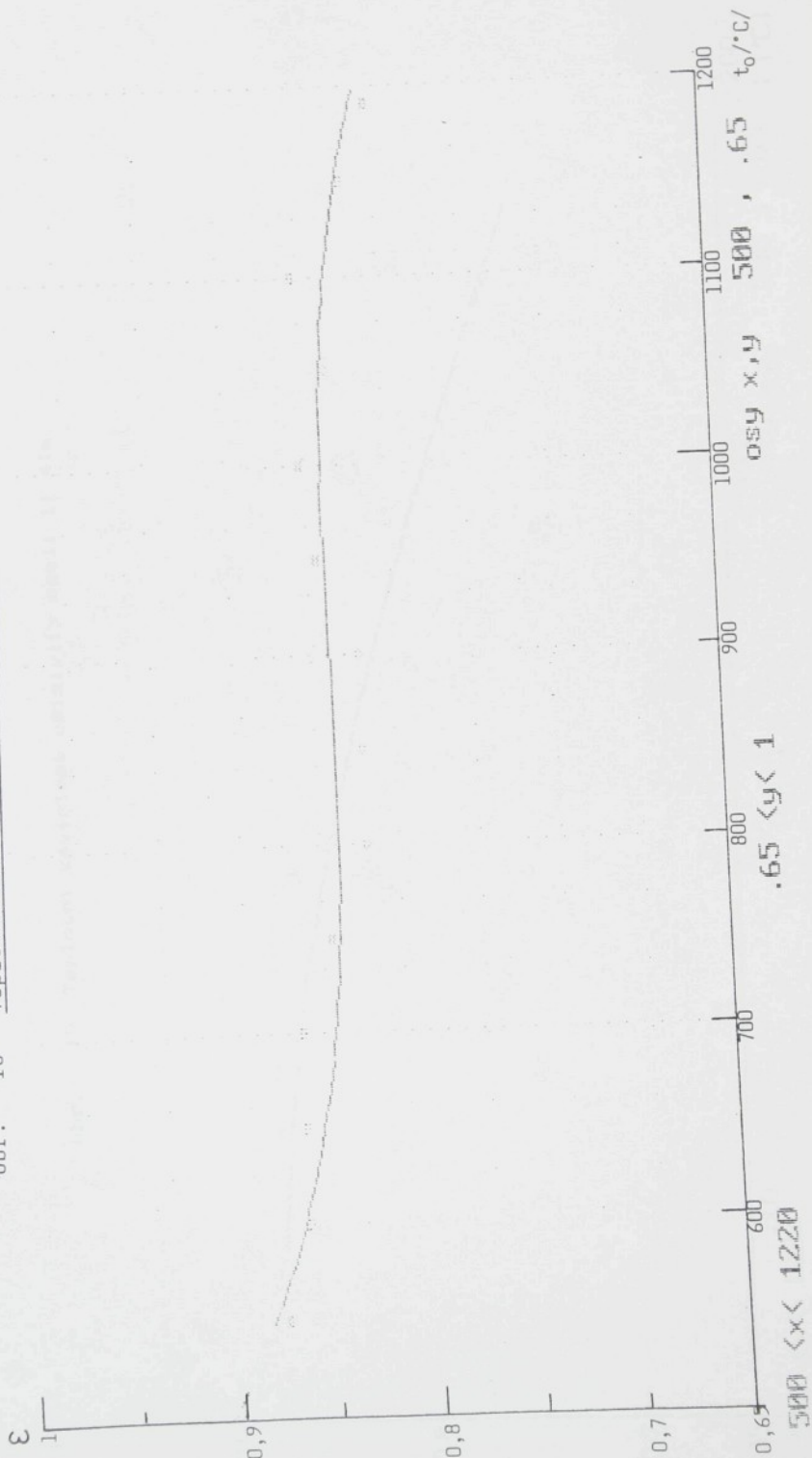
Jak bylo dříve zdůrazněno záření emituje povrchová vrstvička na povrchu měřeného tělesa. U ocelí záření emituje povrchová vrstva oxidů (okují). Emisivita jednotlivých typů ocelí závisí na okamžitém jejich chemickém složení, případně mechanickém stavu povrchu (drsnosti).

6.1 Vliv drsnosti měřeného povrchu

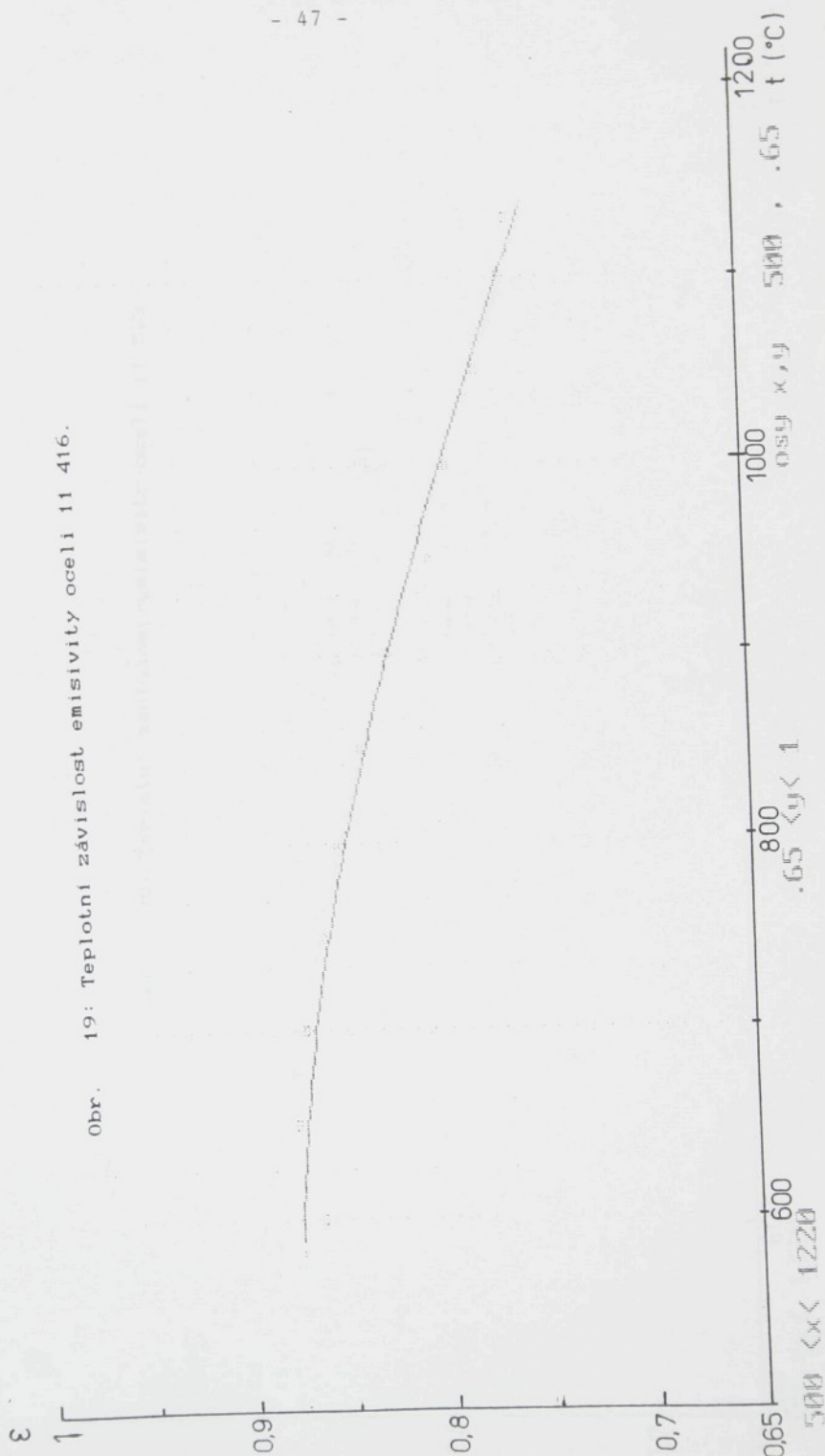
Před započítáním prací byl předpokládán značný vliv drsnosti povrchu na výslednou emisivitu. Z těchto důvodů bylo provedeno poměrně rozsáhlé měření vzorků několika typů ocelí jejichž povrch měl různou drsnost, způsob obrobení i zpracování. Pro měření byla vybrána ocel typu 12 050 a 17 248. Z materiálů obou typů ocelí byly vyrobeny vzorky jejichž povrch byl opracován:

- | | | | | |
|----|--------------|------------|--------|-----|
| a) | soustružením | na drsnost | 1,6 | HRC |
| b) | soustružením | na drsnost | 12,5 | HRC |
| c) | soustružením | na drsnost | cca 50 | HRC |

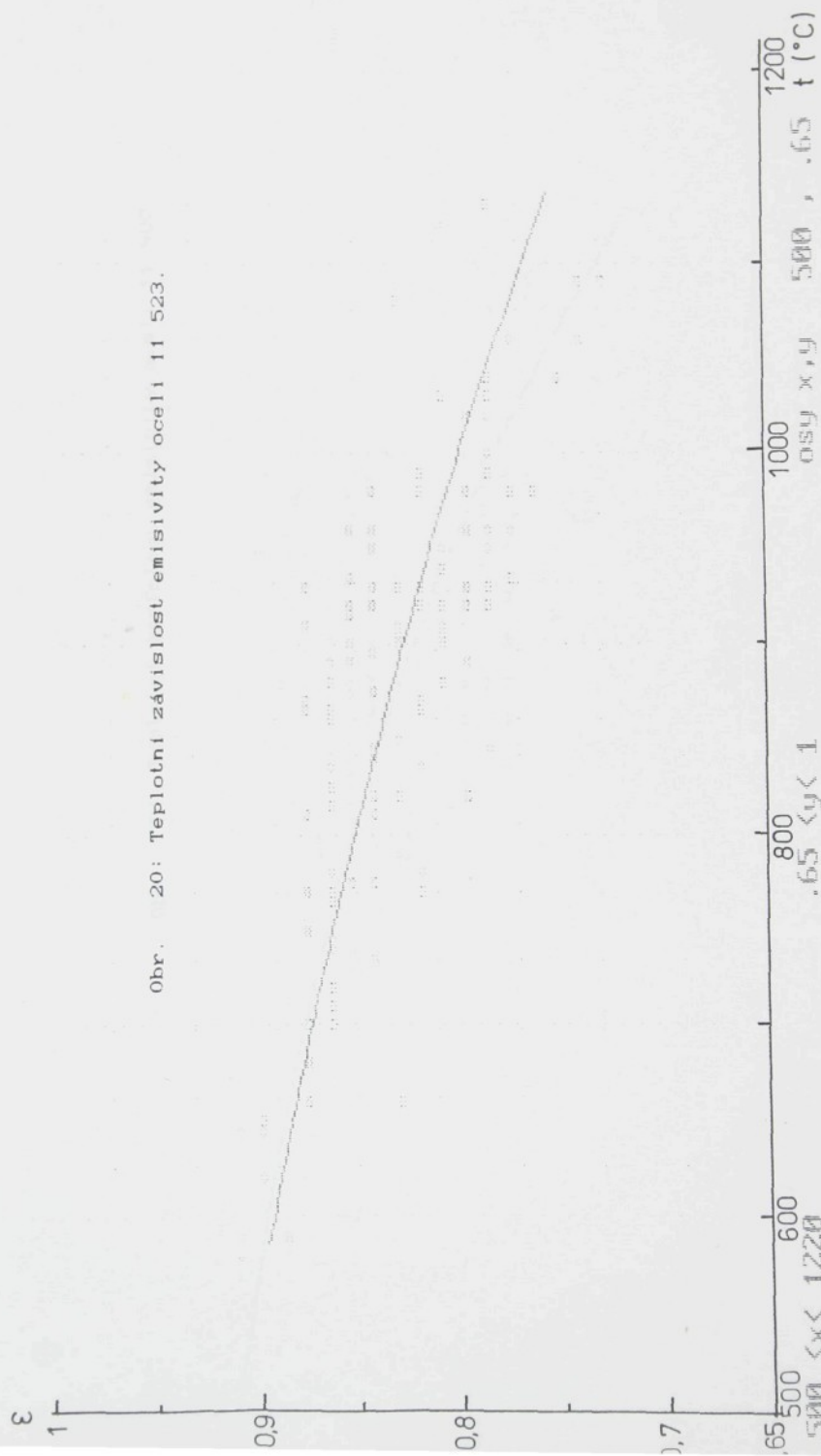
Obr. 18 Teplotní závislost emisivity oceli 11 340



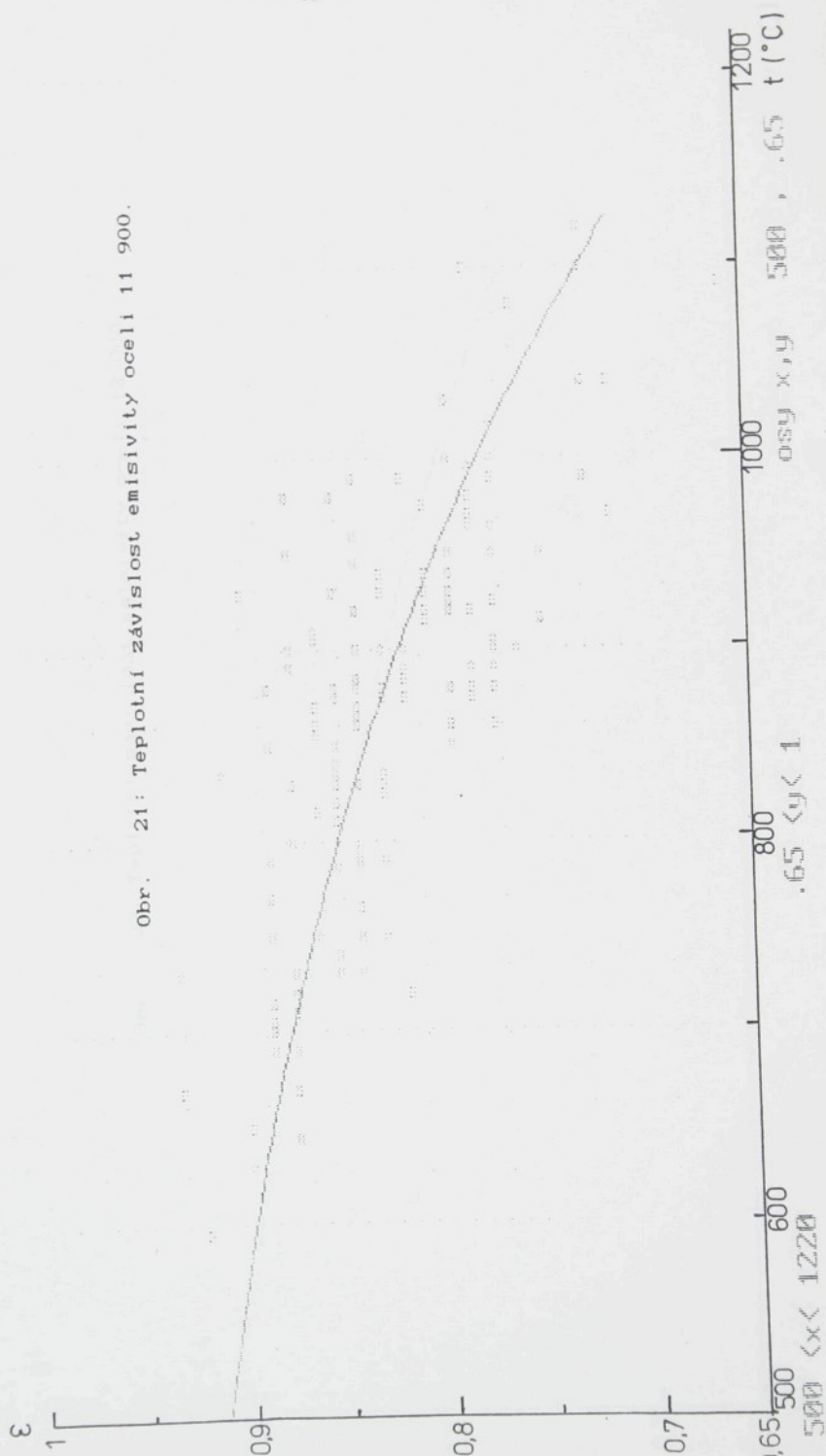
Obr. 19: Teplotní závislost emisivity oceli 11 416.

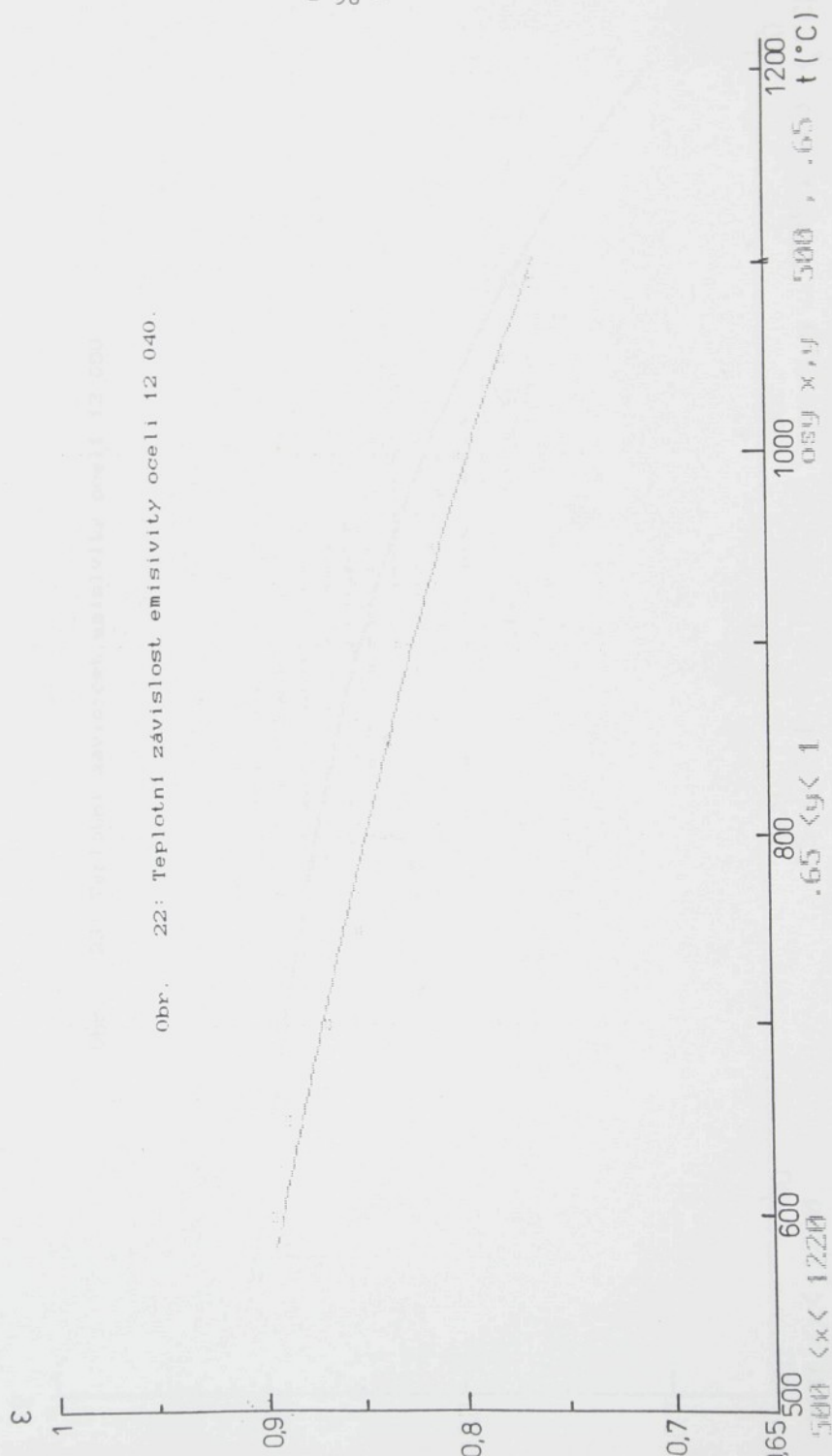


Obr. 20: Teplotní závislost emisivity oceli 11 523.



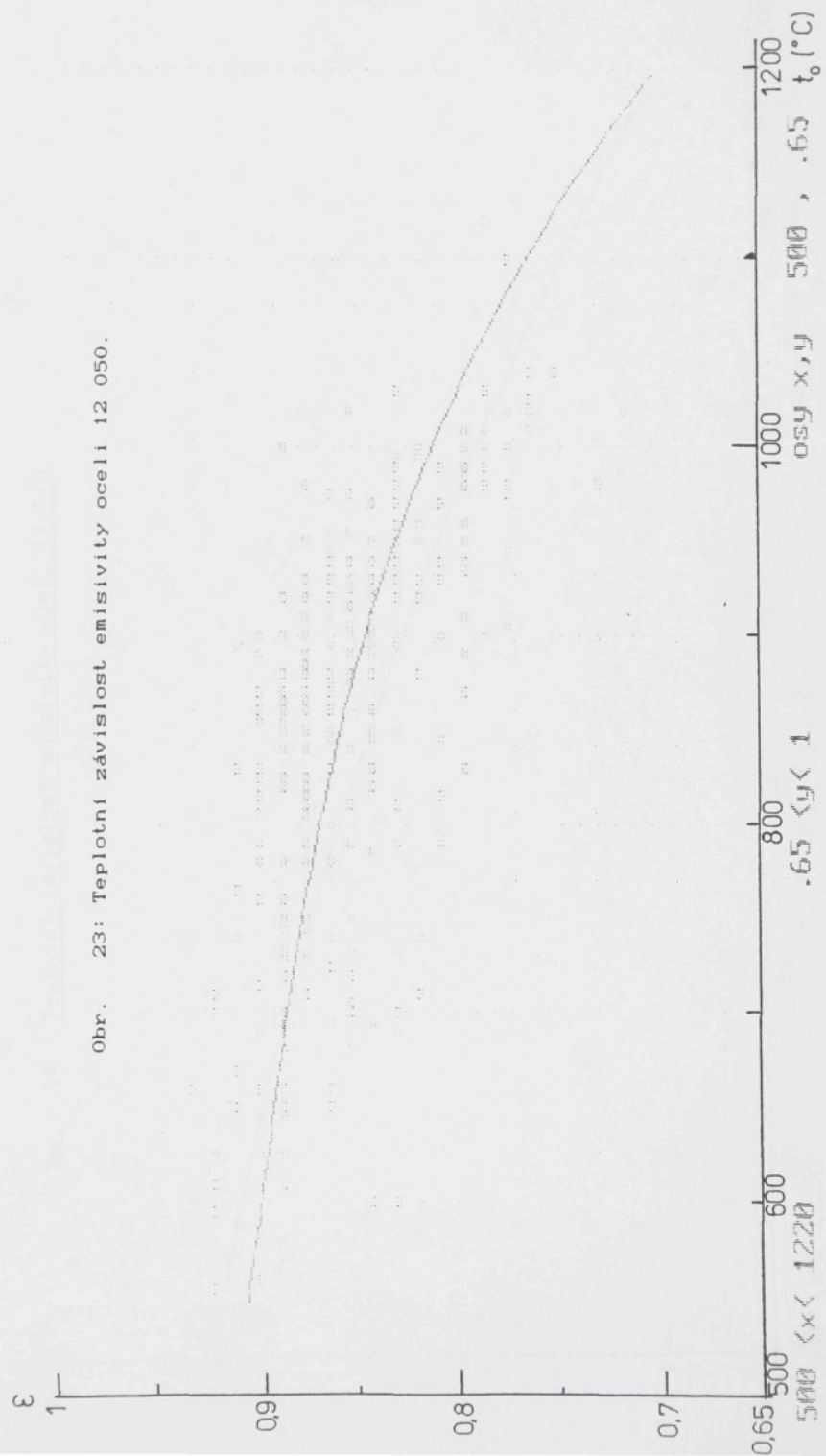
Obr. 21: Teplotní závislost emisivity oceli 11 900.



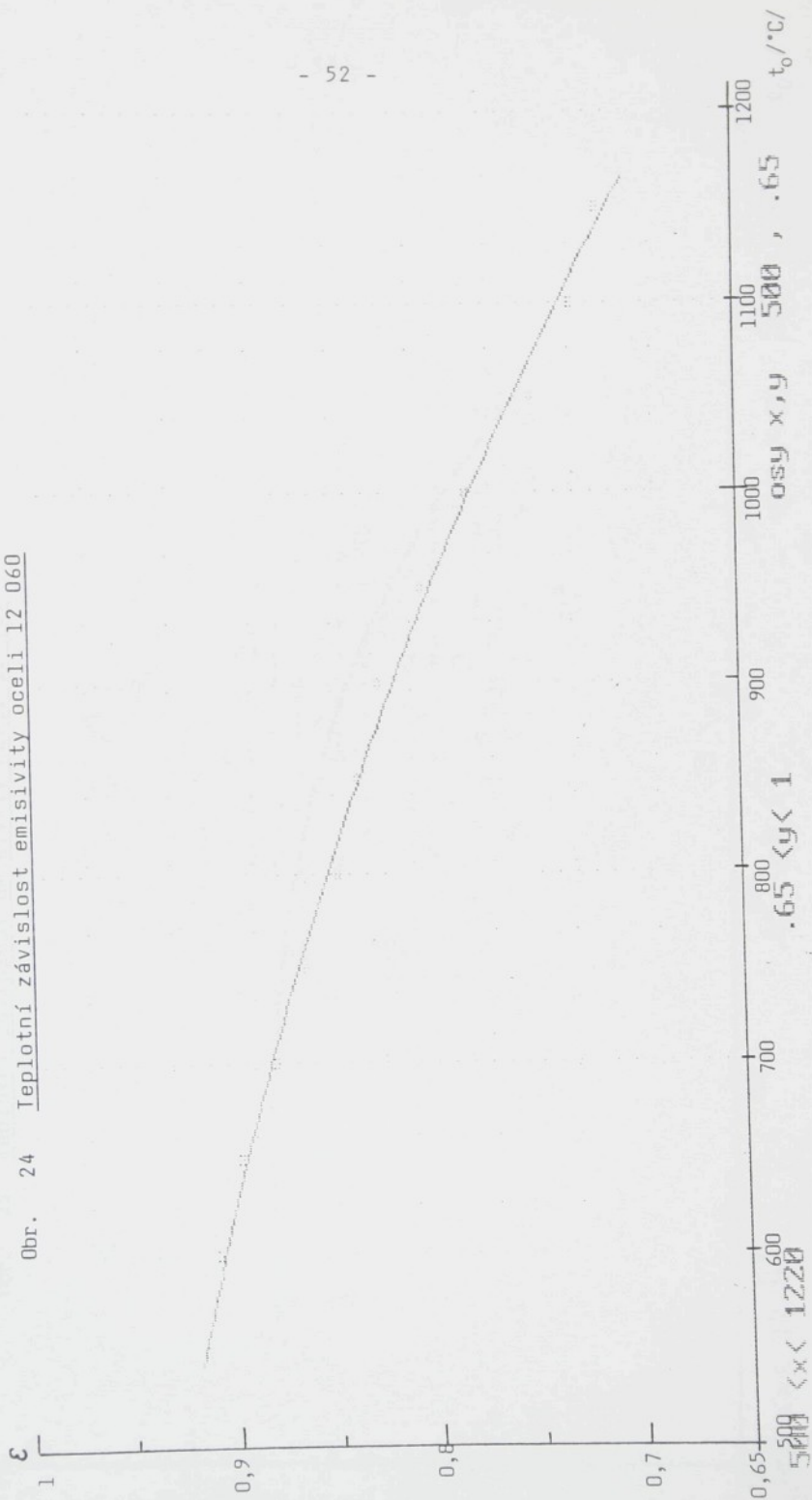


Obr. 22: Teplotní závislost emisivity oceli 12 040.

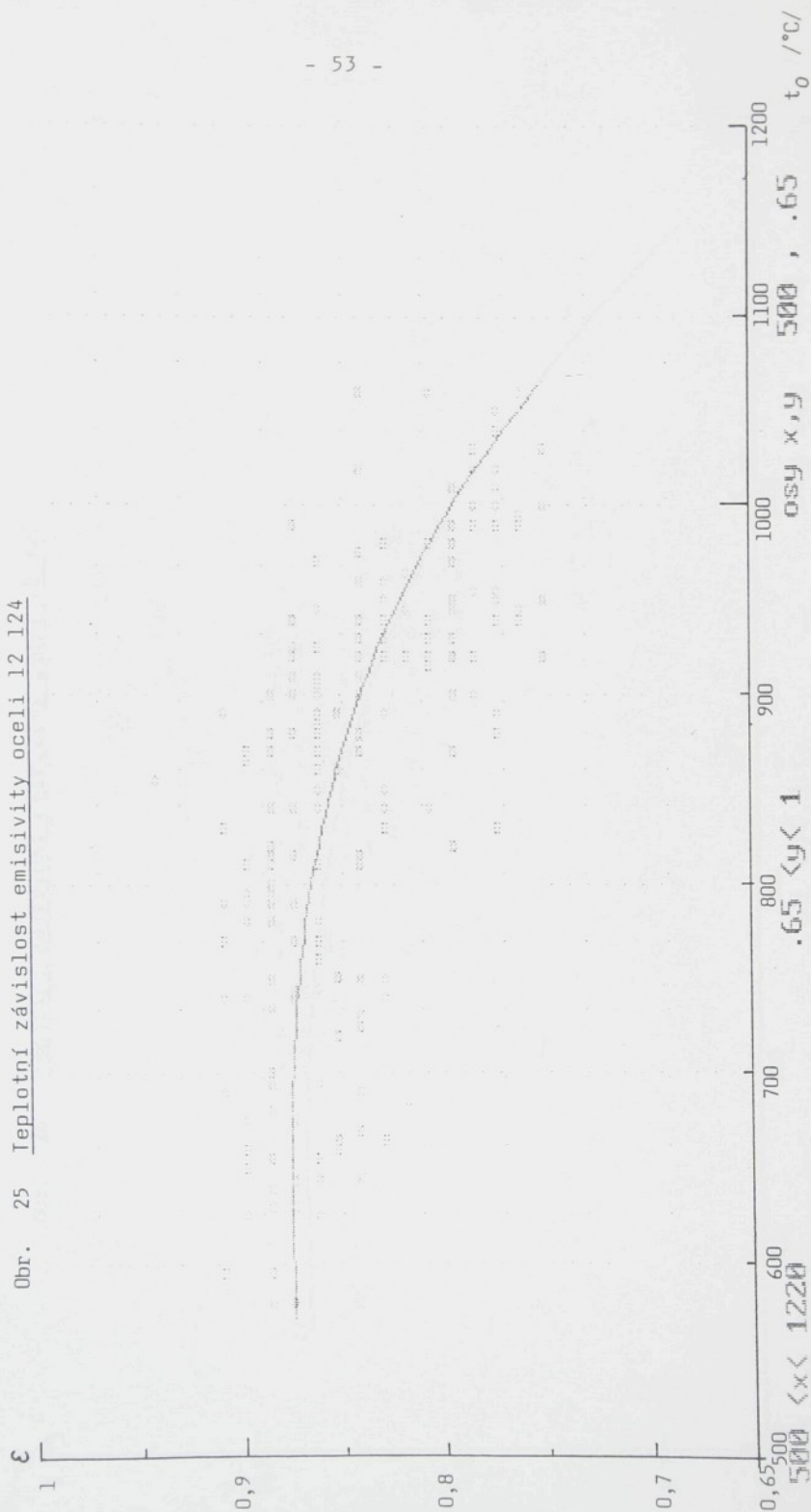
Obr. 23: Teplotní závislost emisivity oceli 12 050.

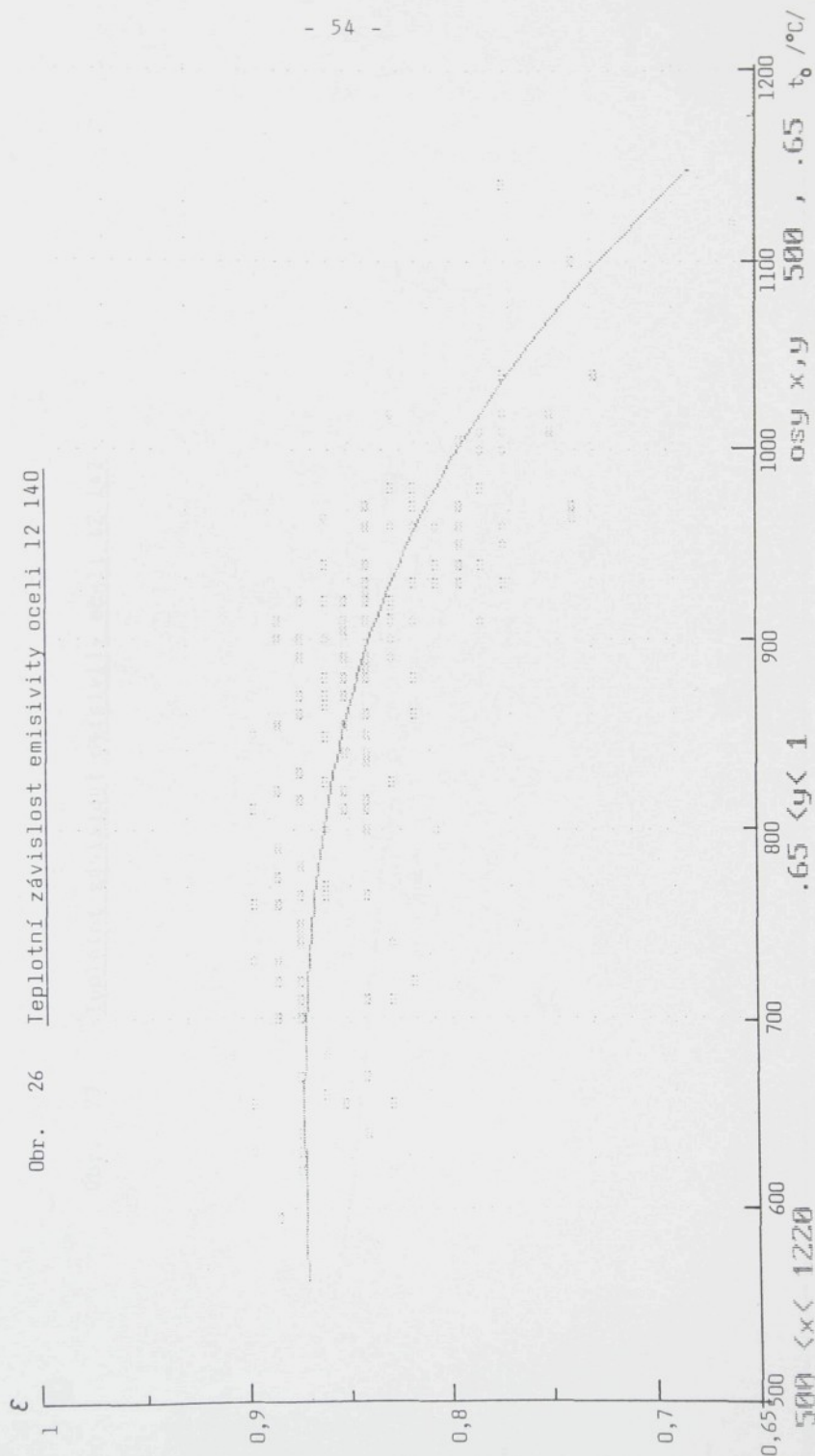


Obr. 24 Teplotní závislost emisivity oceli 12 060



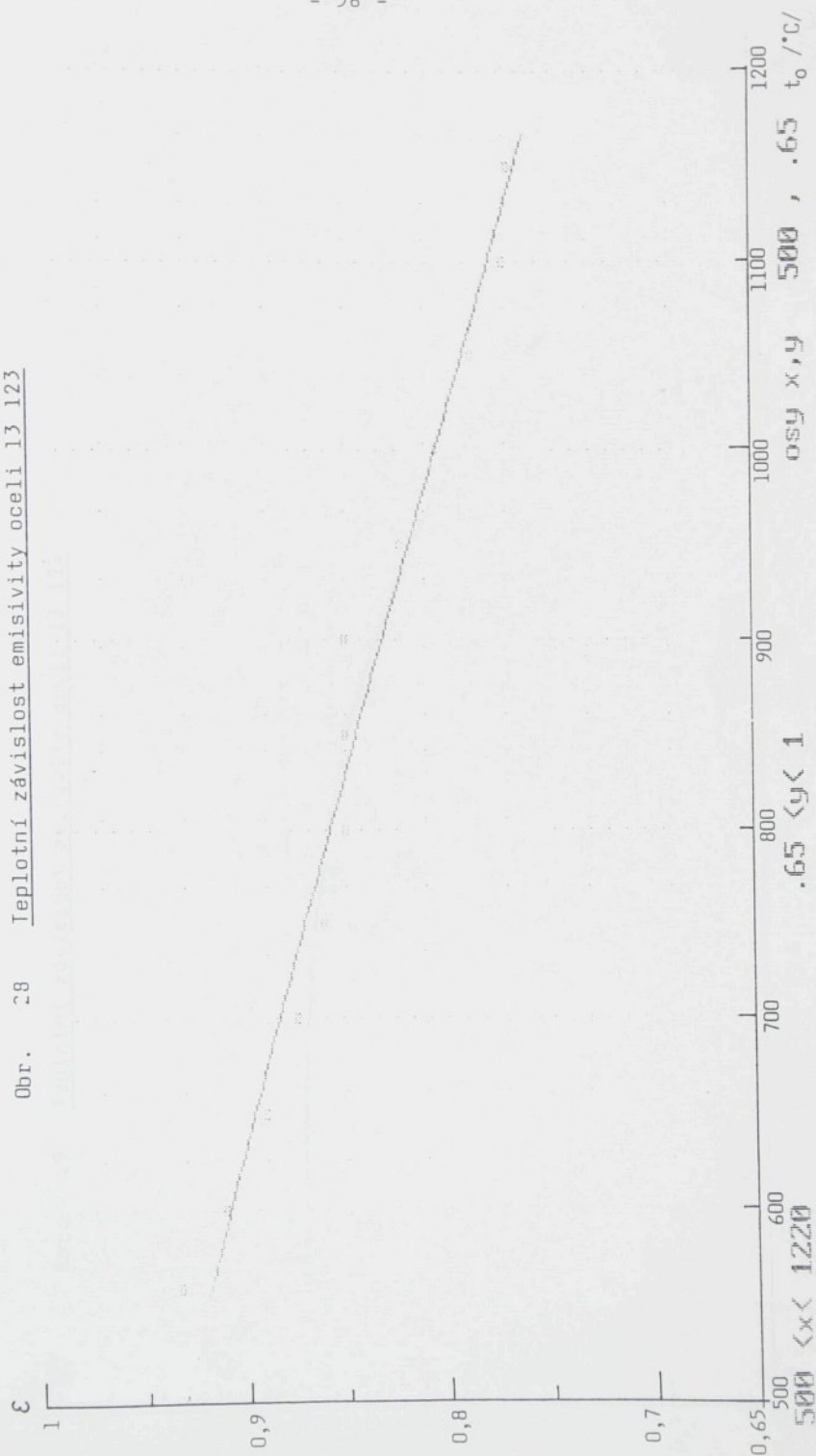
Obr. 25 Teplotní závislost emisivity oceli 12 124



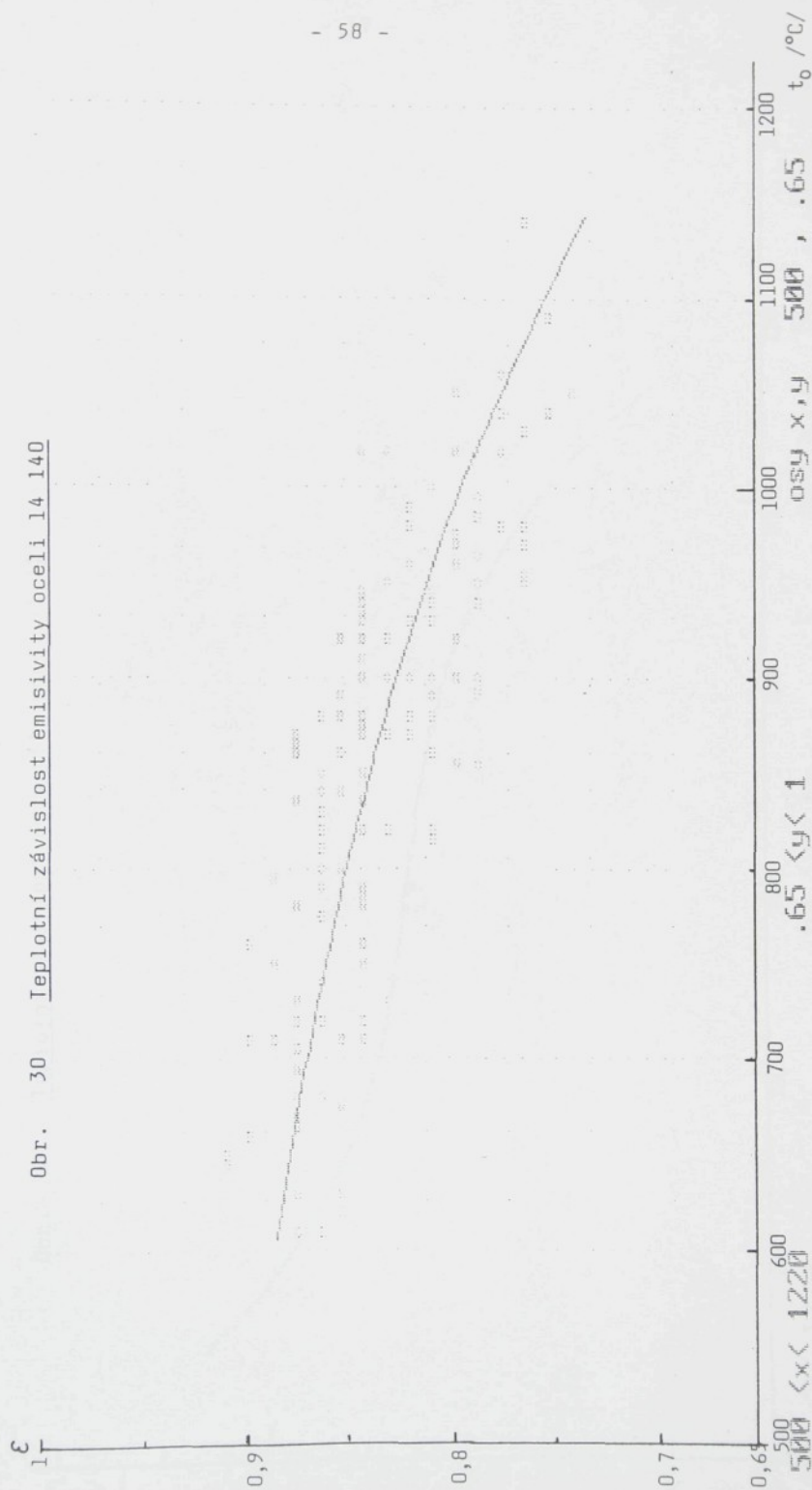


0br. 27 Teplotní závislost emisivity oceli 12 142

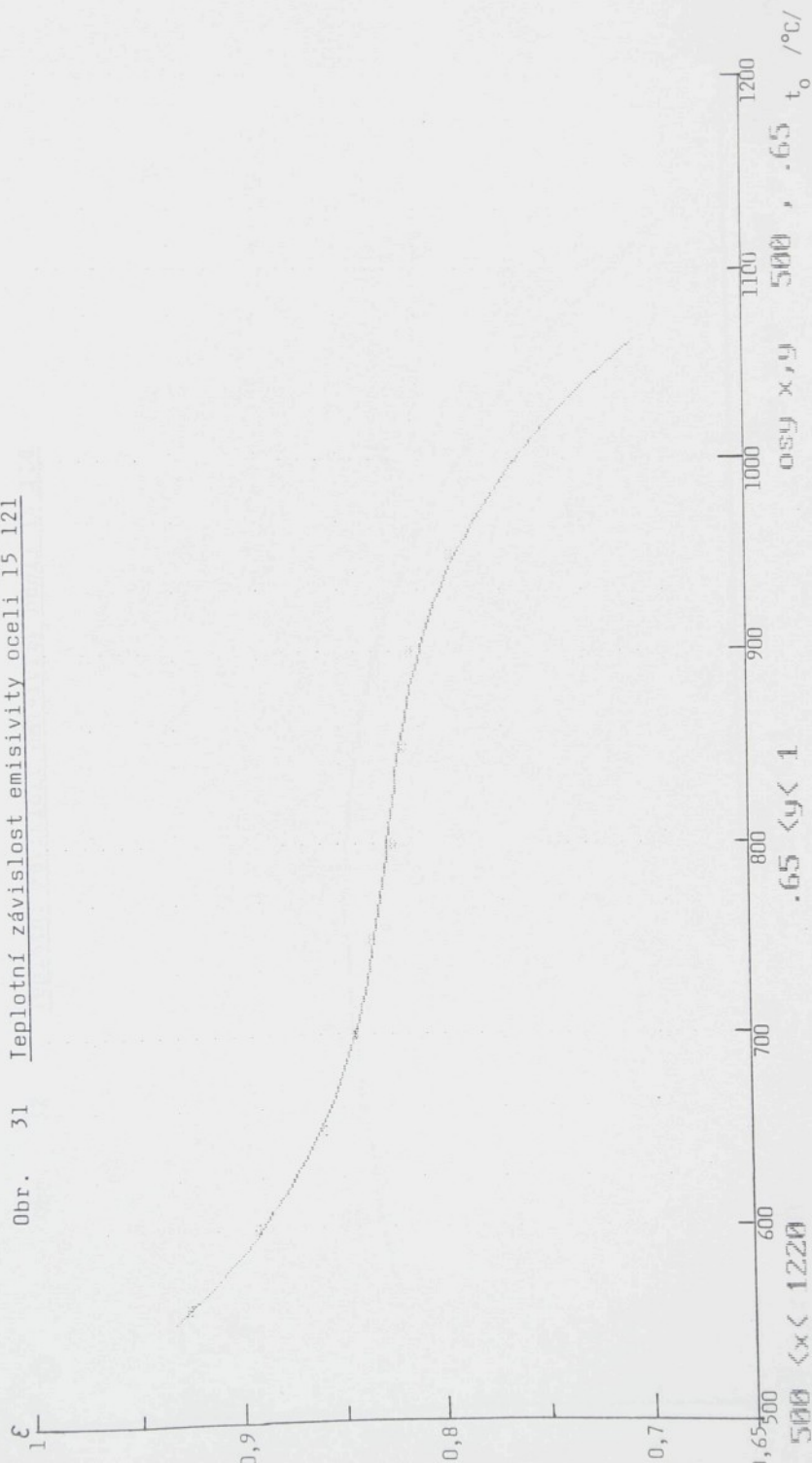
Obr. 28 Teplotní závislost emisivity oceli 13 123



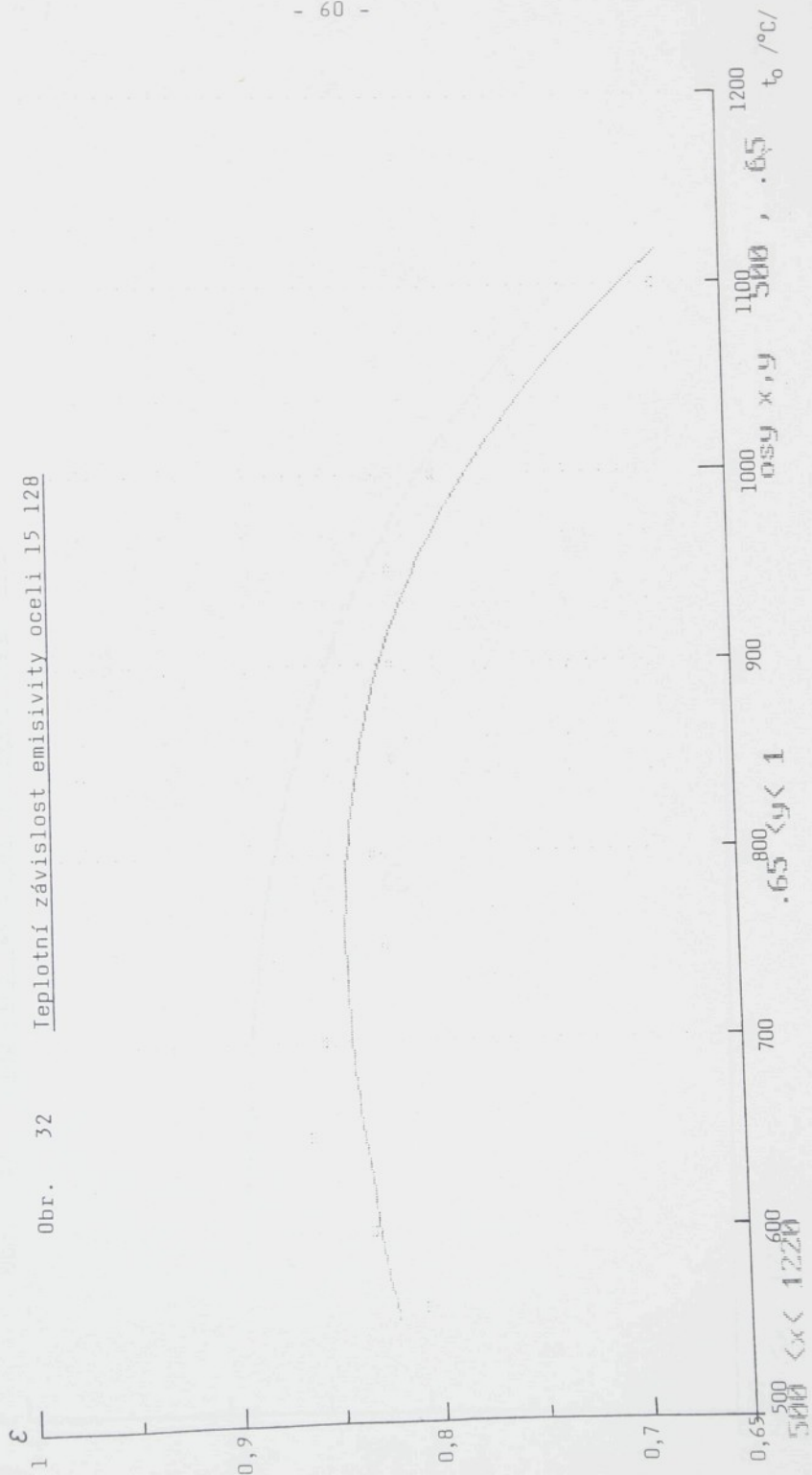
Obr. 30 Teplotní závislost emisivity oceli 14 140



Obr. 31 Teplotní závislost emisivity oceli 15 121



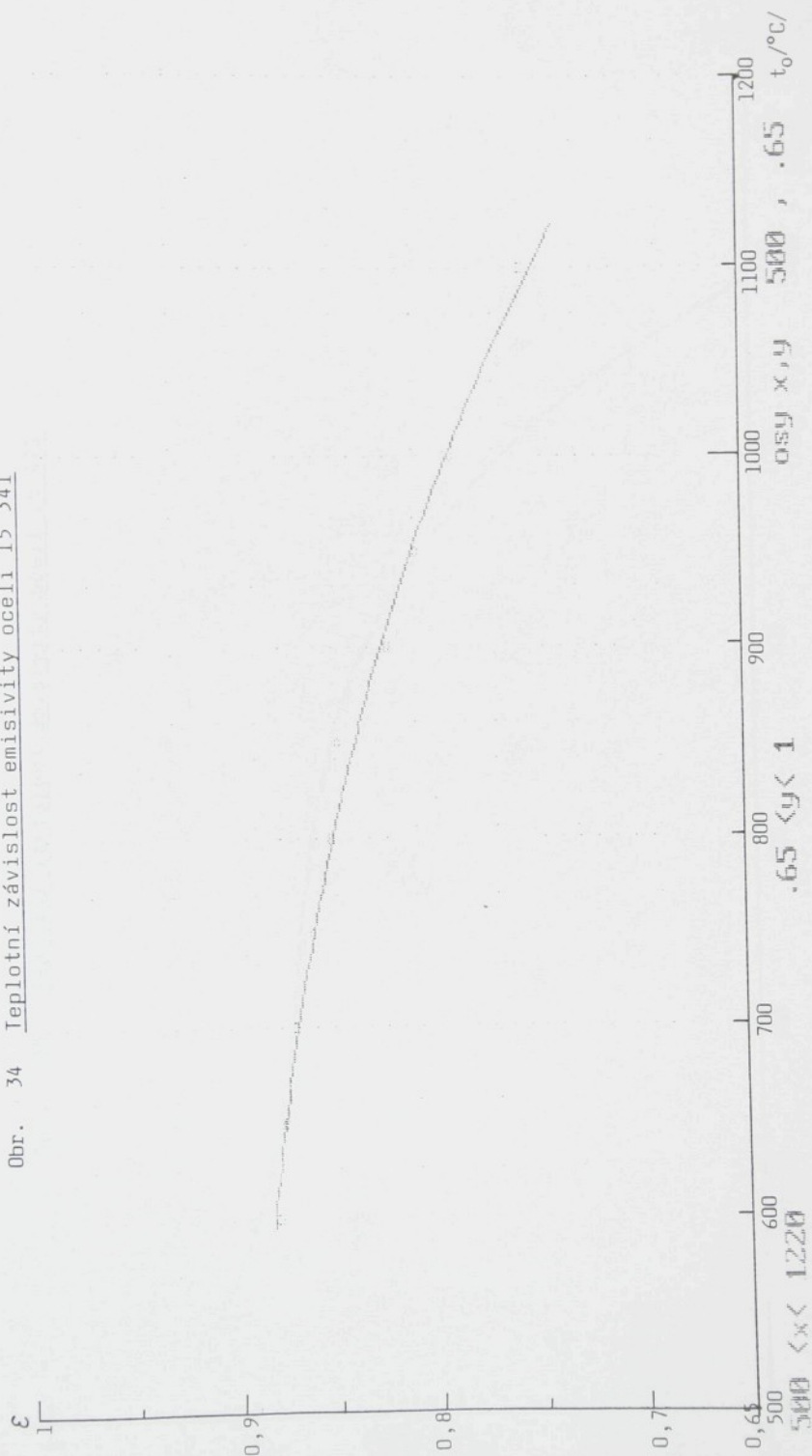
Obz. 32 Teplotní závislost emisivity oceli 15 128



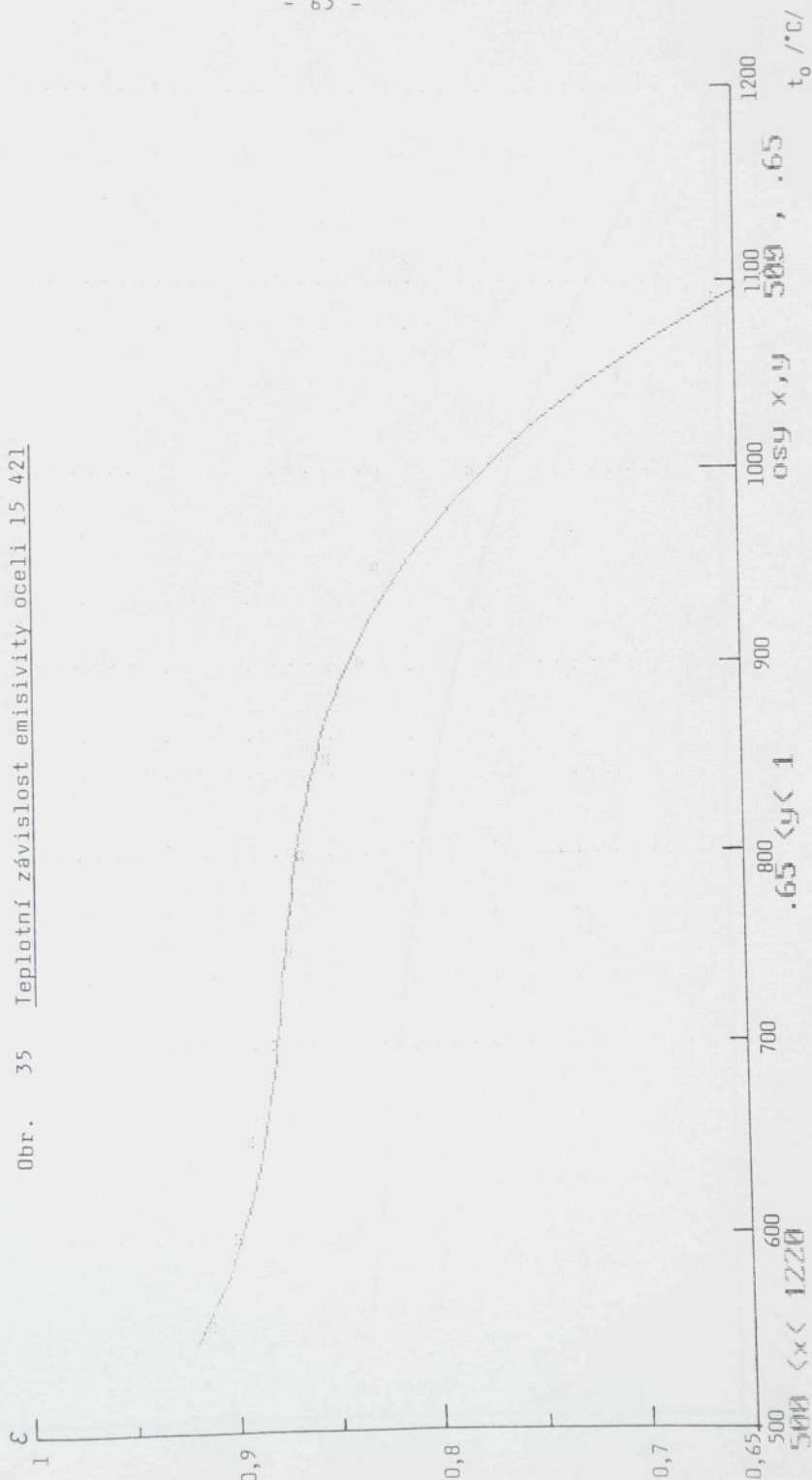
Obr. 33 Teplotní závislost emisivity oceli 15 235



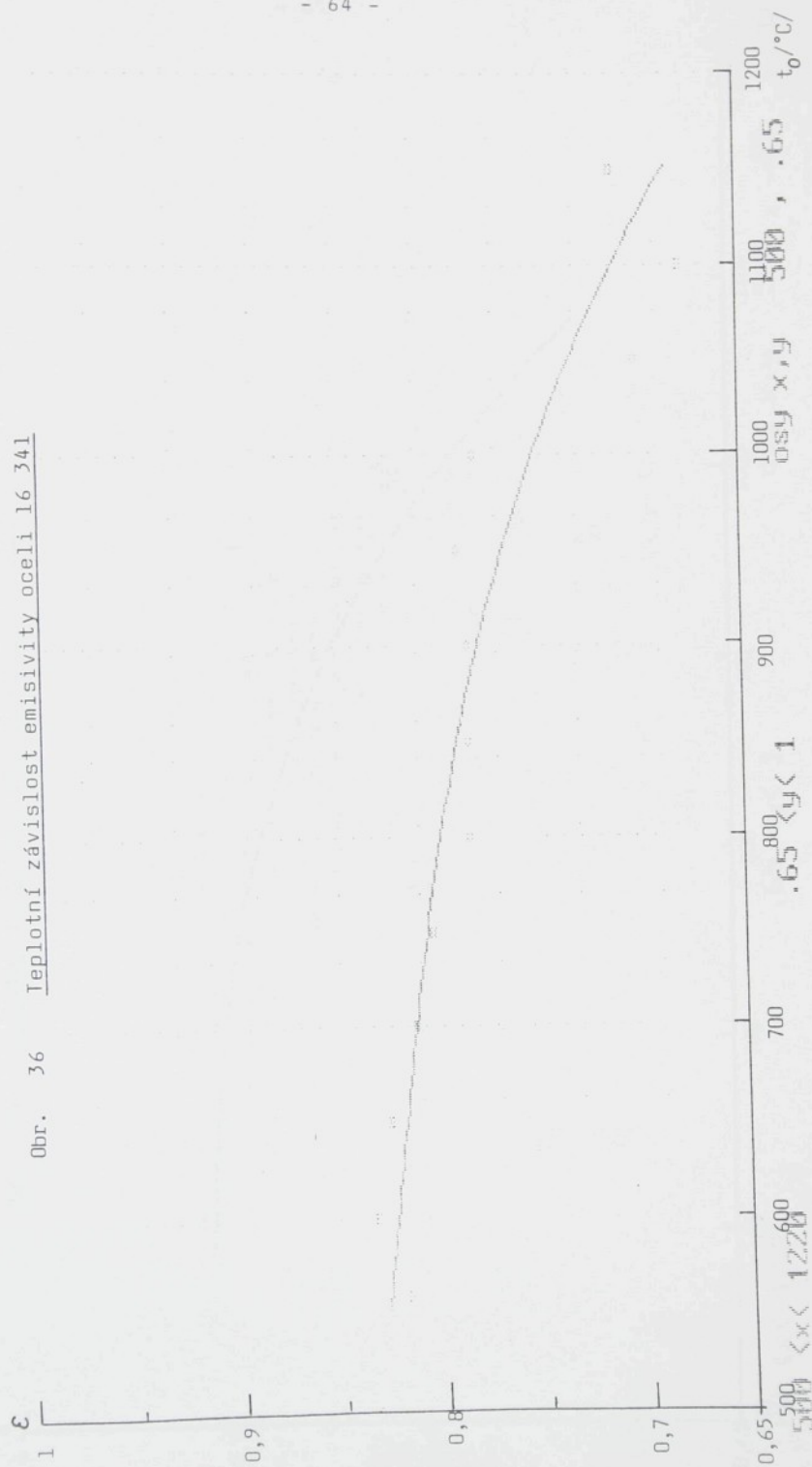
Obr. 34 Teplotní závislost emisivity oceli 15 341



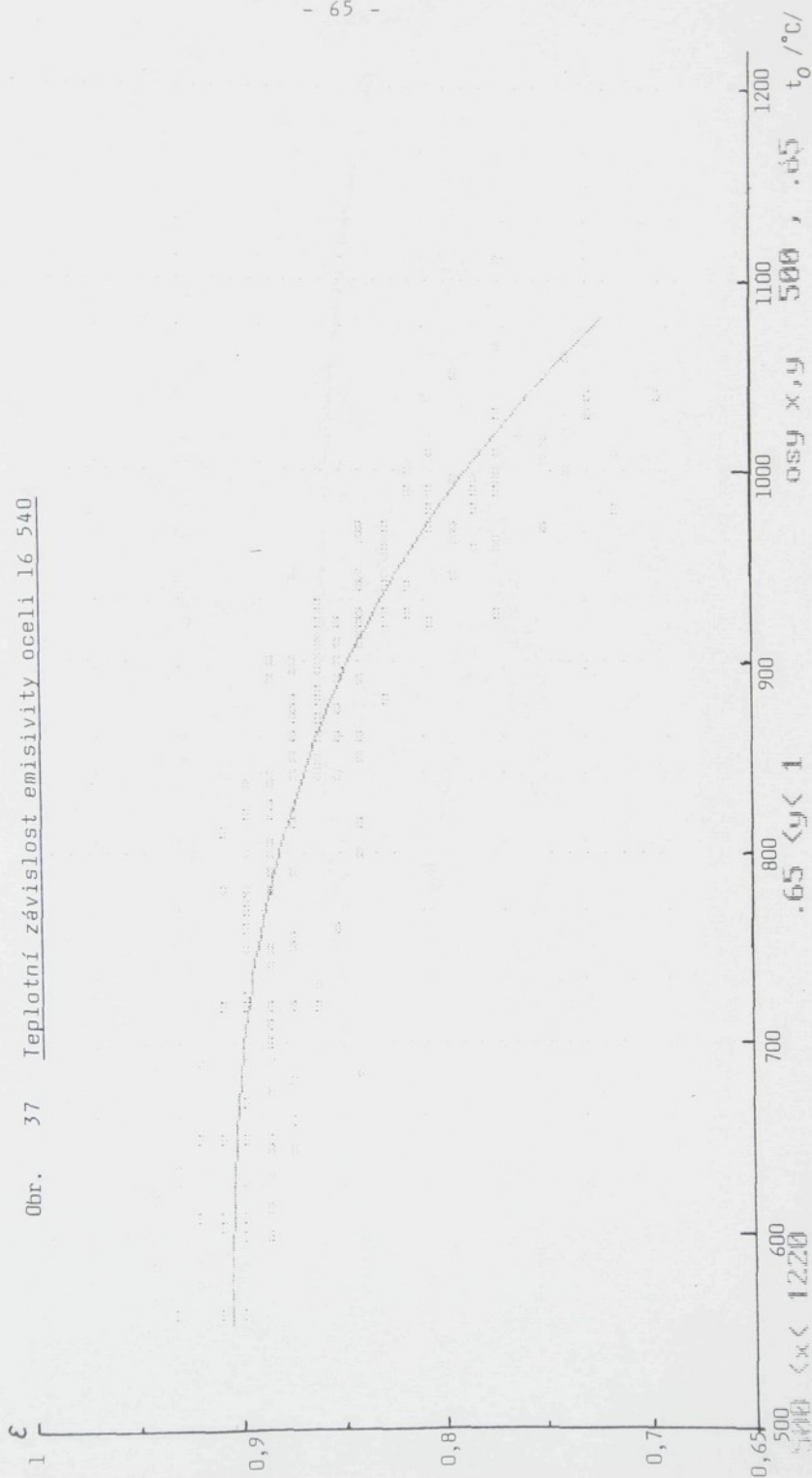
Obr. 35 Teplotní závislost emisivity oceli 15 421



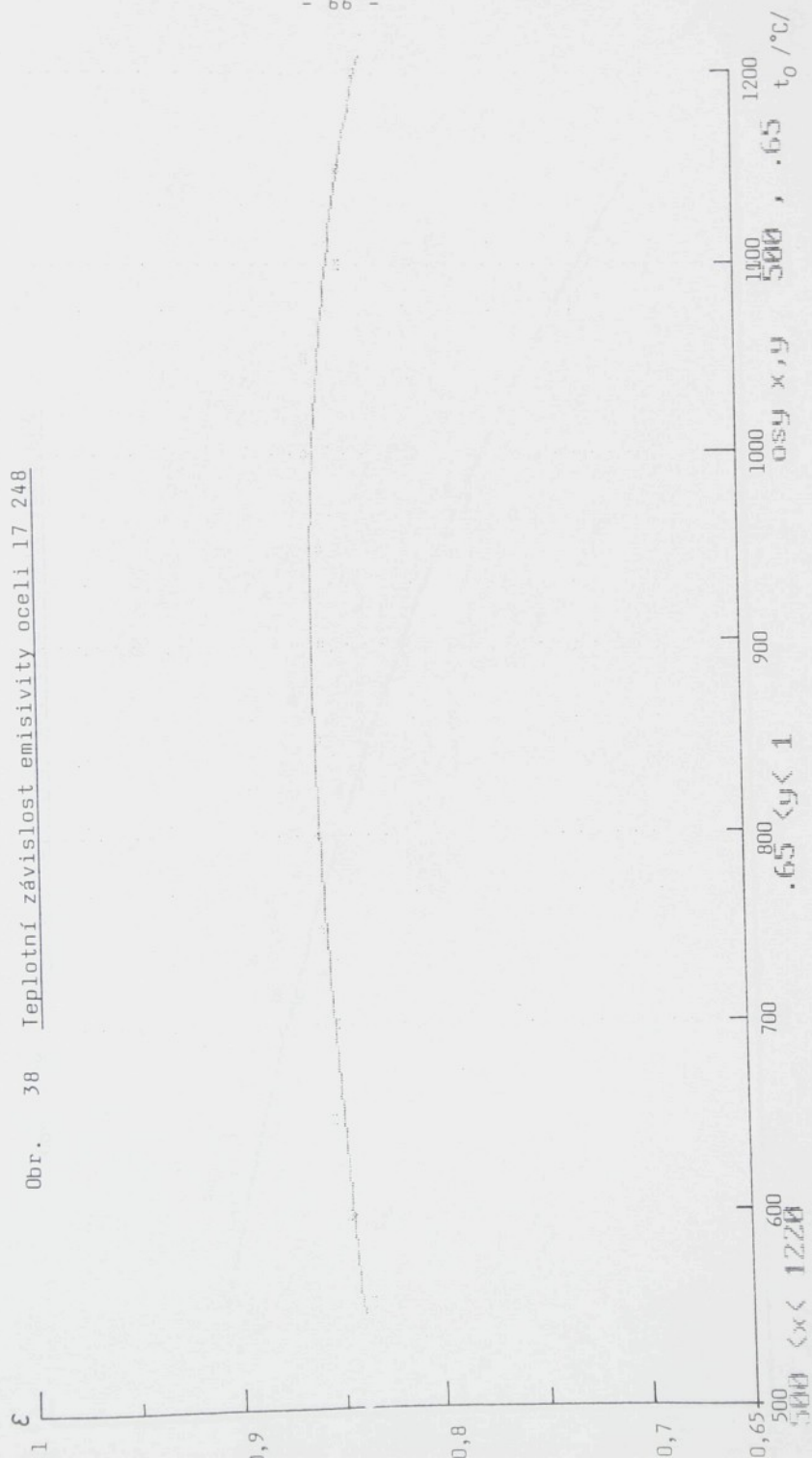
Obr. 36 Teplotní závislost emisivity oceli 16 341



Obr. 37 Teplotní závislost emisivity oceli 16 540

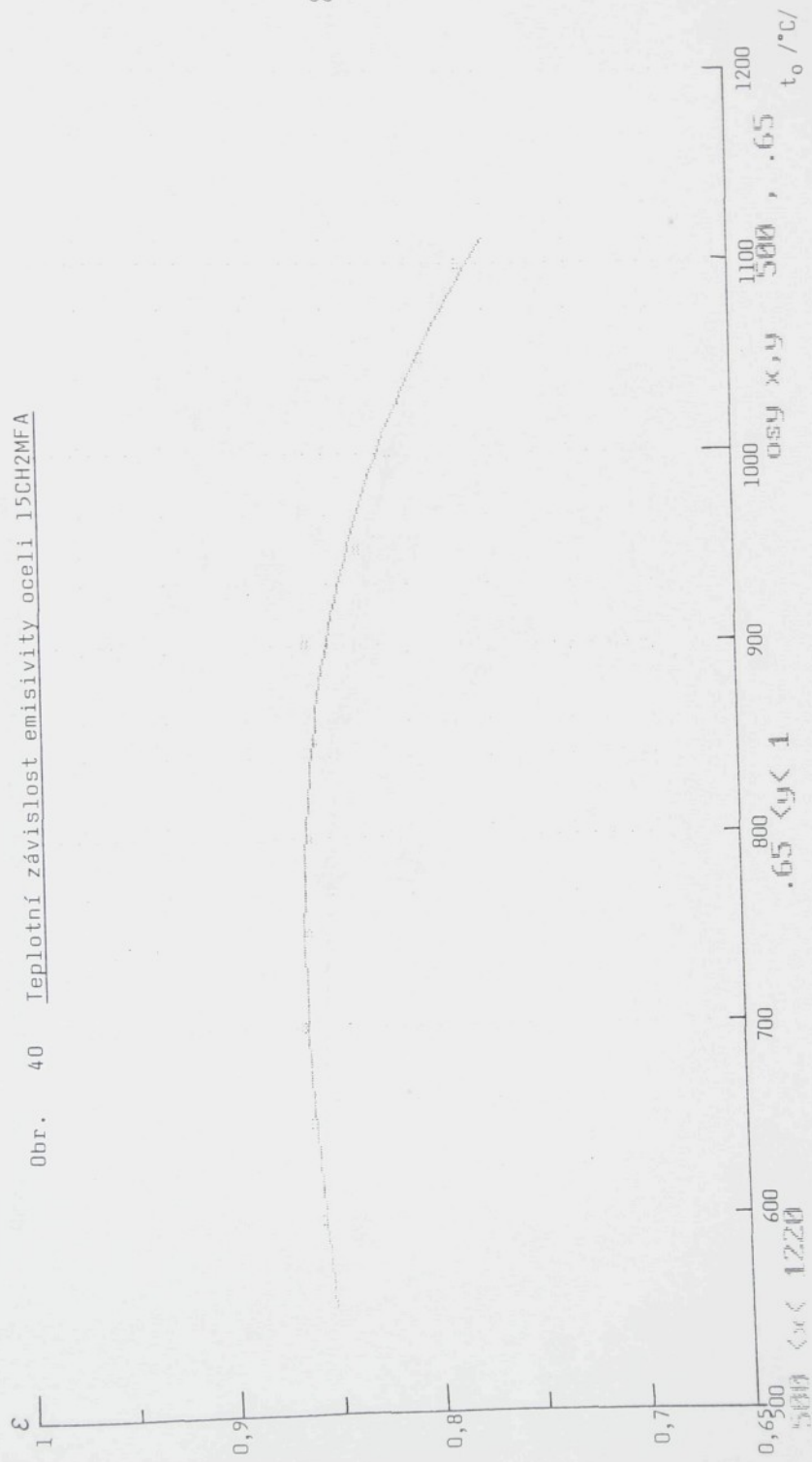


Obr. 38 Teplotní závislost emisivity oceli 17 248

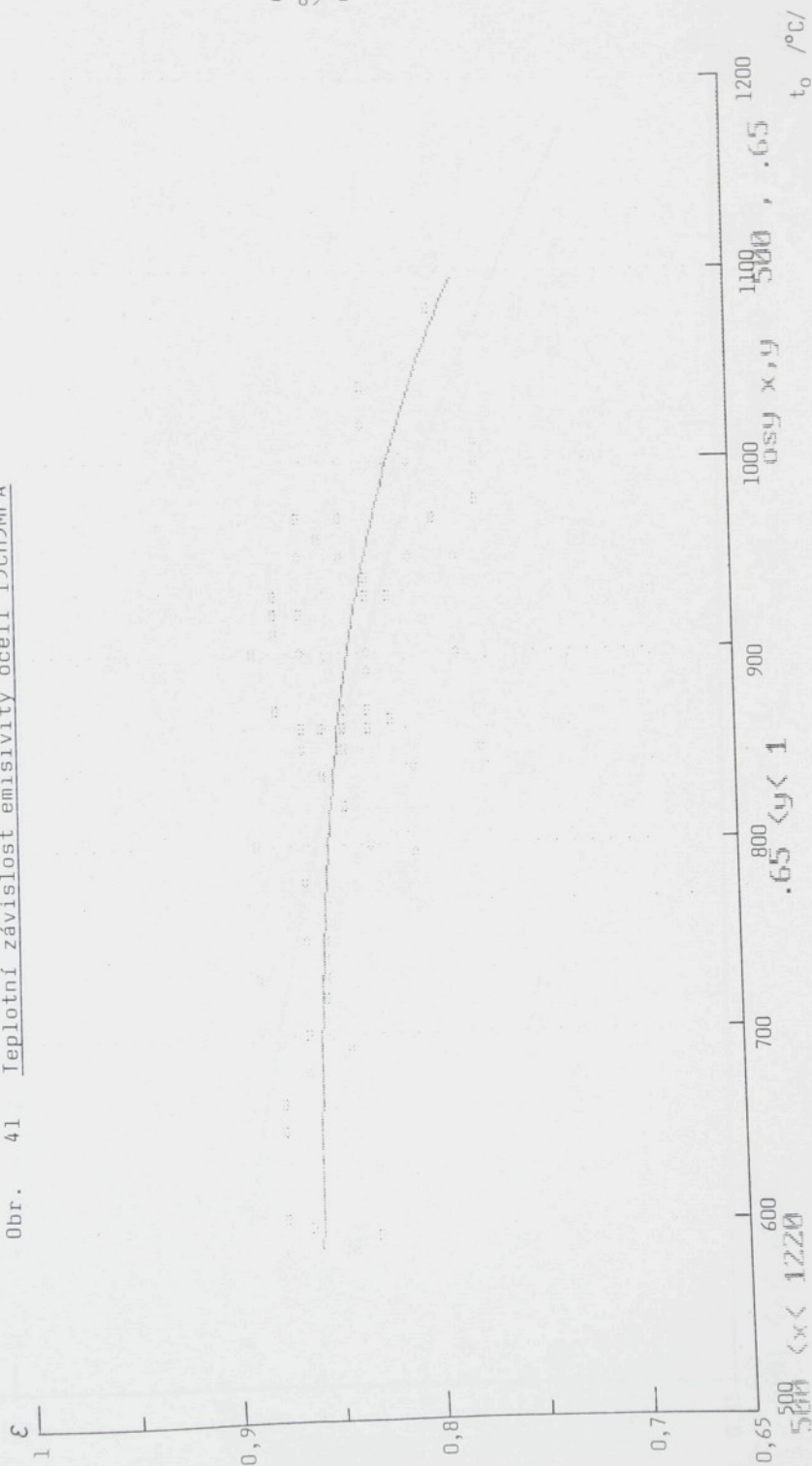


39 Obr. 39 Teplotní závislost emisivity oceli 10GN2MFA

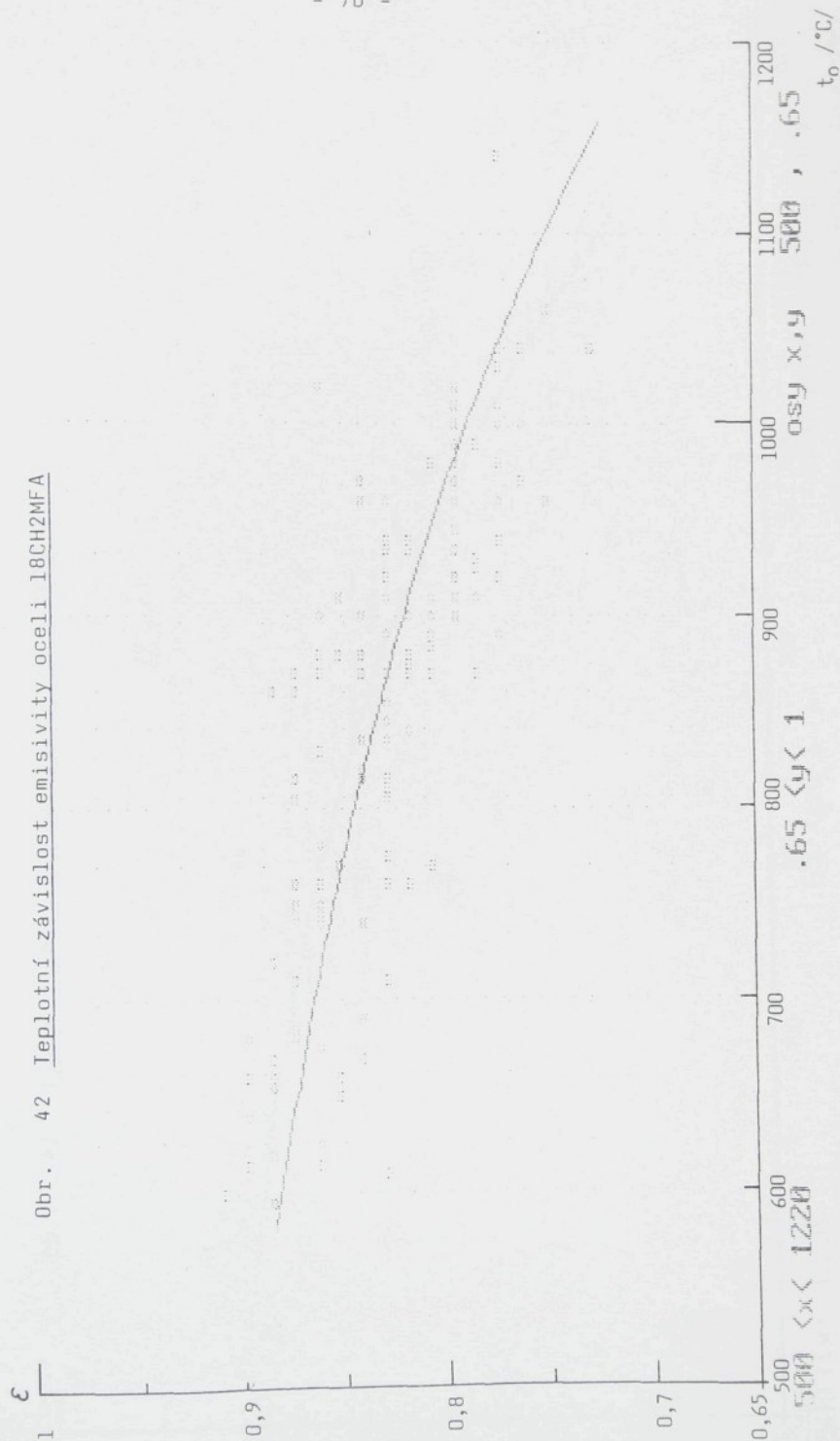
Obr. 40 Teplotní závislost emisivity oceli 15CH2MFA



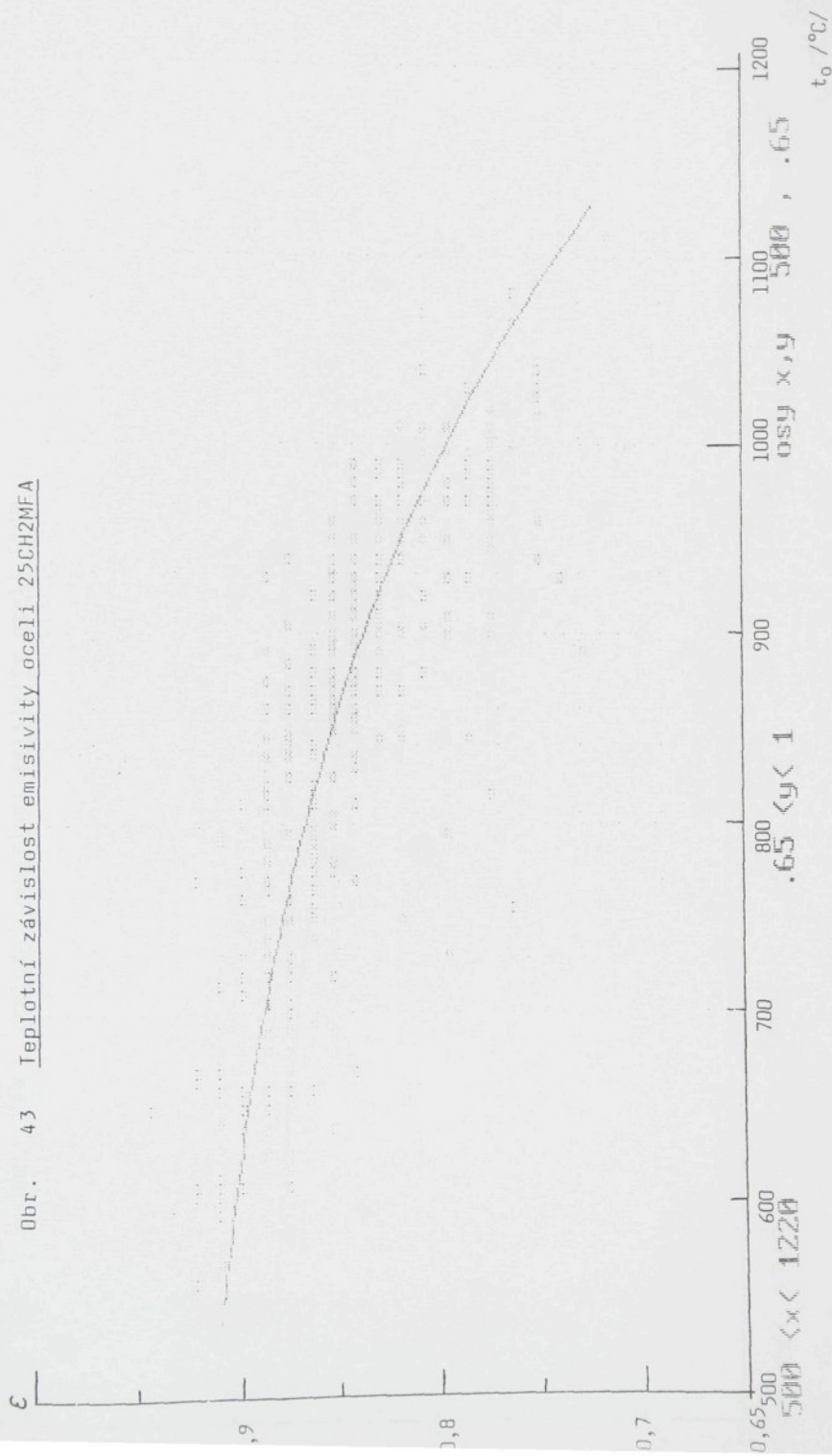
Obr. 41 Teplotní závislost emisivity oceli 15CH3MFA



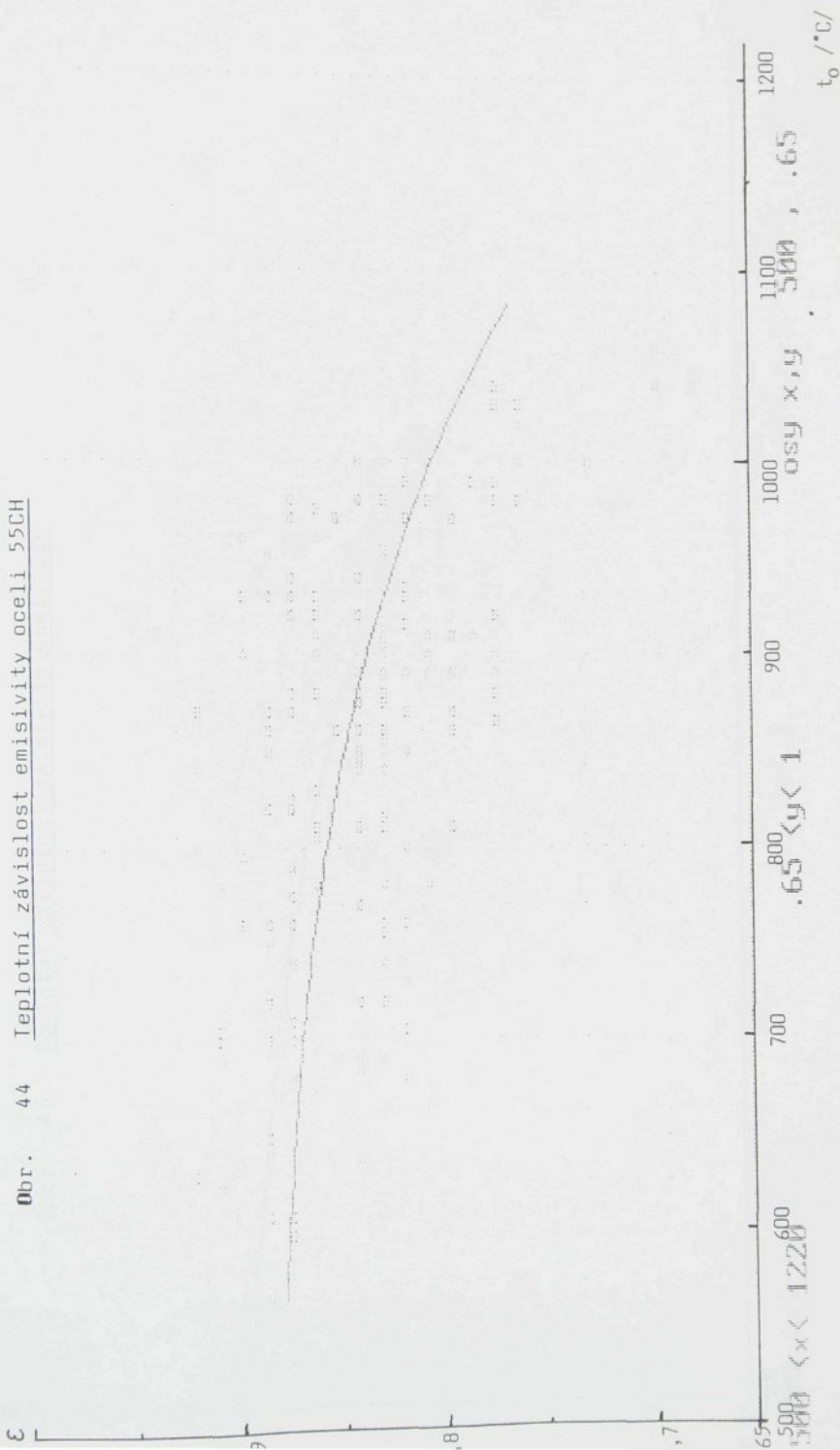
Obr. 42 Teplotní závislost emisivity oceli 18CH2MFA



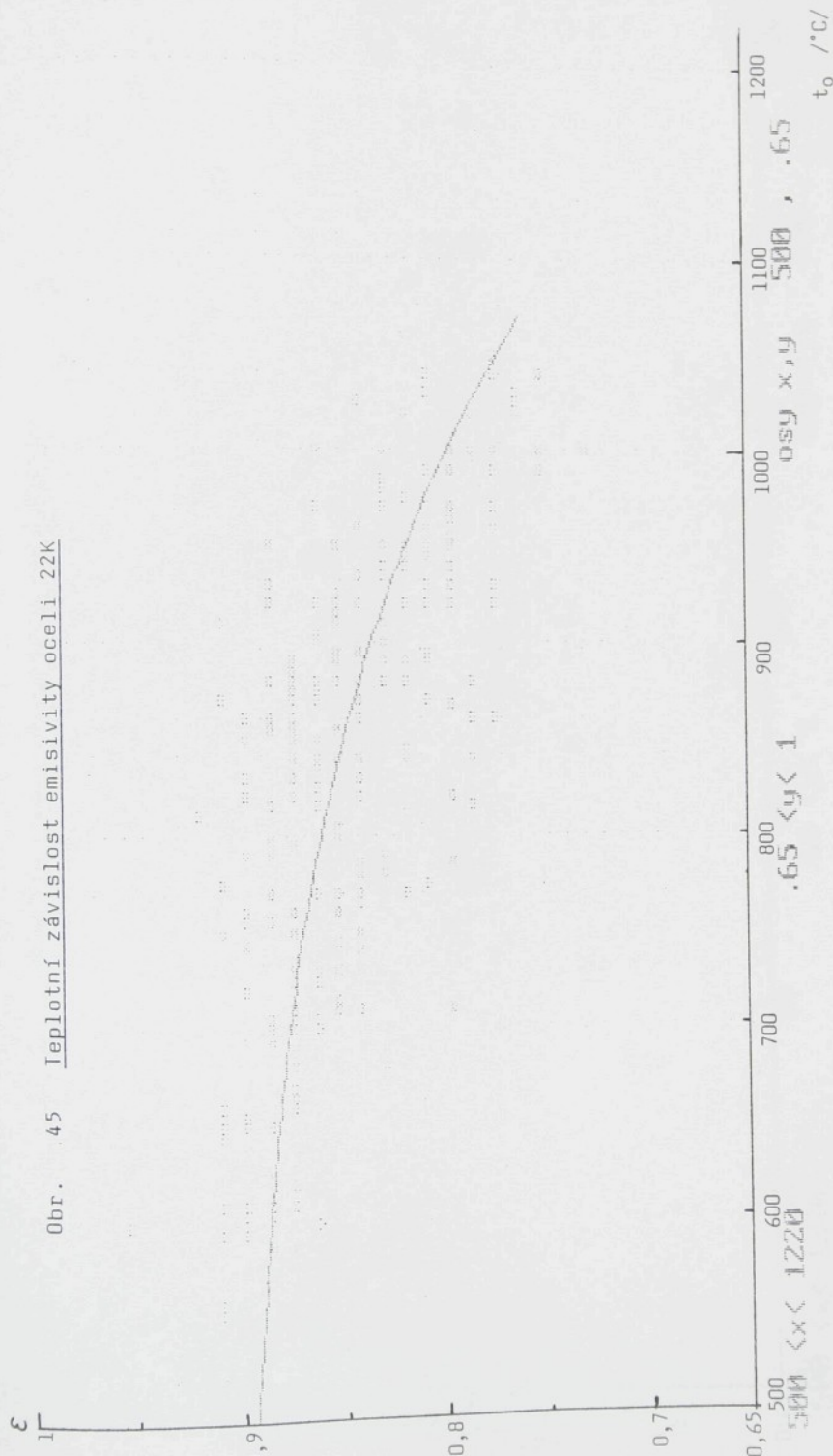
Obr. 43 Teplotní závislost emisivity oceli 25CH2MFA



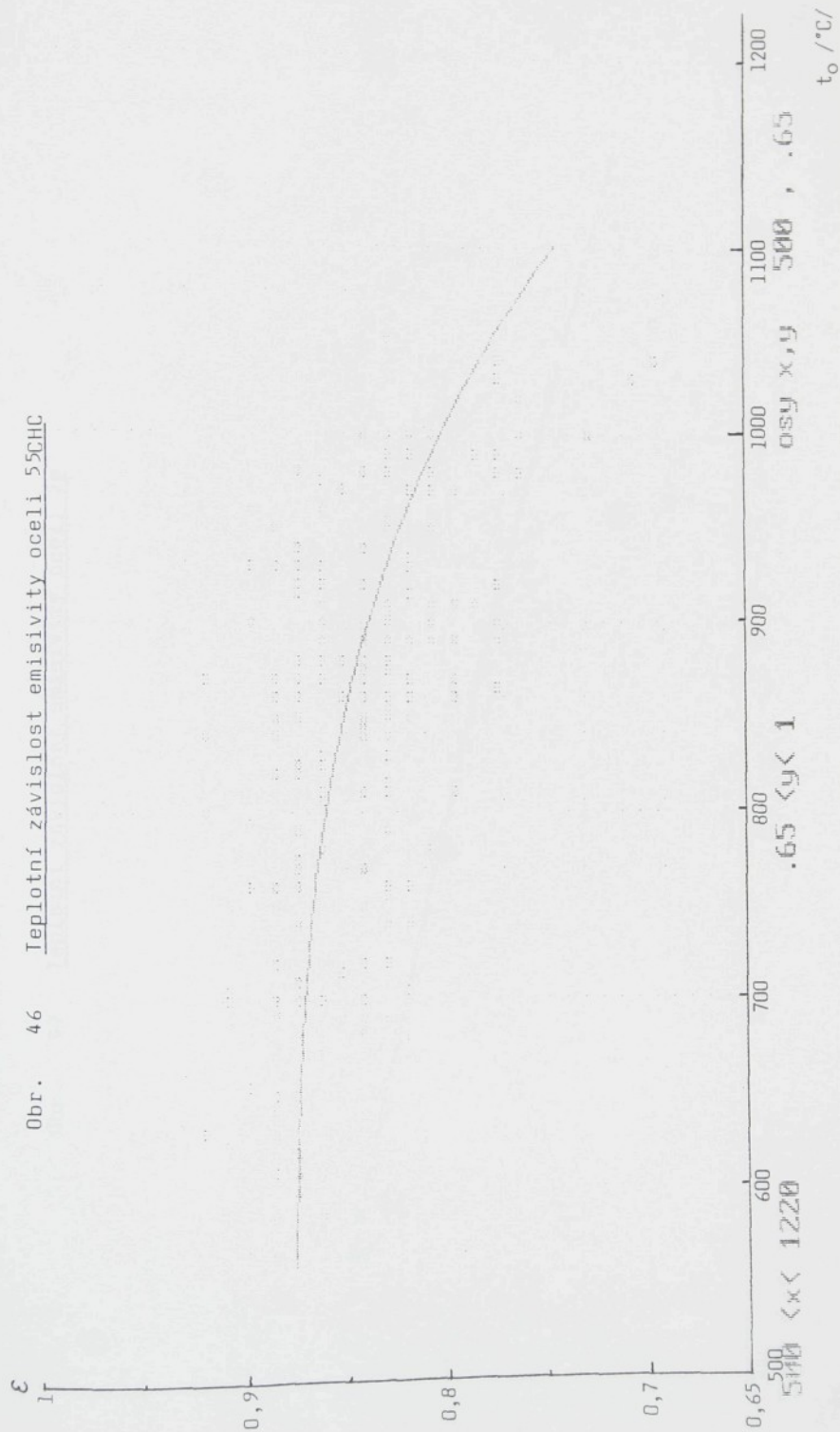
Obr. 44 Teplotní závislost emisivity oceli 55CH



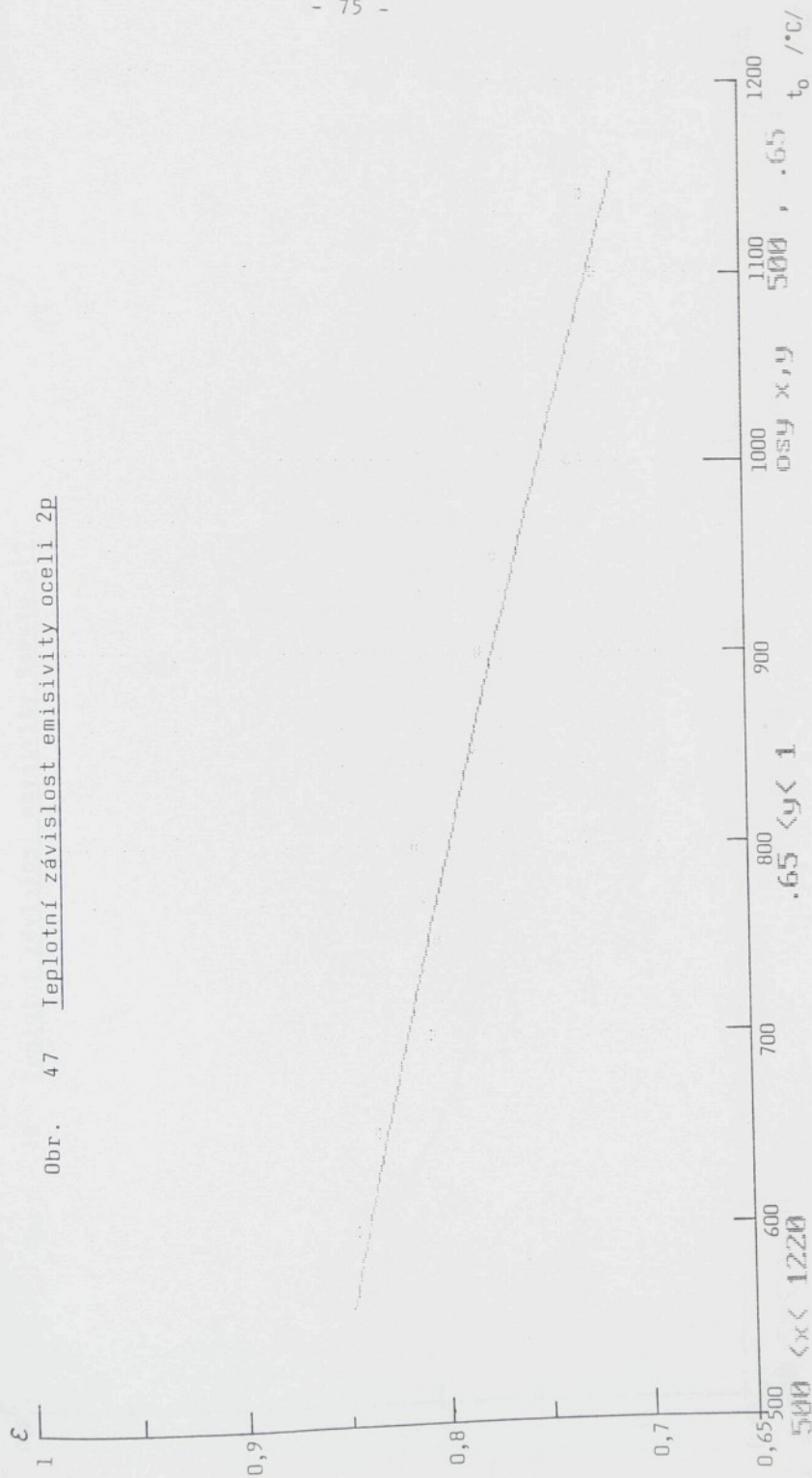
Obr. 45 Teplotní závislost emisivity oceli 22K



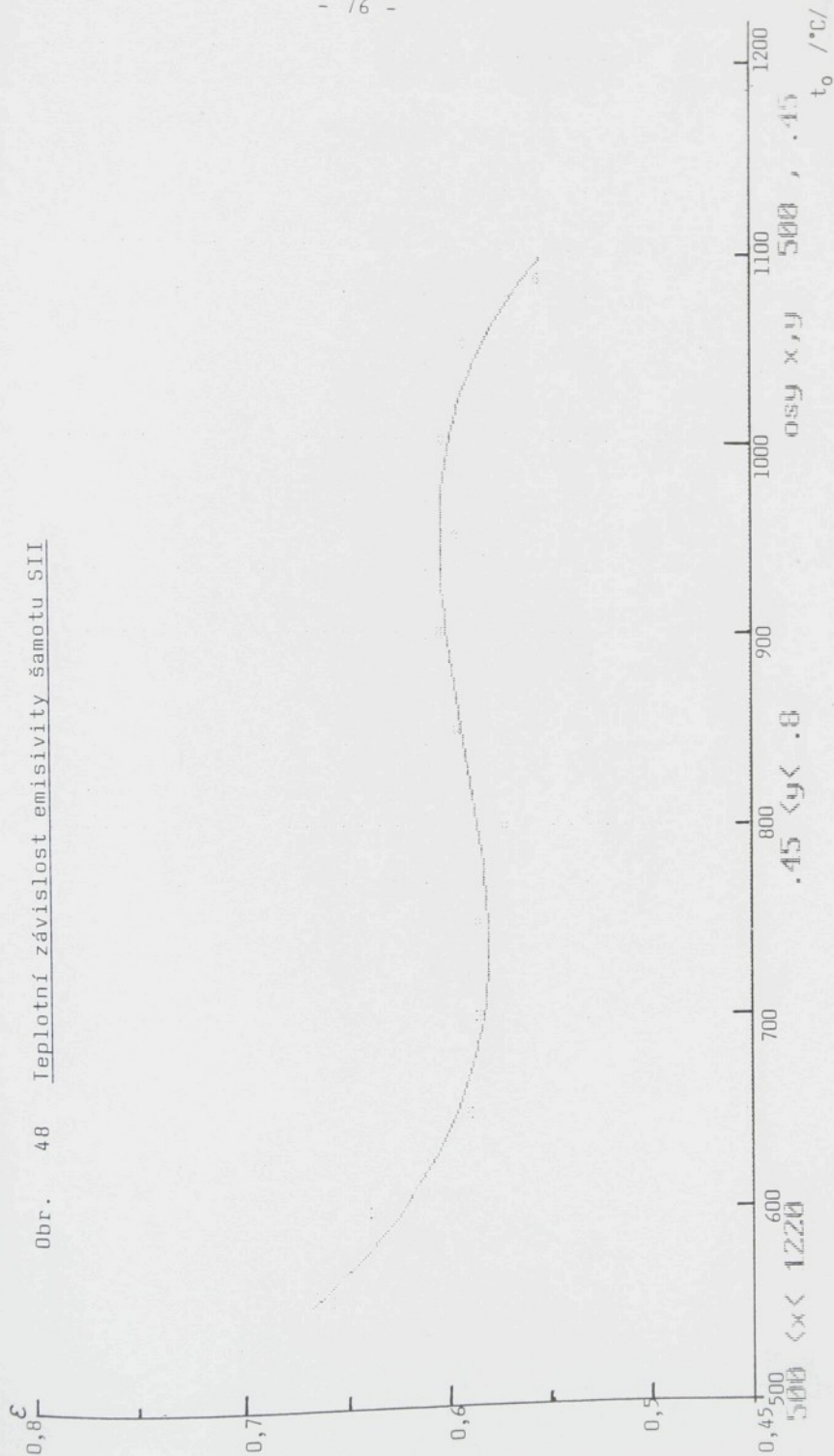
Obr. 46 Teplotní závislost emisivity oceli 55CHC



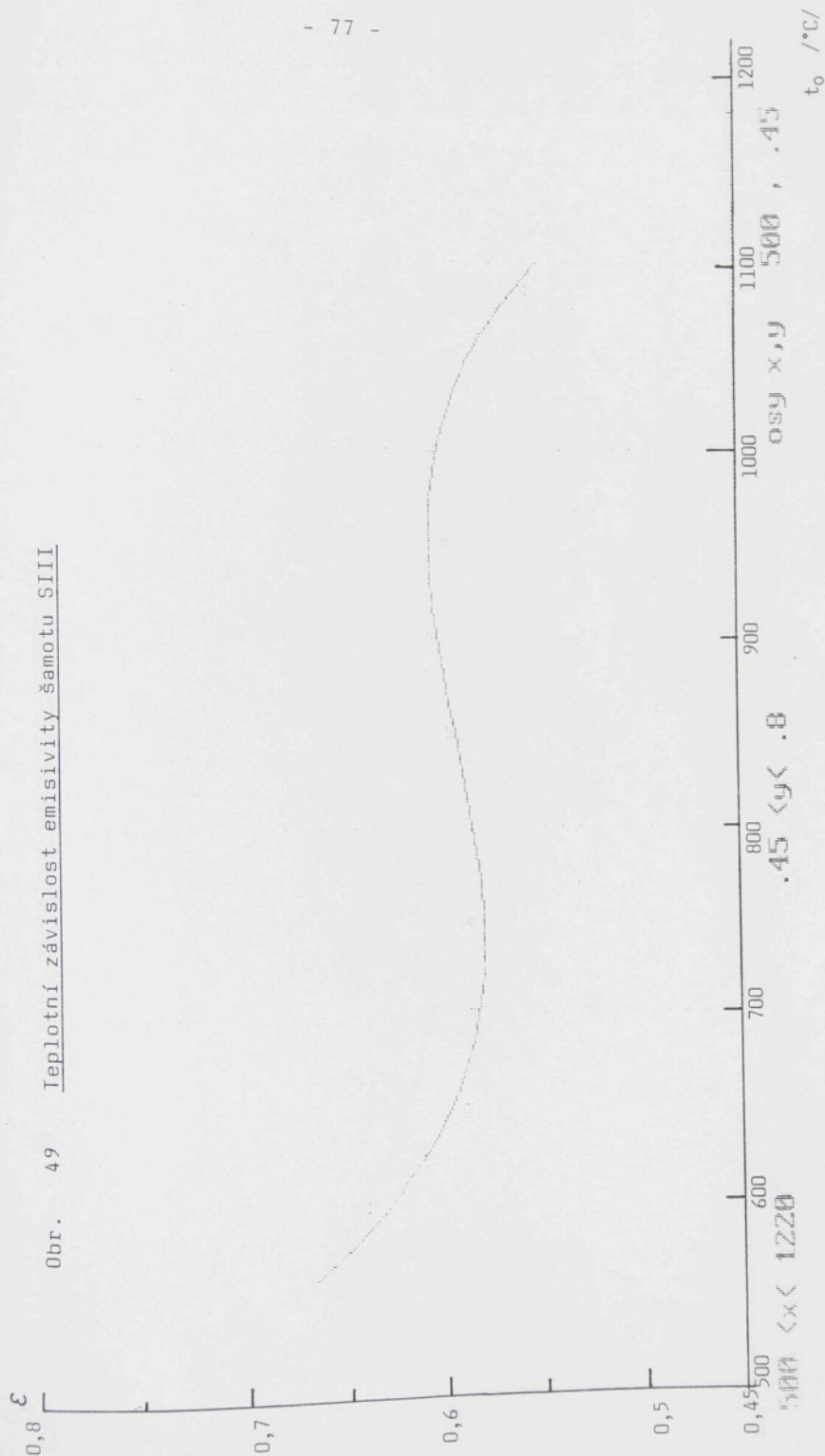
Obr. 47 Teplotní závislost emisivity oceli 2p



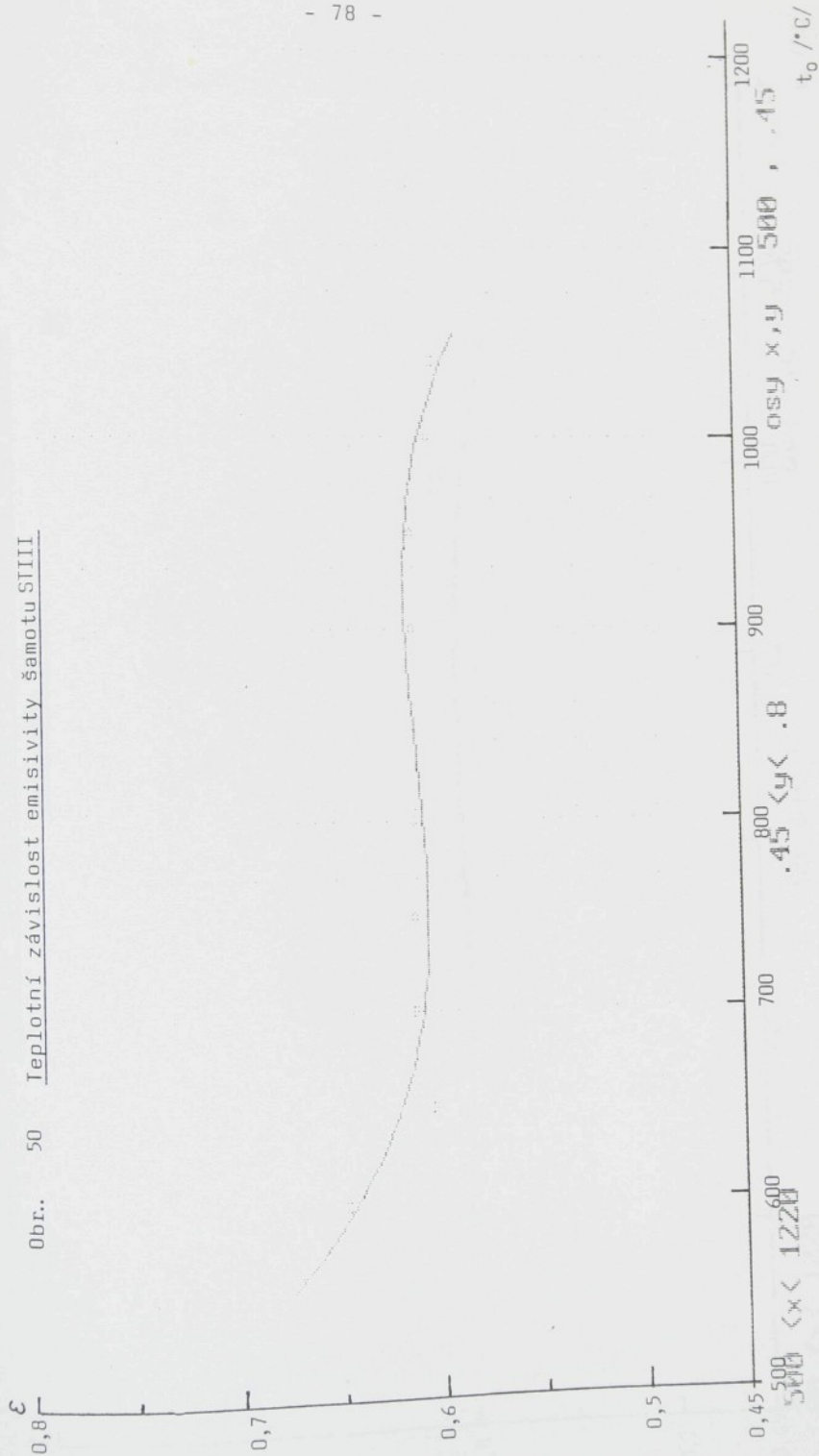
Obr. 48 Teplotní závislost emisivity šamotu SII



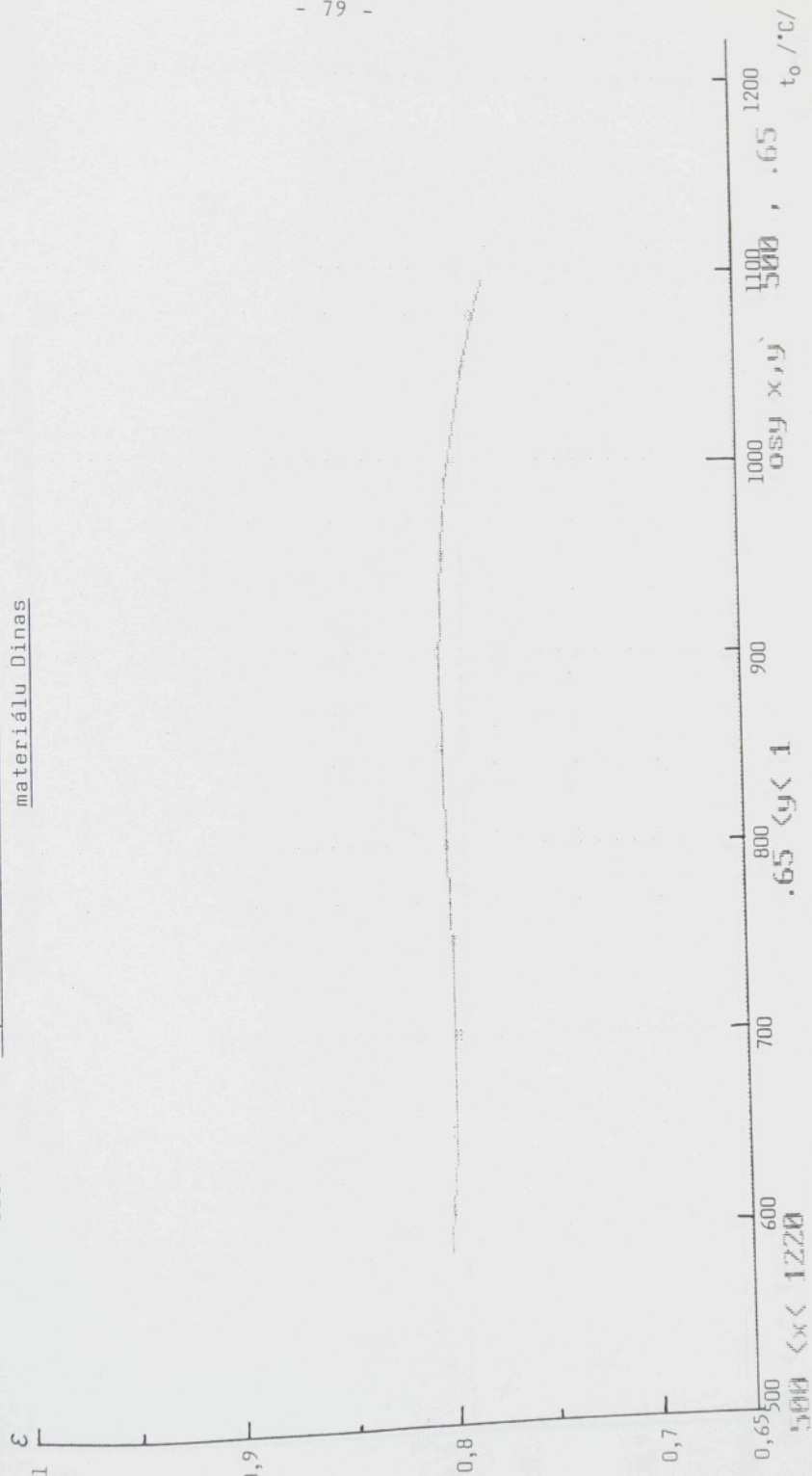
Obr. 49 Teplotní závislost emisivity šamotu SIII



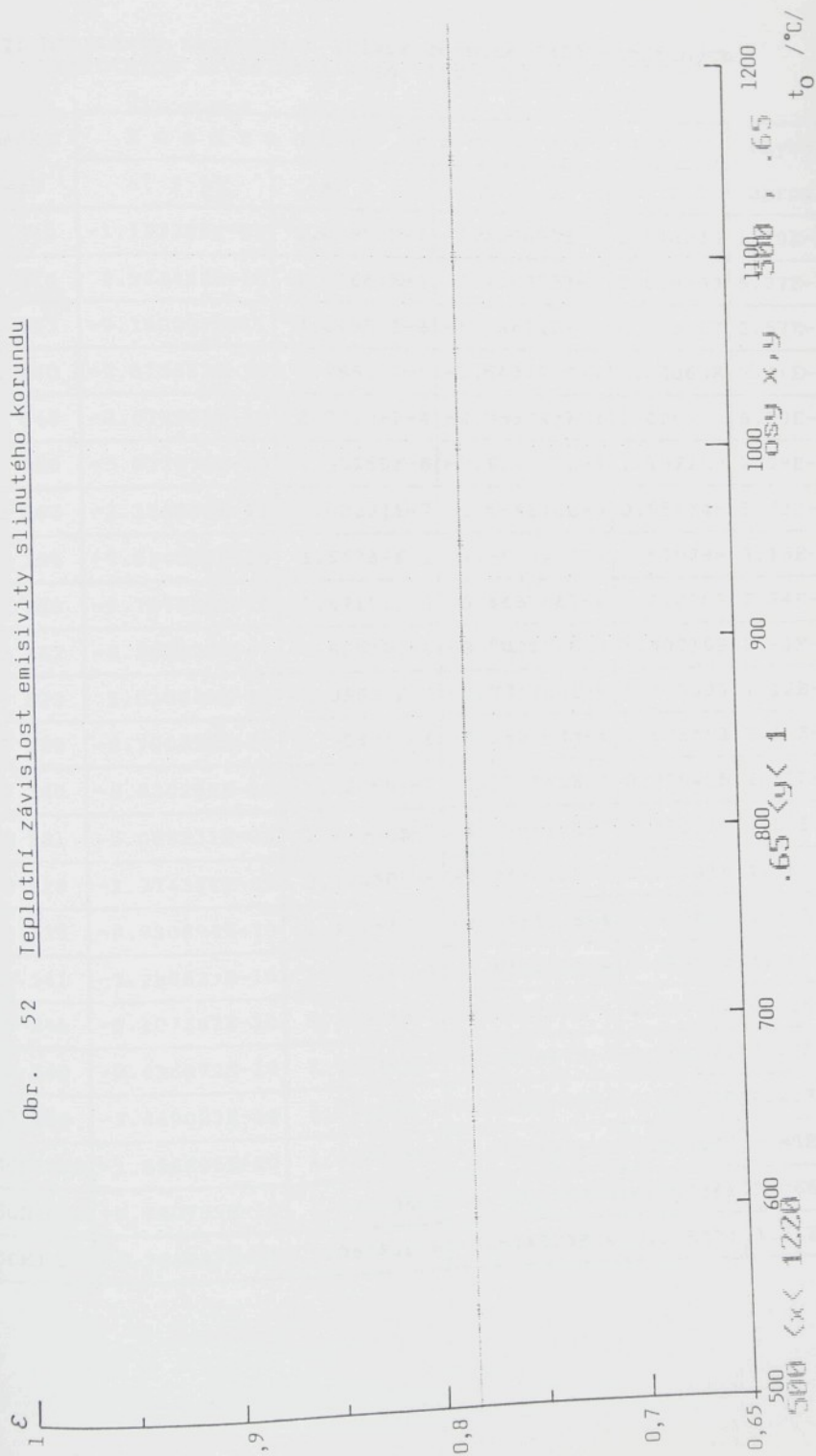
Obr. 50 Teplotní závislost emisivity šamotu SIII



Obr. 51 Teplotní závislost emisivity keramického vyzdívkového materiálu Dinas



Obr. 52 Teplotní závislost emisivity slinutého korundu



Tab.2: Konstanty regresních křivek rovnice (43) naměřených
teplotních závislostí emisivity oceli.

Značka oceli	K o n s t a n t y r o v n i c e (4 3)				Chyba aprox.
	a(3)	a(2)	a(1)	a(0)	
11 340	-1.123389E-09	3.03985E-6	-2.720893E-3	1.646232	1.20E-2
11 416	2.982422E-10	-1.03669E-6	8.766915E-4	0.659693	5.77E-3
11 523	-9.160200E-11	8.84959E-8	-1.984712E-4	1.000097	2.57E-2
11 900	-2.815633E-10	3.26831E-7	-2.663472E-4	1.000638	3.41E-2
12 040	-8.879961E-11	8.79786E-8	-2.053745E-4	1.0002	6.00E-3
12 050	-5.932079E-10	1.08268E-6	-7.854571E-4	1.107279	2.99E-2
12 060	-2.184799E-11	-2.03221E-7	4.980146E-5	0.954746	5.73E-3
12 124	-9.634539E-10	1.54854E-6	-7.891393E-4	0.999298	3.15E-2
12 140	-9.797526E-10	1.62157E-6	-8.665306E-4	1.020307	2.74E-2
12 142	-2.280926E-09	4.98519E-6	-3.706153E-3	1.802199	2.81E-2
13 123	1.030048E-10	-2.88633E-7	-3.731353E-5	1.000599	1.12E-2
13 124	-8.700235E-10	1.39431E-6	-7.259493E-4	0.998453	3.13E-2
14 140	-2.630259E-10	3.72755E-7	-3.157341E-4	0.998405	2.33E-2
15 121	-5.088231E-09	1.22060E-5	-9.879642E-3	3.523793	4.02E-3
15 128	-1.274321E-09	2.10430E-6	-9.947815E-4	0.943056	1.78E-2
15 235	-8.930894E-10	1.38956E-6	-6.978643E-4	0.999435	1.39E-2
15 341	-2.288623E-10	2.03414E-7	-1.011895E-4	0.919887	4.39E-3
16 341	-5.107382E-10	9.29524E-7	-6.678138E-4	0.999862	2.15E-2
16 540	-9.436872E-10	1.38324E-6	-6.525447E-4	1.001673	2.26E-2
17 248	-2.449023E-10	4.23479E-7	-1.612486E-4	0.840894	4.17E-3
10GN2MFA	-1.856695E-10	1.41881E-7	-1.763123E-4	1.000086	2.93E-2
15CH2MFA	-6.680759E-10	1.03675E-6	-4.306435E-4	0.885865	5.05E-3
15CH3MFA	-5.764047E-10	1.05783E-6	-6.644573E-4	0.999804	2.61E-2

Tab.2: Konstanty regresních křivek rovnice (43) naměřených
teplotních závislostí emisivity ocelí(pokračování).

Značka oceli	K o n s t a n t y r o v n i c e (43)				Chyba aprox.
	a(3)	a(2)	a(1)	a(0)	
18CH2MFA	-2.510100E-10	3.61563E-7	-3.201663E-4	0.998598	2.47E-2
25CH2MFA	-4.258437E-10	5.78033E-7	-3.571100E-4	1.000542	2.69E-2
2p	5.410560E-12	-6.28184E-8	-1.350527E-4	0.942707	1.17E-2
22K	-5.473010E-10	8.34888E-7	-4.897729E-4	0.998622	2.98E-2
55CH	-5.608655E-10	9.26282E-7	-5.625735E-4	1.002215	3.39E-2
55NC	-7.301395E-10	1.20276E-6	-6.758483E-4	1.005432	3.25E-2

d)	frézováním	na drsnost	3,2	HRC
e)	frézováním	na drsnost	12,5	HRC
f)	frézováním	na drsnost	cca 50	HRC
g)	broušením	na drsnost	0,8	HRC
h)	kováním	- drsnost	cca 25	HRC

Měření teplotní závislosti emisivity vzorků těchto materiálů s různým opracováním ukázala překvapivý výsledek. Všechny naměřené hodnoty byly v toleranci měřicí metody . To znamená změna drsnosti způsobená běžným opracováním v obvyklých mezích

n e m á

znatelný vliv na emisivitu oceli. Tato skutečnost byla vysvětlována tím, že oxidy vznikající na povrchu ocelových vzorků (materiálů) si vytvářejí vlastní povrchovou strukturu. Při oxidaci oceli s vyšší drsností dochází k nestejnomyšlnému růstu oxidů po celé ploše. To způsobuje, že postupně se zaplní rýhy po opracování povrchu materiálu a tento zoxidovaný povrch má novou strukturu a drsnost. Struktura nově vzniklých oxidů není závislá na předchozím mechanickém opracování a má prakticky konstantní drsnost. Těmto závěrům odpovídá i povrch odloupených oxidů. Povrch jejich vnější strany má určitou konstantní drsnost. Na povrchu částí oxidů, která přiléhala na materiál, je patrné kopírování drsnosti povrchu základního materiálu.



Obr. 52a : VÝBRUS ZOXIDOVANÉ Ni - Cr OCELI (typ 2520)
S POVRCHOVÝMI MIKROTRHLINAMI (elementární
černé zářiče)

Tab.3: Rozložení naměřených hodnot emisivit proti určené regresní křivce podle rovnice (43).

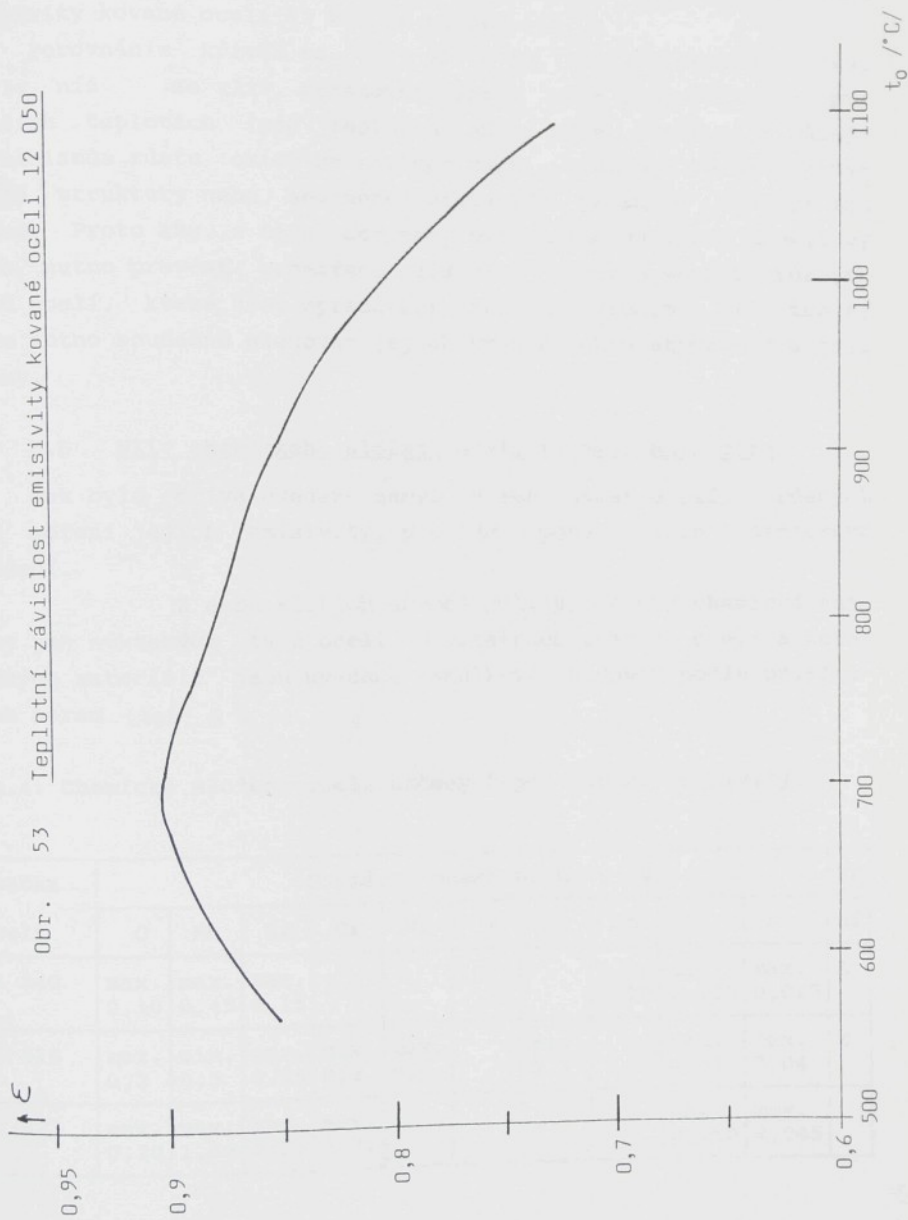
značka oceli	počet vzorků	počet měření	počet měření s rozptylem proti regresní křivce v %		
			10 %	5 %	2 %
11 523	8	116	99.14	86.21	47.41
11 900	10	161	95.03	71.43	30.43
12 050	16	320	98.44	82.81	37.50
12 124	12	222	99.1	86.94	44.59
12 140	9	156	98.72	90.38	53.85
12 142	10	122	97.54	89.34	44.26
13 124	13	231	99.13	87.01	45.89
14 140	10	154	98.05	91.56	53.90
16 540	10	206	100	95.15	69.90
10GN2MFA	9	134	97.76	82.84	54.48
15CH3MFA	4	71	98.59	77.46	42.25
18CH2MFA	9	136	99.26	95.59	57.35
25CH2MFA	10	364	98.63	82.14	29.12
22K	12	271	99.26	88.93	46.13
55CH	11	216	99.54	84.72	43.98
55NC	12	233	99.57	85.84	46.35

6.2 Vliv způsobu zpracování na emisivitu oceli

U oceli 12 050 byl kromě toho sledován vliv zpracování:

- ocel za tepla válcovaná
- kovaná.

Pro měření vlivu zpracování oceli na její emisivitu bylo k dispozici 20 vzorků z oceli 12 050, která byla zpracována vál-



cováním za tepla. Z kované oceli stejné značky bylo k dispozici pouze 5 vzorků. Na obr. 23 je teplotní závislost emisivity oceli 12 050, která byla vyrobena tvářením za tepla. Teplotní závislost emisivity kované oceli 12 050 je na obr. 53.

Porovnáním křivek na obr. 23 a 52 lze vyslovit domněnku, podle níž se vliv zpracování ocelí může projevit pouze při nižších teplotách (pod teplotou AC₃), může docházet k různým mechanismům růstu oxidů na povrchu např. z důvodů různé krystalické struktury nebo segregace některých prvků na hranici zrn a pod. Proto aby, z této domněnky bylo možno vytvořit teorii by bylo nutno provést proměření emisivity většího souboru různých typů ocelí, které jsou zpracovány různým způsobem. Při tom by bylo nutno současně sledovat jejich krystalickou strukturu a její změny.

6.3 Vliv chemického složení oceli na její emisivitu

Jak bylo dříve uvedeno nebyl výběr značek ocelí, určených pro měření jejich emisivity, prováděn podle jejich chemického složení.

Z ekonomických důvodů byly provedeny chemické analýzy jen některých typů ocelí. U ostatních značek ocelí a keramických materiálů jsou uvedeny tabulkové hodnoty podle příslušných norem (tab. 4 a 5).

Tab.4: Chemické složení ocelí určených pro měření emisivity.

značka oceli	Průměrný obsah prvku v [%]										Ur če ní
	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Cu	Mo	P	S	
11 340	max. 0,10	max. 0,45	max. 0,15					0,06 0,20	max. 0,030	max. 0,025	A
11 416	max. 0,2	min. 0,5	max. 0,35	max. 0,3	max. 0,3		max. 0,3		max. 0,04	max. 0,04	E
11 523	max. 0,20	max. 1,50	max. 0,55	max. 0,30					max. 0,050	max. 0,045	

Tab.4: Chemické složení ocelí určených pro měření emisivity.
(pokračování)

značka oceli	Obsah prvku v [%]										Ur če ní
	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Mo	Ti	P	S	
11 900	max. 0,10								max. 0,060	max. 0,060	H
12 040	0,32 0,4	0,5 0,8	0,17 0,37	max. 0,25	max. 0,3		max. 0,3		max. 0,04	max. 0,04	G
12 050	0,42 0,50	0,5 0,8	0,17 0,37	max. 0,25	max. 0,3		max. 0,3		max. 0,04	max. 0,04	G
12 060	0,52 0,60	0,5 0,8	0,17 0,37	max. 0,25	max. 0,3		max. 0,3		max. 0,04	max. 0,04	C
12 124											
12 140	0,3 0,38	0,6 0,85	0,17 0,37	max. 0,25	max. 0,3	max. 0,15	max. 0,3		max. 0,035	max. 0,035	G
12 142	0,34 0,38	0,60 0,80	0,20 0,35	max. 0,25	max. 0,30	0,03 0,08		max. 0,10	max. 0,035	max. 0,035	G
13 123	0,17 0,23	1,0 1,4	0,15 0,4	max. 0,25	max. 0,3	0,10 0,15	max. 0,3		max. 0,04	max. 0,04	D
13 124	0,16 0,23	1,3 1,6	0,2 0,4	max. 0,3	max. 0,3	min. 0,08					B
14140	0,35 0,42	0,5 0,8	0,17 0,37	0,08 1,1					max. 0,035	max. 0,035	G
15 121	0,10 0,18	0,40 0,70	0,15 0,35	0,70 1,30				0,40 0,60	max. 0,040	max. 0,040	E
15 128	0,10 0,18	0,45 0,70	0,15 0,40	0,50 0,70	0,22 0,35			0,40 0,60	max. 0,040	max. 0,040	E
15 235	0,25 0,35	0,5 0,9	0,15 0,40	1,5 2,0		0,2 0,3			max. 0,035	max. 0,035	D
15 421	0,18 0,28	0,50 0,90	0,15 0,40	2,70 3,50	max. 0,80			0,25 0,60	max. 0,025	max. 0,025	I
16341	0,36 0,41	0,65 0,80	0,20 0,35	0,85 1,15	1,65 2,05		0,10 0,20		max. 0,03	max. 0,03	

Tab.4: Chemické složení ocelí určených pro měření emisivity.
(pokračování)

značka oceli	Obsah prvku v [%]										Ur če ní
	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Mo	Ti	P	S	
16 540	0,3 0,4	0,5 0,8	0,15 0,40	0,7 1,0	2,75 3,25		0,25 0,4		max. 0,035	max. 0,035	D
0CH8N10T ≈17 247	max. 0,08	max. 2,00	max. 1,00	17,0 19,0	9,50 12,5			min. 5x C	max. 0,025	max. 0,025	H
analýza	0,05	1,16	0,47	17,8	10,6	0,09	0,18	0,48	0,011	0,013	
10GN2MFA	0,08 0,12	0,17 0,37	0,80 1,10	max. 0,30	2,0 2,7	0,07 0,1	0,50 0,70		max. 0,02	max. 0,02	J
analýza	0,11	0,95	0,25	0,11	2,16	0,04	0,45		0,01	0,01	
15CH2MFA	0,13 0,17	0,30 0,60	0,17 0,37	2,50 3,00	max. 0,3	0,25 0,35	0,60 0,80		max. 0,025	max. 0,025	J
15CH3MFA analýza	0,14	0,44	0,30	2,76	0,09	0,32	0,69		0,017	0,015	J
18CH2MFA	0,14 0,19	0,3 0,6	0,17 0,37			0,25 0,35	0,60 0,80		max. 0,025	max. 0,025	J
25CH2MFA analýza	0,21	0,46	0,25	2,74	0,07	0,30	0,72		0,021	0,018	J
22K	0,19 0,26	0,75 1,00	0,20 0,40						max. 0,030	max. 0,03	J
55CH	0,51 0,59	0,50 0,80	0,17 0,37	0,80 1,00					max. 0,030	max. 0,030	J
2p	0,23 0,27	0,55 0,75	0,25 0,35	1,05 1,25		max. 0,3			max. 0,025	max. 0,025	K
55CHC ≈14 161	0,52 0,58	0,55 0,75	0,25 0,35	1,05 1,25		max. 0,3			max. 0,035	max. 0,035	J

Vysvětlivky:

- A - ocel na svařované konstrukce za běžných teplot
- B - ocel na láhve pro stlačené a zkapalněné plyny
- C - pružinová ocel
- D - žárupevná ocel pro namáhání v oblasti meze kluzu
- E - žárupevná ocel pro namáhání v oblasti meze kluzu a tečení
- F - korozivzdorná ocel
- G - ocel na zušlechťování a povrchové kalení
- H - ocel s vyšší odolností proti opotřebení

- I - ocel
 J - ocel na jaderná zařízení primárního okruhu
 K - speciální ocel (pro vojenské určení)

Tab.5: Chemické složení keramických materiálů určených pro měření emisivity.

značka materiálu	Obsah v [%]				Určení
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	
Šamot SII	38	57	2,8		A
Šamot SIII	36	58-59	2,9		A
Šamot STIII	36	58-59	3,2		A
Dinas		97	1	2	A
Slinutý korund	99,5				B

Vysvětlivky:

- A - keramický vyzdívkový materiál
 B - speciální keramický materiál

Pro určení vlivu určitého prvku je v tab. 8 uvedeno chemické složení skupiny ocelí s blízkou teplotní závislostí emisivity. U každého prvku je uveden jeho maximální, minimální a střední obsah v dané skupině ocelí s podobnou emisivitou (charakteristickou křivkou). Pokud bychom porovnávali pouze závislost středního obsahu určitého prvku ve skupině ocelí, bylo by možno přijmout určité závěry o jeho vlivu na výslednou emisivitu. Maximální a minimální jeho obsah v ocelích dané skupiny se však překrývá jeho obsah v dalších skupinách. V některých případech se tyto rozsahy téměř překrývají, např. obsah uhlíku, křemíku a niklu ve skupině ocelí s charakteristickou křivkou 1 a 2. Z toho lze přijmout následující hypotézu:

- na emisivitu oceli nemá vliv pouze změna obsahu jednoho prvku toto bylo patrné na př. u uhlíku jehož změna v rozsahu 0 až 1% nemá vliv na zařazení oceli do první skupiny (např. oceli 12 040 - ≈0,4% C, 12 050 - ≈0,5% C, 12 060 - ≈0,6% C, 11 900 - ≈ 1% C

- lze předpokládat, že na teplotní závislost emisivity má vliv vzájemný poměr obsahů jednotlivých legur, které ovlivňuje mechanismus růstu i chemické složení oxidů na povrchu oceli. Tomu nasvědčuje i skutečnost, že bylo možno zařadit do jedné skupiny oceli s tak rozdílným chemickým složením jako jsou oceli značek 11 340 a 17 247.

Současně je nutno upozornit, že definitivní závěr o vlivu jednotlivých legur (prvků) nebo jejich vzájemném poměru na výslednou emisivitu je možno udělat až po proměření podstatně větší skupiny, nejlépe většiny značek ocelí.

IV. VÝSLEDKY DIZERTACE JEJICH VYUŽITÍ V PRAXI

7.0 CHARAKTERISTICKÉ KŘIVKY EMISIVIT

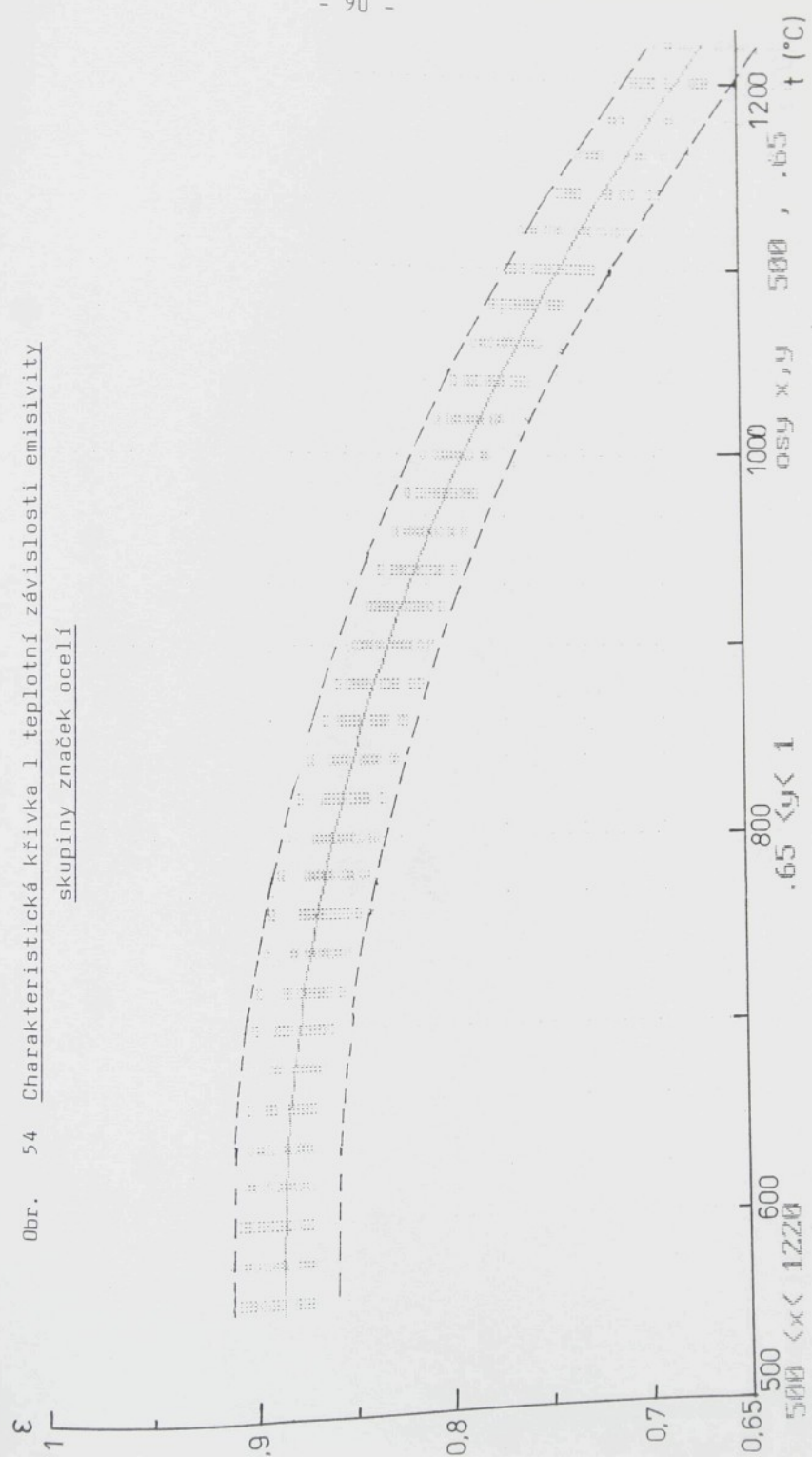
Naměřené výsledky teplotní závislosti emisivity ve formě grafů jednotlivých typů ocelí a keramických materiálů jsou pro běžné provozní používání poměrně nepraktické.

Značky ocelí a keramické materiály s velmi blízkou teplotní závislostí emisivity byly zahrnuty do společné teplotní závislosti emisivity, která je nazvána

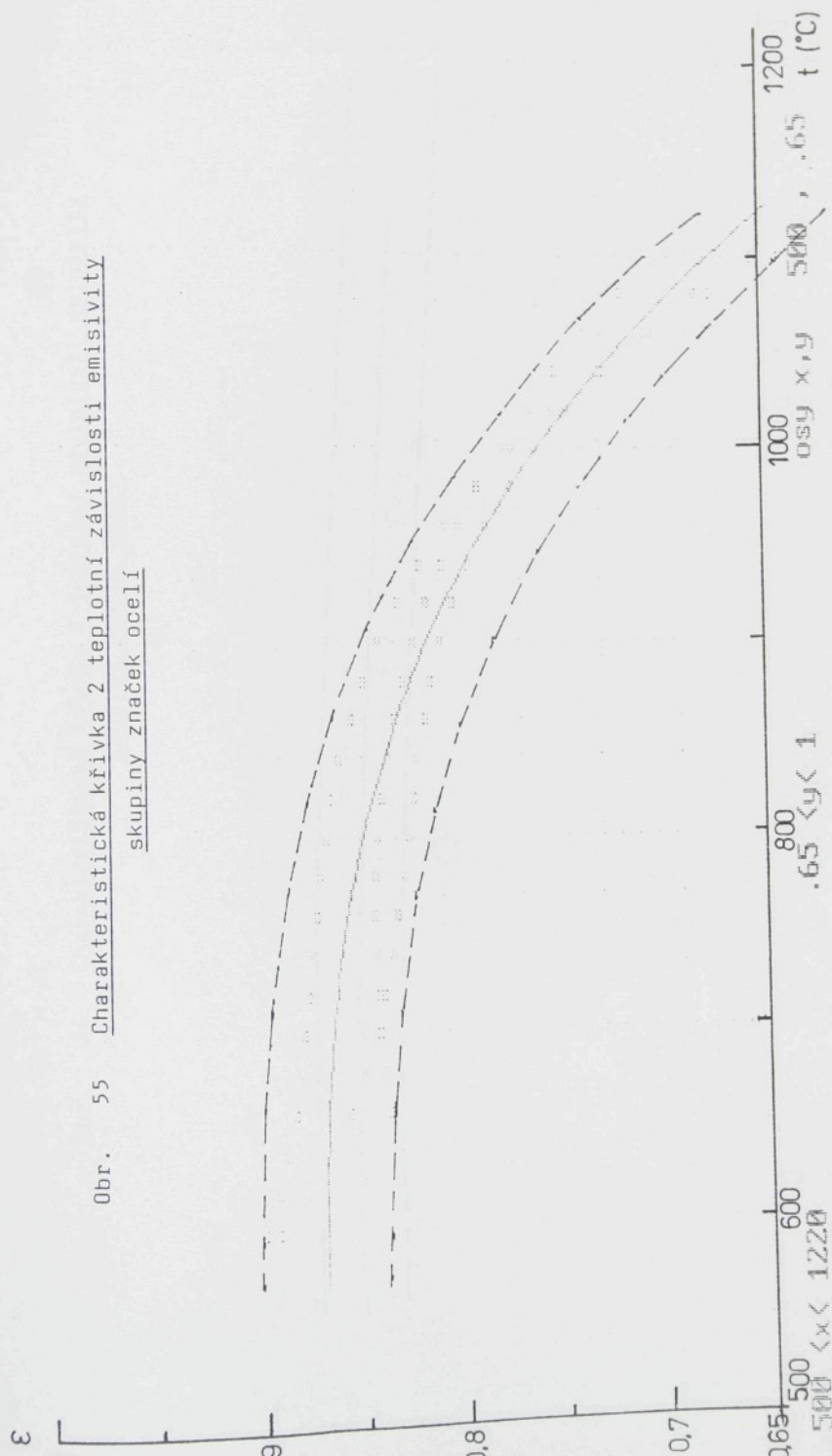
ch a r a k t e r i s t i c k o u k ř í v k o u
teplotní závislosti emisivity dané skupiny materiálů. Jednotlivé druhy materiálů nebyly do charakteristických křivek zařazovány podle jejich chemického složení, ale pouze na základě podobnosti průběhu teplotní závislosti emisivity s ostatními druhy materiálů. S ohledem na velikost rozptylu a současně praktičnost provozního používání bylo vytypováno sedm charakteristických křivek. Do prvních pěti charakteristický křivek je zařazeno celkem 28 značek ocelí (obr. 54 až 58). Zbylé dvě charakteristické křivky jsou určeny pro keramické vyzdívkové materiály (obr. 59 a 60). Přiřazení jednotlivých druhů materiálů do charakteristických křivek je v tab 6.

Výsledky těchto měření emisivit jsou určeny pro korekci všech typů pyrometrů obdobnými spektrálními vlastnostmi. To spl-

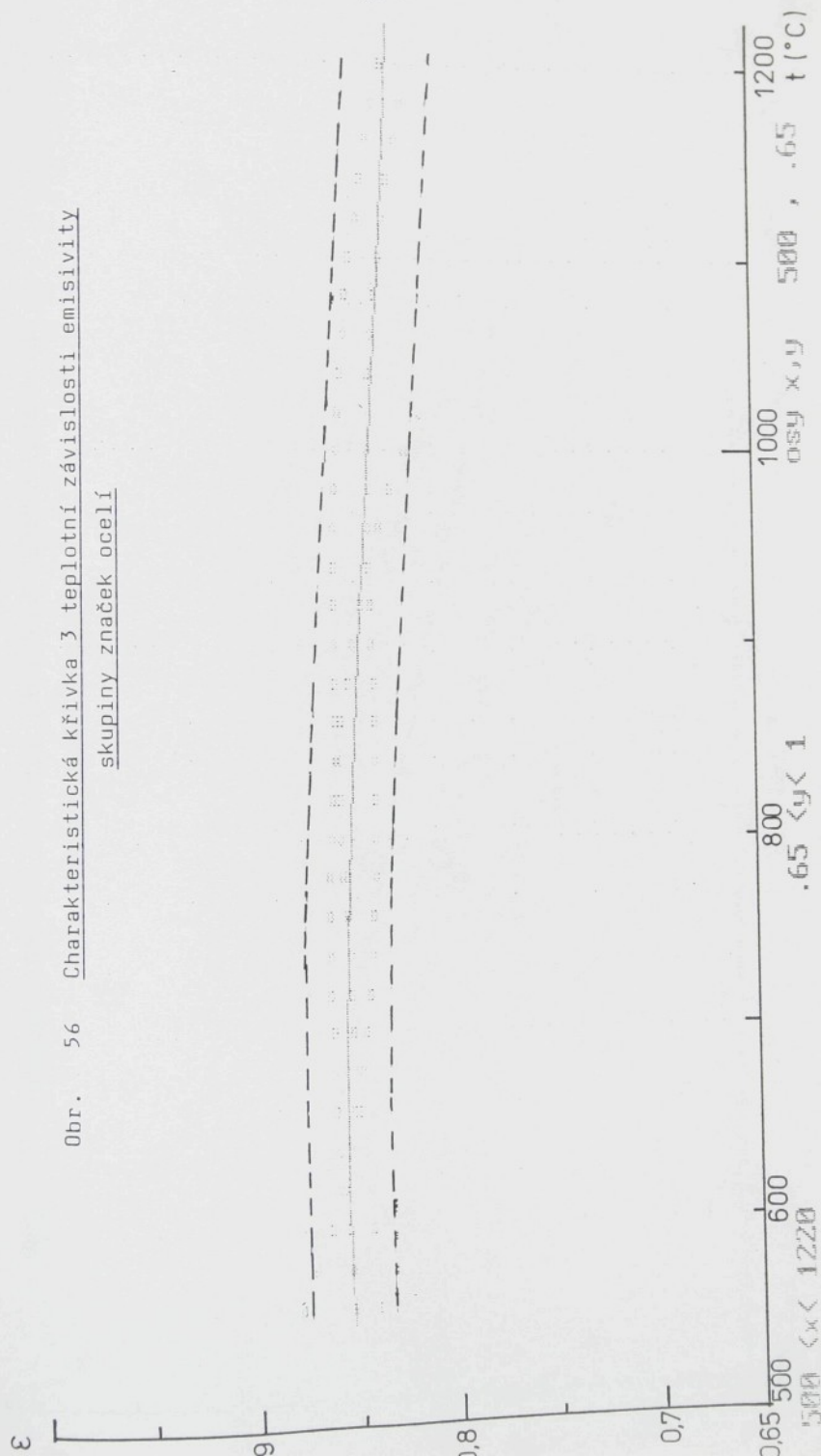
Obr. 54 Charakteristická křivka l teplotní závislosti emisivity
skupiny značek ocelí



Obr. 55 Charakteristická křivka 2 teplotní závislosti emisivity
skupiny značek ocelí

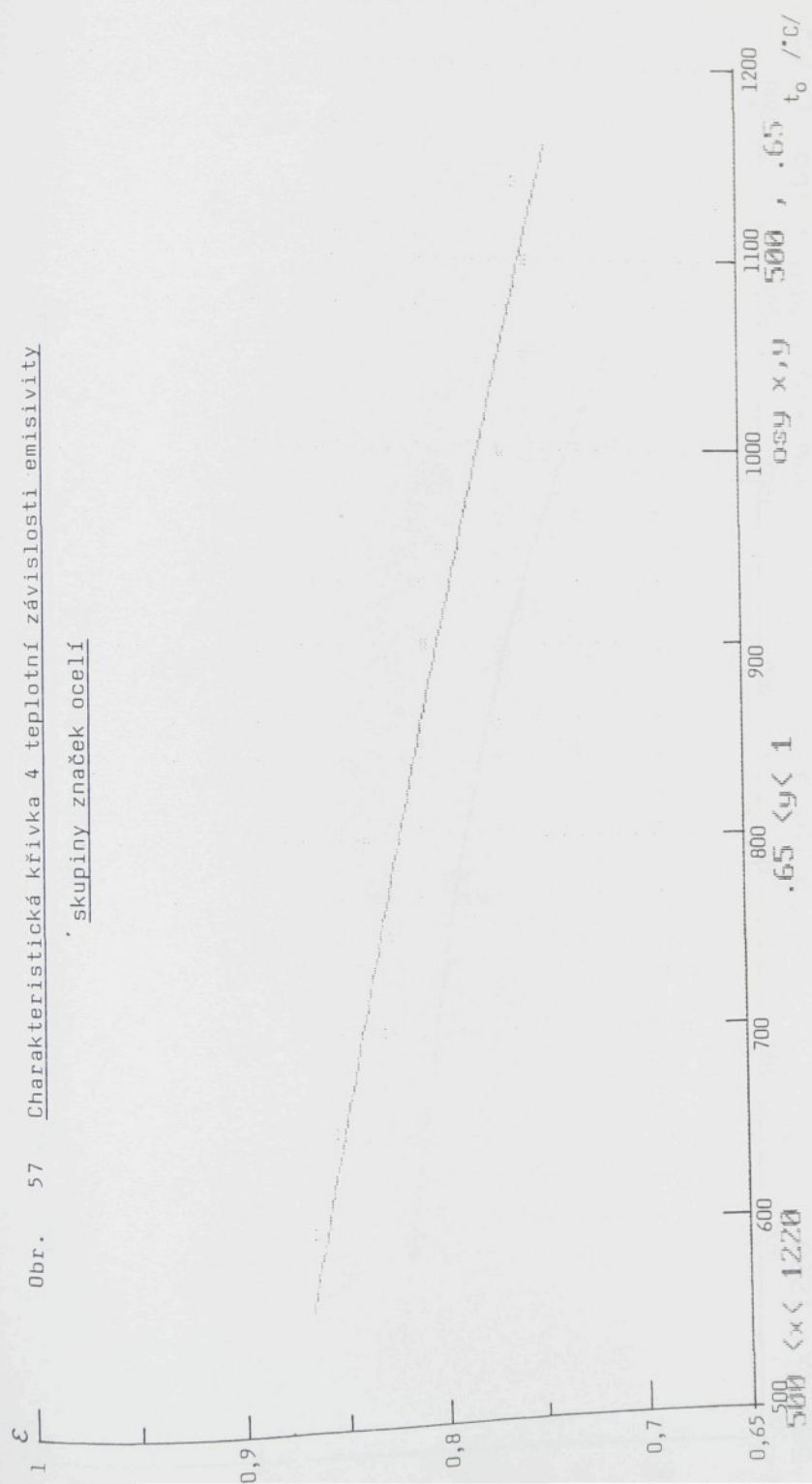


Obr. 56 Charakteristická křivka 3 teplotní závislosti emisivity
skupiny značek ocelí

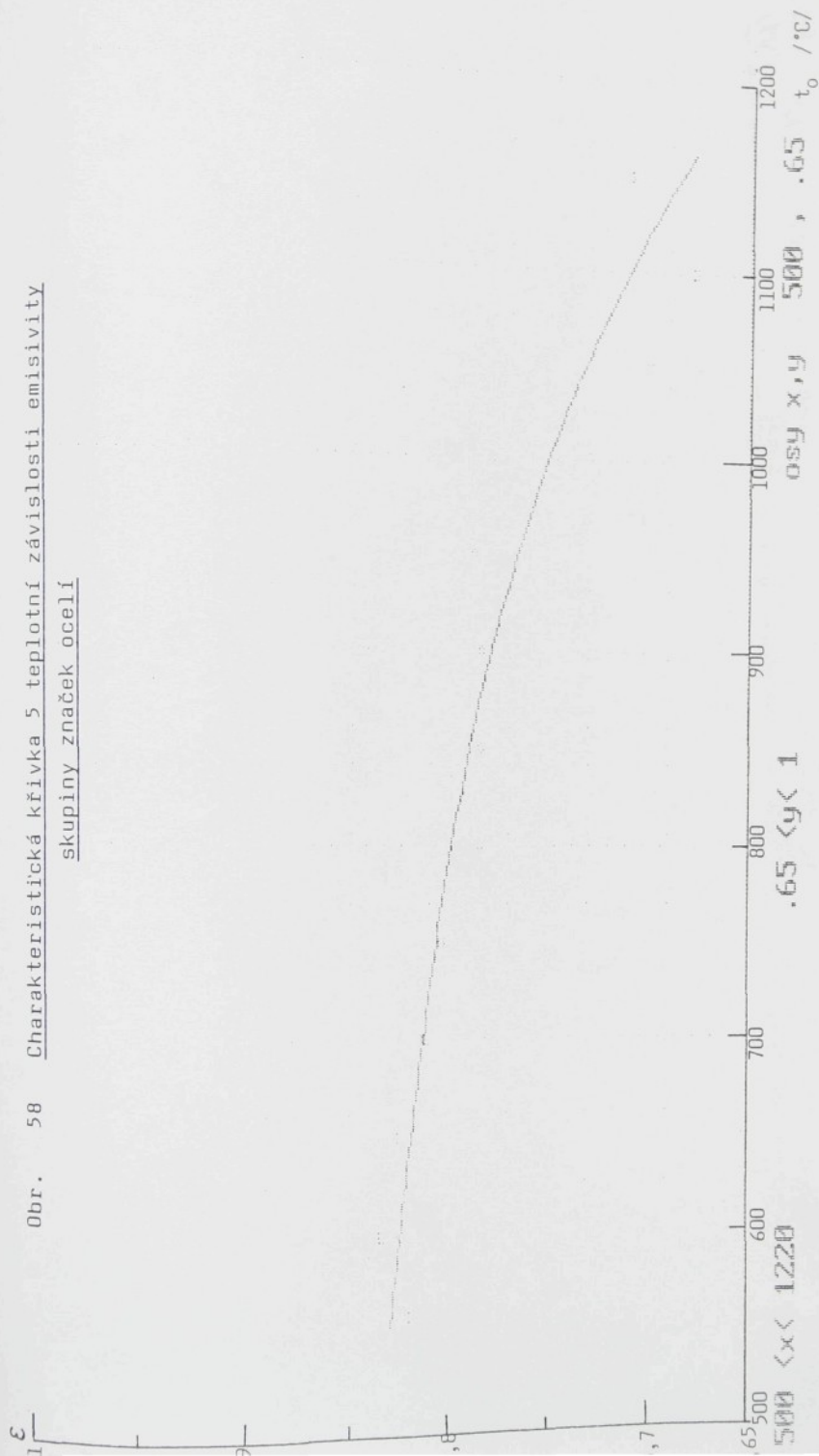


Obr. 57 Charakteristická křivka 4 teplotní závislosti emisivity

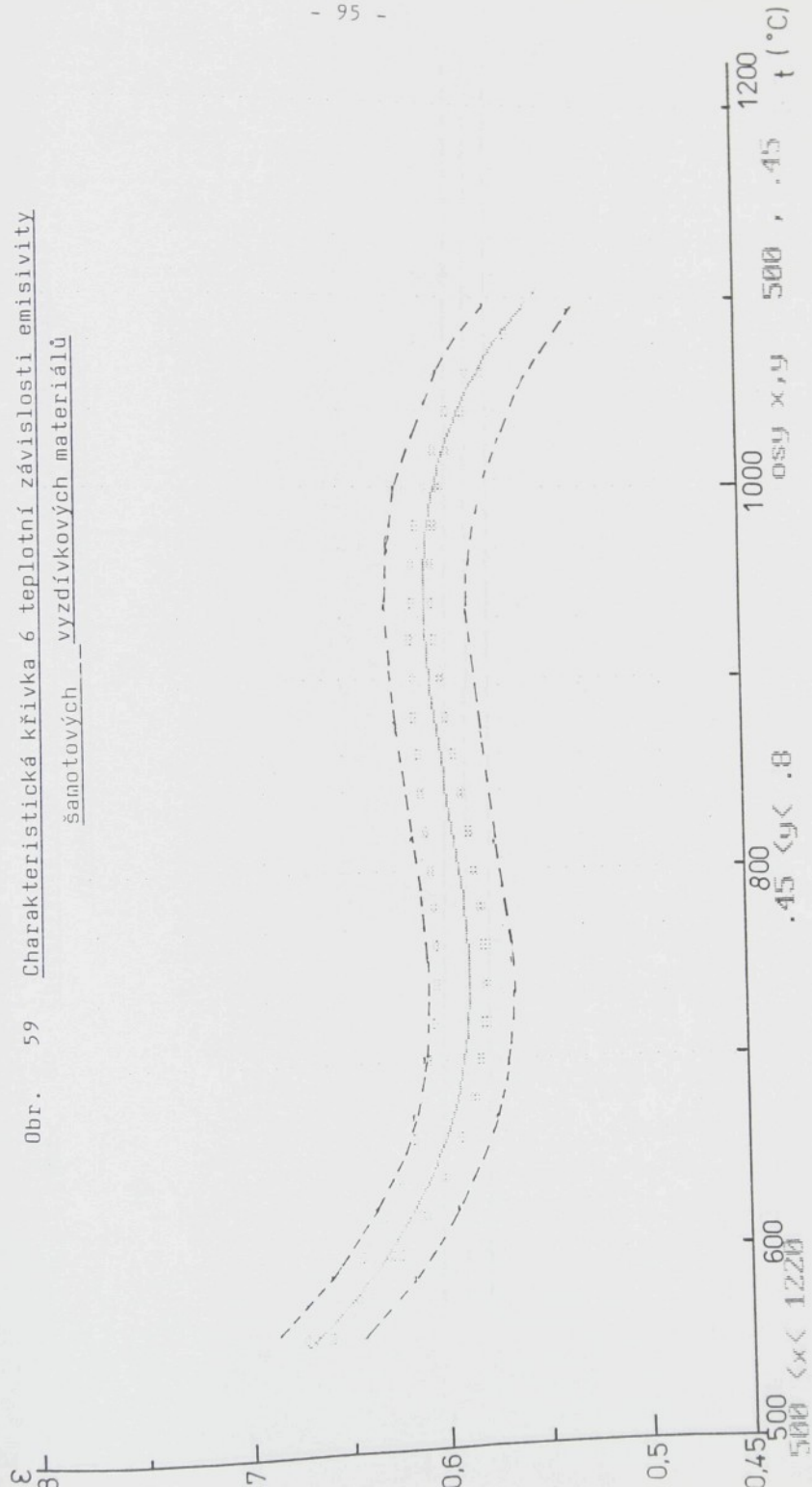
' skupiny značek ocelí



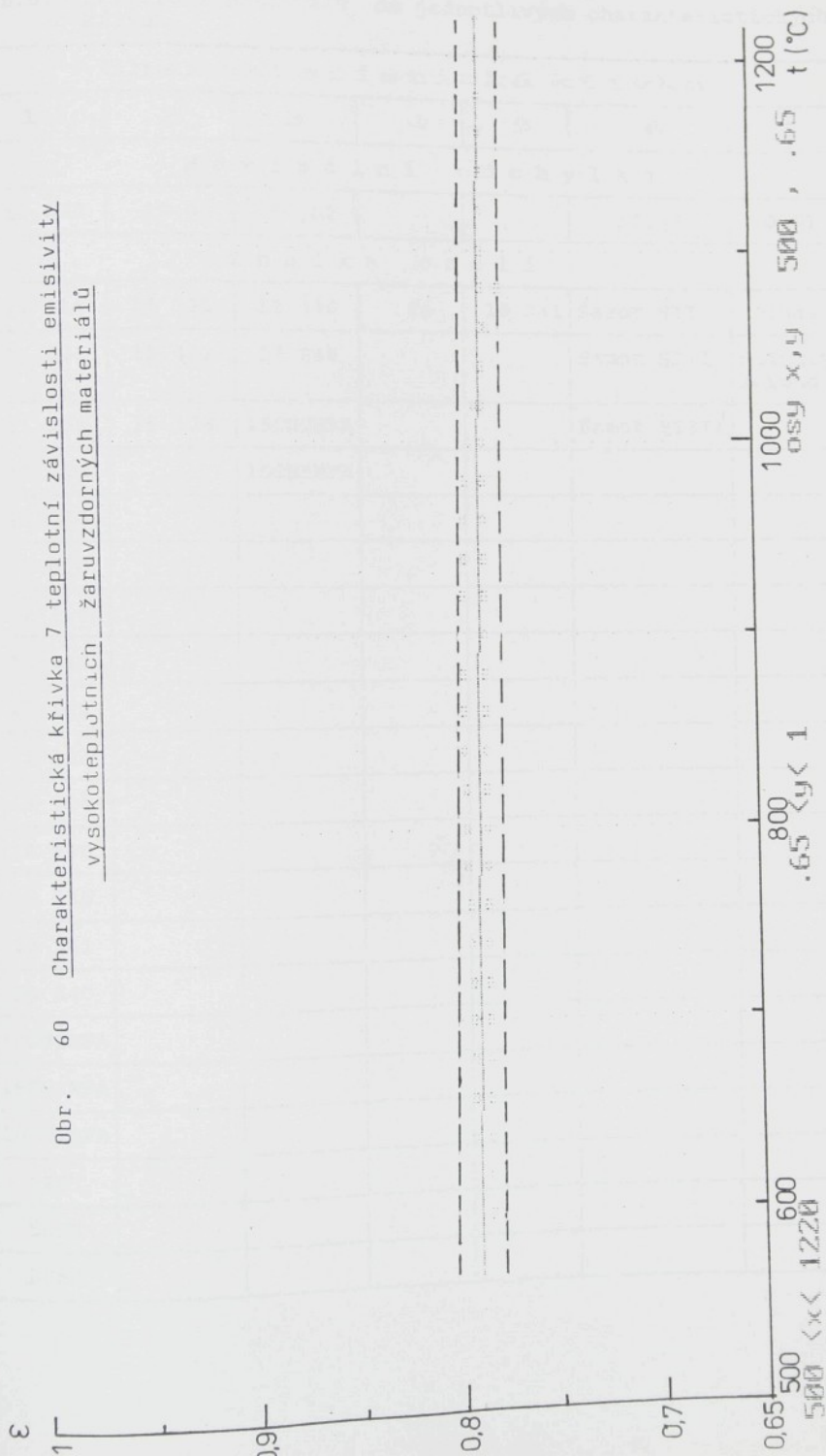
Obr. 58 Charakteristická křivka 5 teplotní závislosti emisivity
skupiny značek ocelí



Obr. 59 Charakteristická křivka ϵ teplotní závislosti emisivity
šamotových vyzdívkových materiálů



Obr. 60 Charakteristická křivka 7 teplotní závislosti emisivity
vysokeoteplotních žaruvzdorných materiálů



Tab.6: Přiřazení materiálů do jednotlivých charakteristických křivek

Charakteristická křivka						
1	2	3	4	5	6	7
Maximální odchylka						
±0,025	±0,03	±0,02			±0,02	±0,01
Značka oceli						
11 416	15 121	11 340	2p	16 341	Šamot SII	Dinas
11 523	15 421	17 248			Šamot SIII	Slinutý korund
11 900	15 128	15CH2MFA			Šamot STIII	
12 040		15CH3MFA				
12 050						
12 060						
12 124						
12 140						
12 142						
13 123						
13 124						
14 140						
15 235						
15 341						
16 540						
10GN2MFA						
18CH2MFA						
25CH2MFA						
22K						
55CH						
55NC						

Tab.7: Konstanty regresních křivek rovnice (43) charakteristických křivek teplotních závislostí emisivity materiálů.

Charakteristická křivka	Konstanty rovnice (43)				Chyba aprox.
	a(3)	a(2)	a(1)	a(0)	
1	0.000000	-5.266824E-7	6.06673E-4	0.710889	1.78E-2
2	-1.035476E-09	1.613981E-6	-8.250087E-4	1.006995	2.07E-2
3	1.782067E-10	-5.354314E-7	4.738619E-4	0.725120	1.25E-2
4	-7.018142E-14	-4.795842E-8	-1.216024E-4	0.949736	1.04E-2
5	-5.107382E-10	9.295238E-7	-6.678138E-4	0.999862	2.15E-2
6	-4.938034E-09	1.249005E-5	-1.038057E-2	3.42997	8.87E-3
7	0.000000	0.000000	-9.171426E-6	0.795521	4.90E-3

Tab.8: Chemické složení skupin ocelí zařazených do charakteristických křivek jejich emisivit.

Charakteristická křivka		Obsah prvku v [%]								
		C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Mo	P	S
1	min.	0,08	0,17	0,15	0,0	0,0	0,0	0,25	0,00	0,00
	max.	1,10	1,60	1,10	2,00	3,50	0,35	0,80	0,06	0,06
	φ.	0,35	0,76	0,33	0,44	0,53	0,19	0,5	0,037	0,037
2	min.	0,10	0,40	0,15	0,70	0,22		0,25	0,00	0,00
	max.	0,28	0,90	0,40	3,50	0,80		0,60	0,040	0,040
	φ	0,17	0,61	0,27	1,56	0,47		0,47	0,030	0,035
3	min.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,00	0,00
	max.	0,17	2,00	1,00	19,0	12,5		0,8	0,045	0,030
	φ	0,08	0,72	1,00	6,90	3,71		0,23	0,013	0,016
4	min.	0,23	1,20	1,30	1,05	0,0			0,00	0,00
	max.	0,27	1,50	1,60	1,25	0,30			0,050	0,045
	φ	0,25	1,35	1,45	1,15	0,15			0,025	0,022
5	min.	0,36	0,65	0,20	0,85	1,65			0,00	0,00
	max.	0,41	0,80	0,35	1,15	2,05			0,030	0,030
	φ	0,38	0,72	0,27	1,00	1,85			0,015	0,015

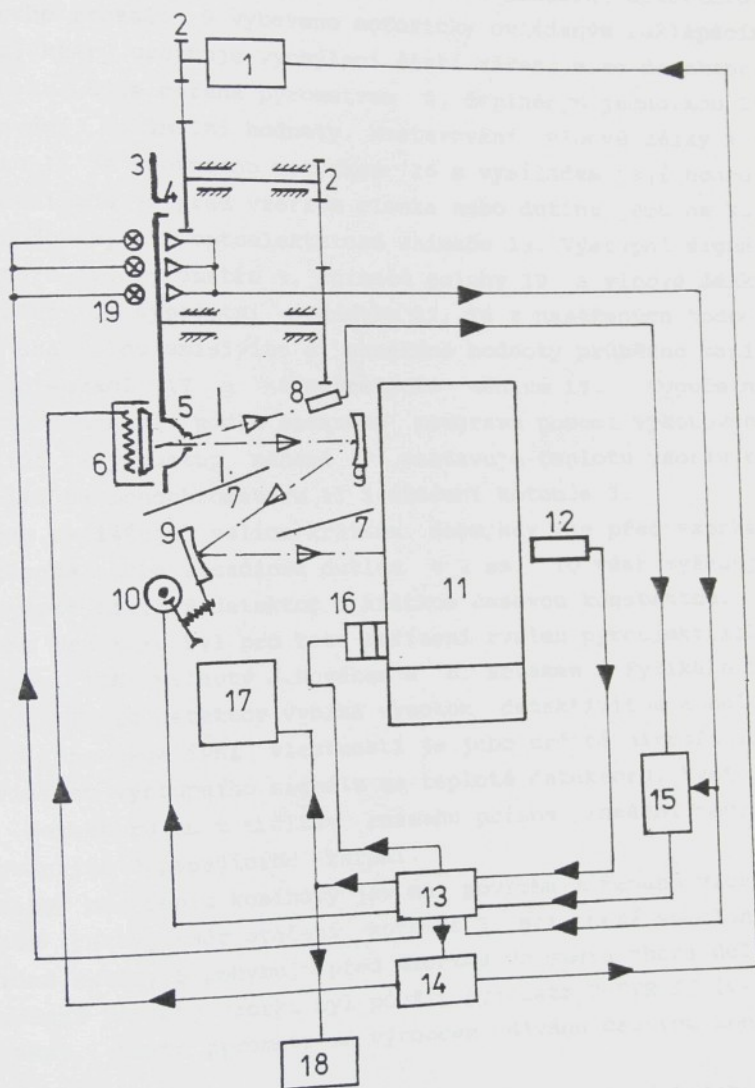
ňují všechny pyrometry s detektorem z čistého křemíku a skleněnou optikou, tj. pro pyrometry s efektivní vlnovou délkou cca 0,85 μm . Rozdělení ocelí a keramických materiálů sedmi skupin umožňuje i v provozních podmínkách operativní nastavování emisivity používaných pyrometrů a tím i zpřesnění bezdotykového měření běžných provozních pásmových pyrometrů s efektivní vlnovou délkou 0,85 μm . Pro možnost jejich praktického využití výsledků měření emisivity při zpracování bezdotykového měření teploty pomocí počítače jsou v tab. 7 uvedeny konstanty rovnice (43) pro jednotlivé charakteristické křivky.

Tab.9: Chemické složení skupin keramických materiálů zařazených do charakteristických křivek jejich teplotní závislosti emisivity.

Charakteristická křivka		Obsah v [%]			
		Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO
6	min	36	57	2,8	
	max	38	59	3,2	
	ϕ	37	58	3,0	
7	min	0	0	0	0
	max	99,5	97	1	2
	ϕ	49,75	48,5	0,5	1

8.0 ZAŘÍZENÍ PRO POLOAUTOMATICKÉ MĚŘENÍ EMISIVITY

Na základě úspěšných zkoušek inovované metody měření emisivity bylo navrženo, vyrobeno a odzkoušeno poloautomatické zařízení (obr. 61). Vzorek 6 (viz. obr.12) z měřeného materiálu je umístěn na topení (popsané v kap. 4.21.2). Před vzorkem je umístěn rotující kotouč 3. Na něm jsou s konstantní roztečí střídavě umístěny dvě clonky 4 a dvě zrcadlové dutiny 5. Rotující kotouč 3 je poháněn elektromotorem 1 přes převody 2 tvořené dvojicí plochých řemenů. Tento převod má velmi klidný chod a nepřenáší vibrace a rázy na zařízení. Záření vzorku 6 je soustředováno zrcadlovou optikou 9 na vstupní clonu monochromátoru 11. Pro vyloučení nežádoucích bočních odrazů je optika 9 doplněna soustavou



Obr. 61: Schéma zařízení pro poloautomatické měření emisivity

clonek 7. Záření rozložené monochromátorem 11 je převedeno na elektrický signál detektorem 12. Při měření v určitých režimech, zejména celkové emisivity, docházelo k zahlcení detektoru. Proto je druhé zrcadlo 9 vybaveno motoricky ovládaným naklápěcím mechanismem, který umožňuje vychýlení části záření mimo detektor. Teplota vzorku 6 je měřena pyrometrem 8, doplněným jednotkou 15 pro zachycování maximální hodnoty. Nastavování vlnové délky monochromátoru 11 je prováděno motorkem 16 s vysílačem její hodnoty. Pro určení zda je před vzorkem clonka nebo dutina jsou na kotouči 3 zabudovány tři optoelektrické snímače 19. Výstupní signály z detektoru 12, pyrometru 8, snímačů polohy 19 a vlnové délky 16 jsou vedeny do výpočetní jednotky 13. Ta z naměřených hodnot vypočítává okamžitou emisivitu a naměřené hodnoty průběžně zapisuje na zapisovači 17 a na magnetické médium 18. Výpočetní jednotka 13 současně podle zadaného programu pomocí výkonového členu 14 řídí celý postup měření - nastavuje teplotu vzorku 6, vlnovou délku na monochromátoru 11 i otáčení kotouče 3.

Tato metoda zajišťuje velice krátkou dobu, kdy je před vzorkem umístěna clonka nebo zrcadlová dutina ≈ 2 ms. To však vyžaduje vyžaduje vysoce citlivý detektor s krátkou časovou konstantou.

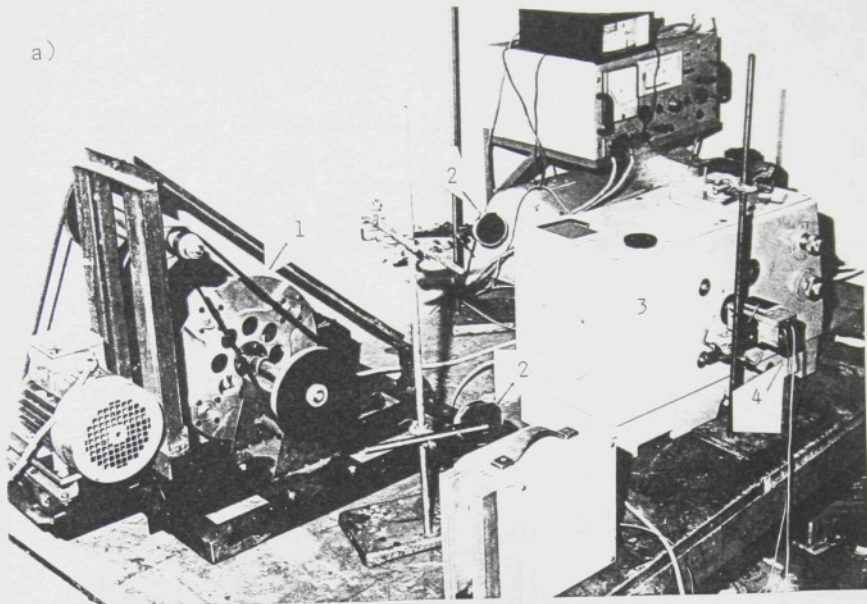
Po důkladném průzkumu byl pro toto zařízení zvolen pyroelektrický detektor typu TGS vyvinutý J. Novákem a L. Novákem z Fyzikálního ústavu ČSAV. Tento detektor vyniká vysokou detektivitou a malou úrovní NEP. Jeho negativní vlastností je jeho určitá mikrofoničnost a závislost výstupního signálu na teplotě detektoru. Výstupní signál detektoru má v určitém rozsahu přísně lineární závislost na intenzitě dopadajícího záření.

Ve snaze odstranit komínový jev na povrchu měřeného vzorku 6 byl zvolen takový směr otáčení kotouče 3, při němž se clonky 4 a zrcadlové dutiny 5 pohybují před vzorkem ve směru zhora dolů.

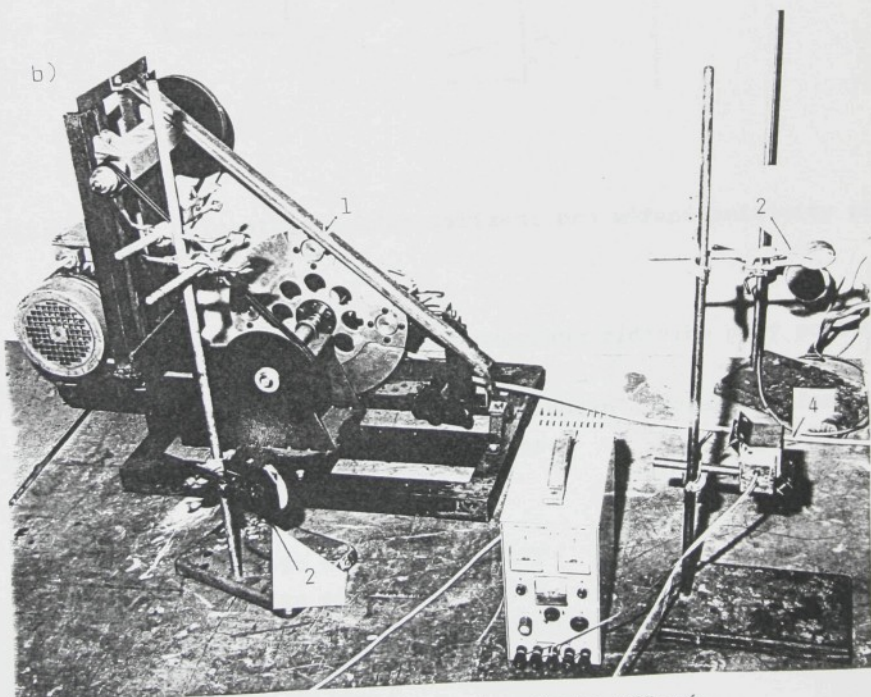
Pro měření teploty vzorku byl použit pyrometr U-PYR II (výr. fy. UHER, SRN). Tento pyrometr má výrobcem udávanou časovou konstantu 1 ms.

Přesto byl pyrometr před měřením na tomto zařízení kalibrován při otáčečím kotouči (obr. 62). Při kalibraci pyrometru bylo na původním zařízení (obr. 61) topení se vzorkem nahrazeno dutinovým černým zářičem.

a)



b)

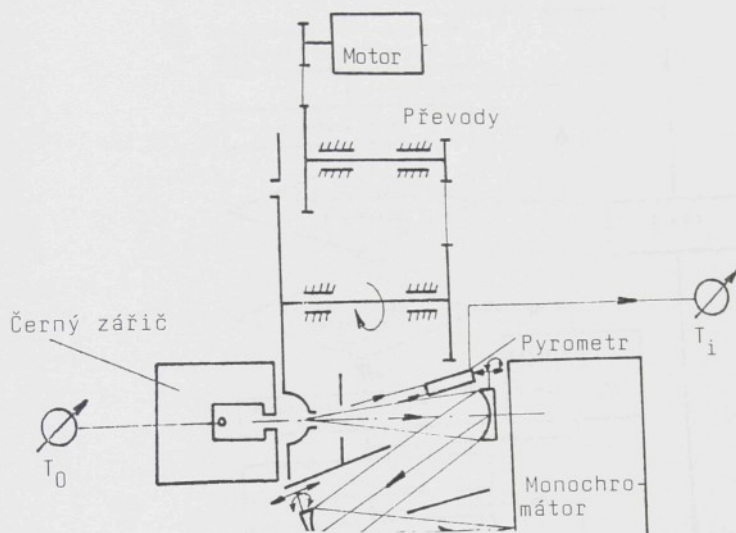


Obr. 61a : MODELOVÁ ZKOUSKA ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ :

a) monochromatické emisivity

b) celkové emisivity :

- 1 - kotouč s clonkami a zrcadlovými dutinami
- 2 - zrcadlová optika,
- 3 - monochromátor,
- 4 - detektor

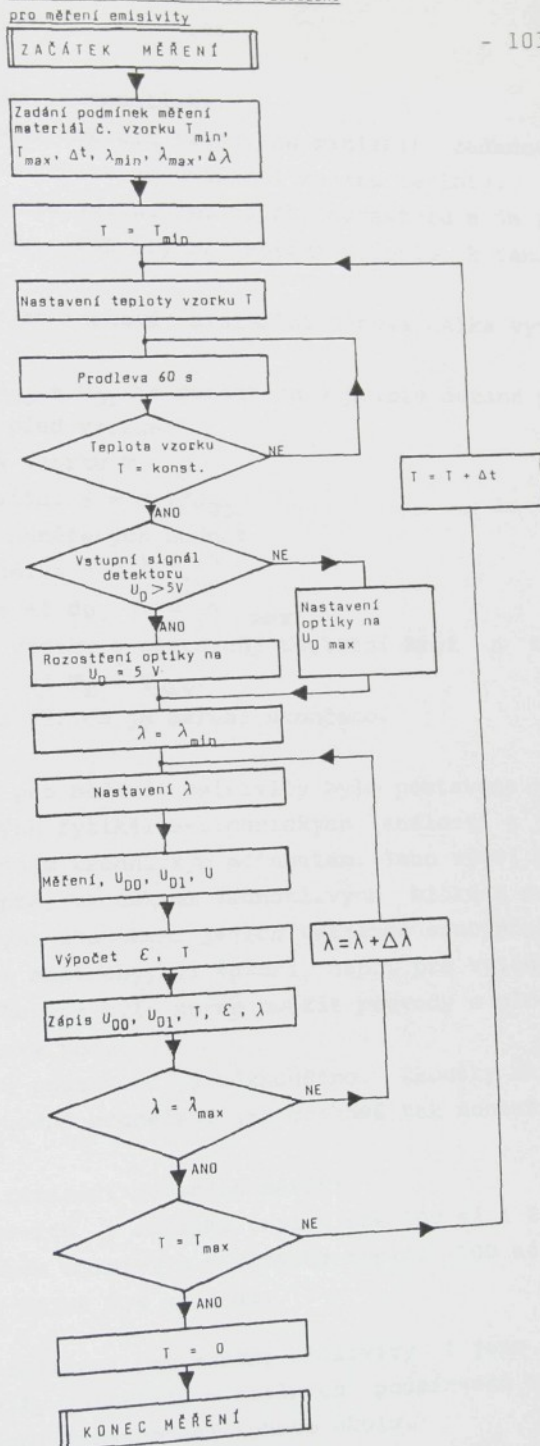


Obr.62: Schéma poloautomatického zařízení pro měření emisivity při kalibraci pyrometru

Na obr. 63 je vývojový diagram programu řídicího celý postup měření emisivity.

Na začátku měření je obsluhou zabudován vzorek z měřeného materiálu na topení a zadána vstupní data:

- materiál vzorku
- číslo vzorku
- minimální teplotu měření emisivity
- maximální teplotu měření emisivity
- teplotní krok v němž bude prováděno měření emisivity
- minimální vlnovou délku
- maximální vlnovou délku
- změnu vlnové délky mezi jednotlivými měřeními



- dále měření probíhá automaticky:
- Nejprve je nastavena teplota vzorku na minimální zadanou teplotu.
 - vždy po 60 s je kontrolováno ustálení zadané teploty.
 - Je provedena kontrola výstupního napětí detektoru a je provedeno nastavení optiky, tak aby při měření nedošlo k zahlcení detektoru.
 - Na monochromátoru se nastaví minimální vlnová délka vystupujícího záření.
 - Změří se napětí U_{Do} a U_{D1} na detektoru v poloze dutina před vzorkem a clonka před vzorkem
 - Změří se teplota vzorku T_z .
 - Vypočte se emisivita: $\epsilon = U_{D1}/U_{Do}$
 - Proveďte se zápis naměřených hodnot.
 - Změní se vlnová délka o $\Delta \lambda$.
 - Měření se opakuje až do $\lambda = \lambda_{max}$.
 - Změní se teplota vzorku o nastavený teplotní krok Δt .
 - Měření se opakuje až $T_z = T_{max}$.
 - Po vypnutí topení zářiče je měření ukončeno.

Celé zařízení pro měření emisivity bylo postaveno na úrovni současných dostupných fyzikálně-technických znalostí a jeho úroveň se blíží současným technickým možnostem. Jeho vývoj bylo nutno provádět postupně, zkouškami jednotlivých bloků a doprovázených mnoha modelovými zkouškami jejich vzájemné součinnosti. Bylo nutno volit některá méně obvyklá řešení, např. pro vyloučení přenosů vibrací na detektor bylo nutno použít převody s plochými řemeny a kluzná ložiska pod.

Zařízení bylo postaveno a odzkoušeno. Zkoušky ukázaly, že toto zařízení je vhodné proměření jak celkové tak monochromatické emisivity.

Na vyvinutém zařízení je možno měřit:

celkovou emisivitu v rozsahu teplot cca 300 až 1 200 °C,

monochromatickou emisivitu v rozsahu teplot 700 až 1 200 °C
v rozsahu vlnových délek 0,4 až 3 μm .

Další vývoj zařízení pro měření emisivity i jeho používání pro měření emisivity materiálů v reálných podmínkách bylo nutno ukončit pro zastavení financování tohoto úkolu.

V. SHRNUTÍ A ZHODNOCENÍ

přínos pro rozvoj vědy a techniky

V souladu s vytyčenými cíly práce jsem provedl univerzální rozdělení pyrometrů. Bezdotykové snímače teploty jsou rozděleny podle toho zda:

- měří teplotu jednotlivých bodů zaměřené plochy nebo plochy jako celku,
- je teplotní údaj získáván subjektivním srovnáváním pozorovatele nebo na základě údaje detektoru,
- pyrometr odvozuje teplotu na základě intenzity záření v jedné nebo několika spektrálních oblastech
- je měřena intenzita záření v úzké spektrální oblasti nebo v celé prakticky využitelné oblasti tepelného záření.

Tento způsob dělení umožňuje zařadit libovolný typ bezdotykového snímače teploty, který indikuje teplotu na základě infračerveného záření. Jeho zařazením do určité skupiny, získá uživatel prvotní informaci o jeho základních vlastnostech - zejména chyby měření způsobené vnějšími podmínkami měření. Toto rozdělení bylo provedeno na základě dlouholetých zkušeností v této oblasti měření teploty i potřeb uživatelů.

Další část vytyčených cílů se týká měření emisivity. Význam této veličiny ve vztahu k pyrometrii je patrný z textu věnovaného rozboru jednotlivých pyrometrů.

Hlavní část práce jsem věnoval měření emisivity povrchu technických látek, zejména ocelí, v podmínkách v nichž se tyto materiály běžně nacházejí, zejména v metalurgických provozech a v provozech těžkého strojírenství.

Při návrhu metody měření emisivity jsem preferoval metody měření emisivity, při níž je přímo poměrovou metodou srovnáváno záření černého zářiče se zářením vzorku měřeného materiálu. Výhodou poměrové metody je vyloučení některých přístrojových chyb, které lze jen těžko eliminovat. V první navržené metodě bylo

srovnáváno záření dvou oddělených zářičů - dutinového černého tělesa a vzorku materiálu. Při zkouškách metody se ukázala jako hlavní překážka pro její použití spolehlivé měření povrchové teploty měřeného vzorku materiálu. Přes veškeré zkušenosti z oblasti měření teploty se mi nepodařilo navrhnout spolehlivou metodu měření povrchové teploty vzorku.

Na základě výsledků zkoušek první metody jsem navrhl novou originální metodu měření emisivity materiálů v reálných - oxidačních - podmínkách. Hlavní předností navržené metody je střídavé vytváření měřeného zářiče i černého tělesa na povrchu vzorku materiálu. Černý zářič je vytvářen umístěním tělesa s vnitřní půlkulovou dutinou se zrcadlovým povrchem těsně nad povrchem vzorku. Tato metoda se ukázala velice vhodnou pro měření emisivity technických materiálů v reálných podmínkách. Po rozsáhlých a postupných zkouškách jsem realizoval poloautomatické zařízení pro měření emisivity technických materiálů. Toto zařízení pro poloautomatické měření emisivity je postaveno na hranici blížící se současným fyzikálně-technickým znalostem a možnostem.

Toto poloautomatické zařízení umožňuje měřit emisivitu technických materiálů v reálných podmínkách. Na vzorku je možno měřit:

- a) celkovou emisivitu v rozsahu teplot cca 300 až 1 200 °C,
- b) monochromatickou emisivitu v rozsahu teplot 700 až 1 200 °C v rozsahu vlnových délek 0,4 až 3 μm .

Spektrální oblast měření emisivity lze rozšířit až do cca 20 μm použitím vhodných hranolů monochromátoru. V případě potřeby měření, zejména monochromatické emisivity při teplotách nižších než 700 °C, je nutno použít detektor záření s podstatně lepšími vlastnostmi (nižší NEP a vyšší detektivita).

Proměřil jsem teplotní závislost emisivity 30 značek ocelí a 5 druhů keramických materiálů. Pro měření emisivity byly vybrány značky materiálu podle požadavků zadávajícího provozu. Na základě požadavku tohoto provozu byl určen i spektrální obor mě-

ření ($\lambda_{ef}=0,85 \text{ } \mu\text{m}$). Od každé značky materiálu byl měřen vždy větší počet vzorků (4 až 20). Z naměřených hodnot byla teplotní závislost emisivity určována metodou lineární regrese. S ohledem na předpokládanou monotónnost výsledné křivky byla uvažována rovnice maximálně 3. řádu.

Měření emisivity jednotlivých materiálů bylo provedeno s uspokojivou přesností o tomsvědčí i rozptyl naměřených hodnot oproti stanovené regresní křivce (tab.3). V průběhu celého měření emisivity měly naměřené hodnoty emisivity rozptyl oproti příslušné regresní křivce:

99,42 % naměřených hodnot s rozptylem 10 %

86,14 % naměřených hodnot s rozptylem 5 %

46,71 % naměřených hodnot s rozptylem 2 %.

Střední kvadratická odchylka naměřených hodnot od regresních křivek se pohybovala od $4,03 \cdot 10^{-3}$ do $3,41 \cdot 10^{-2}$ (0,4 % až 3,41). Konstanty rovnice (43) umožňují přímou korekci naměřených hodnot pyrometrem pomocné počítače.

Rozborem získaných výsledků měření emisivity byly přijaty následující závěry, z nichž některé je nutno brát pouze jako pracovní hypotézy do doby jejich potvrzení větším počtem měření:

- na emisivitu materiálu nemá vliv drsnost opracování povrchu v obvyklých mezích (do 50 HRC),
- vliv způsobu zpracování materiálu na jeho emisivitu lze očekávat pouze do teploty AC3 (pracovní hypotéza),
- na emisivitu oceli nemá vliv pouze změna obsahu jednoho prvku, zejména uhlíku (pracovní hypotéza),
- na teplotní závislost emisivity má vliv vzájemný poměr obsahu jednotlivých legur, který ovlivňuje mechanismus růstu i chemické složení oxidů (pracovní hypotéza).

Přínos pro praxi

Značky materiálů s podobnou teplotní závislostí emisivity jsem soustředil do skupin, pro ně jsem stanovil společnou novou teplotní závislost emisivity - charakteristickou křivku. Celkem jsem vybral sedm charakteristických křivek, z toho pět je určeno

pro oceli a dvě pro keramické materiály. V charakteristických křivkách jsou zařazeny materiály, jejichž teplotní závislost emisivity má rozptyl oproti charakteristické křivce od 0,01 do 0,03.

Výsledky měření emisivit jsou využívány v běžné provozní praxi. Na př. v a.s. Vítkovice Ostrava, při výrobě dílů u nichž je nutno měřit teploty se zvýšenou přesností, jsou přímo v technologickém postupu pro měření teploty pyrometrem zadávány hodnoty emisivity získané z této práce. Při servisních měřeních v tomto podniku jsou současně využívány hodnoty emisivit získané z charakteristických křivek.

Použitá literatura

- 1 LIENEWEG F.: Izmerenije temperatur v technike. Moskva, Metallurgija 1980.
- 2 Směrnice pro měření teplot v průmyslu, ČSN 25 8010 z r.1968
- 3 GERAŠENKO O.A.,: Temperaturnyje izmerenija, a KOL. Kiev, Nauk.dumka 1984.
- 4 WALTER L., a KOL.: Infrarotmesstechnik, GERBER D. Berlin, 1980.
- 5 SVET D.Ja.: Objektivnyje metody pirometrii Moskva, Nauka 1976.
- 6 MICHALSKI L.,: Pomiary temperatury, Warszawa, WNT 1986. ECKERSDORF K.
- 7 NOVIKOV I.I.,: Metody i sredstva optičeskoj pirometrii GORDOV A.N. Moskva, Nauka 1983.
- 8 SVET D.Ja.: Optičeskiye metody izmerenija temperatur v metallurgii, Moskva, Nauka 1979.
- 9 LATYJEV L.N. Izlučatěl'nyje svojstva tverdyh materialov, ČECHOVSKIJ V.JA. (Sborník), Moskva, Energija 1974. ŠESTAKOV E.N. PETROV V.A.
- 10 NOVICKIJ L.A.,: Optičeskiye svojstva materialov pri nizkich STĚPANOV B.M. temperaturach. Moskva, Mašinostrojenije 1980.
- 11 SVET D.JA.: Optičeskiye metody izmerenija istinných temperatur. Moskva, Nauka 1982.
- 12 GÜNTHER F., : Untersuchungen zur Verbesserung der berührungs- NEUER G. losen Temperaturmessung und Erfassung von WÖRNER B. Energietransportvorgängen durch Wärmestrahlung in der industriellen Fertigung, Band 1, Universität Stuttgart, IKE-5TF-657-85.
- 13 SVOBODA J.: Fotografické měření rozložení povrchových MOHYLA F. teplot při současném dopadu rušivého osvětlení: Sb. z konf. Měření teplot v průmyslu 85, Ostrava, DT ČSVTS 1985, str.119-135.
- 14 Sb. z konf. Infračervená radiometrie - infra-systémy, Zlín-Otrokovice, DT ČSVTS 1985.
- 15 Sb. z konf. Bezdotykové měření teplot, Brno, DT ČSVTS 1983
- 16 SNOPOKO V.N.: Spektralnyje metody optičeskoj pyrometrii nag-retoj poverchnosti. Minsk, Nauka i technika 1988.

- 17 DOUBEK J.: Detektory infračerveného záření.
Skripta Přírodovědecké fakulty UP, Olomouc 1981.
- 18 KÖRTVELYESSY L.V.: Thermoelement praxis.
Essen, Vulkan Verlag 1981.
- 19 JENČÍK J.: Technická měření.
Skripta ČVUT Praha, fakulta strojní, Praha 1987.
- 20 Sb. z konf. Temperature, its measurement and
control in Science and Industry, vol.111, Pitts-
burg USA, JSA 1973.
- 21 Sb. z konf. Major problems of present-day radia-
tion pyrometry, Moskva 1986.
- 22 TOLOUKIN Y.S.: Thermal radiative properties, vol.7,8. Thermo
DEWITH D.P. physical properties of matter, New York, Was-
hington 1970.
- 22 NOVÁK J.: Strouhalovo číslo těles a jejich jednoduchých
soustav, zpráva SVUSS Běchovice, č.74-03029.
- 23 KULLIKIN H.F.: Gas temperature measurement and high veloci-
ty thermocouples. Sb. z konference: Tempera-
ture and its measurement and control in sci-
ence and industry. New York, Reinhold 1941,
str.775-805.
- 24 Instruments for Combustion Research, Suction Py-
rometers and Venturi pneumatic Pyrometers, data
sheet 39, firemní literatura fy Land Combustion
Ltd., Anglie.
- 25 Sb. z konf. Infračervená radiometrie, Strážnice,
DT ČSVTS 1988.
- 26 PEPPERHOFF W.: Temperaturstrahlung;
Darmstadt, Verlag dr.D.Steinkopf 1956.
- 27 Sb. z konf. Měření teplot v průmyslu 87, Praha,
DT ČSVTS 1987
- 28 POSKAČEJ A.A., SVEDČANSKIJ A.D.: Pirometry izlučeniya v us-
tanovkakh nagreva, Moskva, Energija 1978.
- 29 ČERNIN S.M.: Izmereniya temperatur malych těl pirometrami
izlučeniya, Moskva, Energija 1980.
- 30 BORIŠANSKIJ V.M., : Příručka sdílení tepla,
KUTALADZE S.S. Praha, SNTL 1962.
- 31 Sb. z konf. Měření teplot v průmyslu 89,
Praha, DT ČSVTS 1989.
- 32 SEYRAFI K.: Engineering design handbook of infrared military
systems, part 1, Washington, Headquarters 1971.

- 33 ČSN 25 8005: Názvosloví z oboru měření teplot.
- 34 KELSALL D.: An automatic emissivity-compensated radiation pyrometer. J.of Sci.Instrum. vol.40, 1963, č.1, s.1-14.
- 35 TOYOTA H. : Improved radiation pyrometry for automatic emissivity compensation. Sb. z konf.Temperature, YAMADA T. its measurement and control in science and NARIAI Y. industry. Vol.4, part 1, Pittsburgh, Instrument Society of America 1972, str.611-618.
- 36 Temperature measurement Handbook 1988-1989, katalog firmy Wahl Instruments, Inc. USA.
- 37 Messung von wahren Objekttemperaturen mit dem Strahlungspyrometer PH 10, Produkt Information 2/88, Keller Spezialtechnik, Pyro-werk GmbH, SRN.
- 38 La mesure des températures à l'aide du pyromètre à aspiration. Rev.Gén.Therm., Fr., n^x 166, Oct.1975, Fiche technique G.E.F. G.N., č.12, str.723-731.
- 39 LAND T., BARBER R.: The design of suction pyrometers. Trans. of the Soc.of Instrum.Technology.
- 40 Směrnice pro měření teplot v průmyslu ČSN 25 8010:z 15.7.1988.
- 41 DOUBEK J.: Konstrukce přístrojů III - infračervená radiometrie, skripta VAAZ Brno 1980.
- 42 MOHYLA F. : Matematické modely pro pyrometrii. kol. Sb. z konf. Bezdotykové měření teplot, Brno, DT ČSVTS, 1983, str.65-70.
- 43 MOHER R.T., : Detection of transient melt temperatures in PLANT H.T. injection molding, , Issue of modern plastics May 1974.
- 44 BAKER H.D.: Temperature measurement in engineering, vol.1, a kol. New York, Wiley 1953.
- 45 BAKER H.A. : Temperature measurement in engineering, vol.2, a kol. New York, Wiley 1961.
- 46 MIKYŠKA L.: Termoelektrické články, Praha, SNTL 1964.
- 47 ŠINDELÁŘ V. KRUPKA F.: Měření teploty. Praha, Práce, 1955.
- 48 MOFFAT E.M.: Multiplex shielded high temperature probes. Comparison of experimental and calculated errors. SAE T-13, 1952, z.I.
- 49 BLÁHA O.: Snímače pro měření vyšších a vysokých teplot proudících plynů: VÚ tepelné techniky, Praha, VÚTT 57-05031, listopad 1957.

- 51 BURTON E.J.: Recent advances in radiation and immersion pyrometry, Instruments, 1953, č.10, str.1524-1525
- 52 DRURY M.D. a kol.: Pyrometers for surface measurement, J.Iron Steel Inst., 1951, č.11, str.245-250
- 53 JARYŠEV N.A.: Ekstrapolacionnyj metod izmerenija temperatury MININ O.V. teplovogo potoka, IVUS. Priborostrojenie 1969, č.1, str.19
- 54 KULAKOV M.V.: Izmerenija temperatury povérchnosti tverдых MAKAROV B.I. těl: Moskva, Energija 1969
- 55 SIMBIRSKIJ D.F.: Temperaturnaja diagnostika dvigatělej, Kijev, Technika 1974
- 56 KING W.J.: Measurement of high temperatures in high velocity gas streams. Trans.ASME-65, 1943, str.421.
- 57 GOERTZEL G.: Některé matematické metody fyziky, TRALLI N. Praha, SNTL 1970
- 58 Applic.Bulletin AB-103, Fa Ircon Inc., Skotie, USA
- 59 WEICHER L. : Temperaturmessung in der Technik - Grundlagen a kol. und Praxis, Grafenau, Lexika Verlag 1976
- 60 Katalog firmy Leeds and Northrup. Nort Wales, Pa, 19454, USA
- 61 RALSTON A.: Základy numerické matematiky, Praha, Academia, 1978
- 62 Instrument for Combustion Research - Suction Pyrometers, Product Data Sheet 116, Firemní materiál fy Land Combustion Ltd., Anglie.
- 63 SVOBODA J.: Referenční zdroje tepelného záření prospekt VÚHŽ Dobrá u Frýdku, 1987
- 64 ASSMAN R.: Das Aspirationsthermometer. Abhandl.kgl.preuss. Meteorolog.Instrum., 1892, z.I., str.117.
- 65 JAKOB M.: Heat transfer., vol.1, Ed.6, New York, Wiley 1958.
- 66 JAKOB M.: Heat transfer., vol.2, New York, Wiley 1957.
- 67 HOTTEL H.C., KALITINSKY A.: Temperature measurement in high-velocity air streams. str.A25-A32.
- 68 BREITKOPF G. : Recovery faktor des frontal angestömten zylindrischen Mentelthermo-elementes mit ebener Stirfläche. Wärme und Stoffübertragung, 1980, č.4, str.287.

vlastní publikace

A) Obsáhlé publikace a knihy

- P101 Pyrometrie: sborník z kurzu "Pyrometrie I", Praha, DT VTS 1989 (se spoluautory účast 81% - 131 str.).
- P102 Pyrometrie; Příklad návrhu měření teploty pyrometrem: sborník z kurzu "Pyrometrie II", Praha, DT VTS 1990 (se spoluautory účast 56% - 168 str.).
- P103 Měření teploty v průmyslu (monografie) Praha, DT VTS 1991, (se spoluautory jako hlavní autor účast 65% - cca 425 str.).

B) Publikace na zahraničních a mezinárodních konferencích

- P104 Měření povrchových teplot pracovních válců teplé válcovací stolice: Sborník z mezinárodní konference "Měření teplot " Praha DT VTS 1975, str. 195-211.
- P105 Měření teploty materiálu při ohřevu a jeho kování: Sborník z mezinárodní konference "Měření teploty", Praha, DT VTS 1978, str. 146-158.
- P106 The emissivity of the oxidized steel (rozbor metody prvé výsledky): Sborník z mezinárodní konference "Temperature VTS 1981, str. 276-284.
- P107 The emissivity of the oxidized steel: (popis inovované metody měření): Sborník ze II. symposia "Thermo-technical measurement", Budapest 1984.
- P108 The emissivity of the oxidized steel (výsledky měření): Acta IMEKO, Budapest, OMIKK-Technoinform, Budapest 1985.
- P109 The emissivity of the oxidized material and apparatus for its measuring: Sborník ze symposia "On major problems on preset-day radiation pyrometry", Moskva 1986.
- P110 Izlučateľnaja spasobnosť, jeho izměrenija i ispolzovanije v pyrometrii: Sborník z konference "Elektrotérmometrija 88", Lvov, Luck 1988.
- P111 A dynamic response of sheathed thermocouples in low absolute pressure air flow: IMEKO symposium "Microprocessors on temperature and thermal measurement", Lodz, Tech. univerzita a IMEKO, květen 1989, str. 81-88, (se spoluautory účast 30%).
- P112 Das dynamische Verhalten von Mantelthermoelementen in strömender Luft bei niedrigen Drücken: Sborník z Tagungsband "Temperatur '89", Suhl: Kamer der technik, říjen 1989, Teil II, str. 217-223 (se spoluautory účast 40 %)
- P113 Emissiongradmessungen und Materialcharakterisierung: Kolloquium "Hochtemperaturprobleme Rückkehrfähiger Raumtransportsysteme: Univesität Stuttgart, Sonderfoschungsbereich 259, 11.06.91 (bez sborníku).

C) Publikace v časopisech a sbornících z konferencí - tuzemské:

- P114 Moderní čidla pro měření teploty - plášťové termočlánky: Sborník z konference "Měření teplot v provozech VŽKG", Ostrava 1973.
- P115 Teplotní podmínky válců při válcování a jejich experimentální stanovení: Sborník z konference "Směry vývoje hutních válců" Ostrava 1973.
- P116 Směrnice pro měření teplot v průmyslu (se spoluautory, účast 30 %): ČSN 25 8010, Praha 1975.
- P117 Metody měření teplot pracovních válců v průběhu válcování: Sborník z "3.konference o směrech vývoje hutních válců" Ostrava 1976.
- P118 Zkušenosti z použití plášťových termočlánků při měření teploty v ohřívacích pecích: Sborník z konference "Nové směry v termomechanice pecí", Havířov 1976, str. 475-487.
- P119 Měření teplot termočlánky a odporovými teploměry: Sborník ze semináře krajské metrologické sekce ČS VTS, Ostrava 1977.
- P120 Možnosti bezkontaktního měření teploty v ohřívacích pecích: Sborník z konference "Tepelná technika a automatizace v hutích", Třinec 1977.
- P121 Časová stabilita plášťových termočlánků a zkušenosti z jejich použití: Sborník z konference "Měření teplot v chemii": Pardubice 1976, str.74 -97.
- P122 Bezkontaktní měření povrchové teploty materiálu v pecním prostoru: Sborník z konference "Metrologické problémy měření teploty": Pardubice 1978, str. 127-144.
- P123 Přesné měření teplot plynů: Sborník z konference "Metrologické problémy měření teploty" Praha 1980, str. 92-104.
- P124 Možnosti přesného měření teploty ohřívaného materiálu v žíhací peci: Sborník z konference "Inovace průmyslových pecí pro tepelné zpracování odlitků": Český Krumlov, DT VTS 1980, str. 86-104.
- P125 Časová stabilita plášťových termočlánků NiCr-Ni: Sborník z konference "Metrologie teploty": Hradec Králové, DT VTS 1982, str. 119-129.
- P126 Problematika bezkontaktního měření teploty: Sborník z konference "Měření teploty v průmyslu", DT VTS, Ostrava 1983, str. 117-126.
- P127 Poměrná zářivost oceli: Sborník z konference "Bezdotykové měření teploty", DT VTS, Brno 1983, str. 77-83.

- P128 Měření teploty před navařováním: Sborník z konference "Metrologie teploty 84" Praha, DT VTS 1984, str. 135-141.
- P129 Možnosti bezkontaktního měření teploty vsázky na palivových pecích: Sborník z konference "Racionalizace tepelného zpracování odlitků": Český Krumlov, DT VTS 1984, str. 55-66.
- P130 Emisivita materiálu, její časové změny a vliv na bezkontaktní měření teploty: Sborník z konference "Měření teploty v průmyslu 85", Ostrava, DT VTS 1985, str. 126-134.
- P131 Zařízení pro měření zářivosti Sborník z konference "Infračervená radiometrie": Otrokovice 1985, str 59-68.
- P132 Postup prací na novelizaci ČSN 25 8010 - Směrnice pro měření teplot v průmyslu: Sborník ze "Dne metrologie", Ostrava 1986, str. 26-31.
- P133 Měření teplot v průmyslu - zpráva z konference: čas. Standardizace 1986, vol. 11, č.6, 3.str. obálky.
- P134 Metrologie teploty - zpráva z konference: čas. Automatizace, vol. 30, č.1, str. 28-9.
- P135 Základní problémy současné pyrometrie - zpráva ze symposia: čas. Standardizace, vol.12, č. 9, str. 393-5.
- P136 Zkušenosti z práce konzultačního střediska "Měření teploty": Sborník z konference "Měření teploty v průmyslu 87", DT VTS Praha 1987, str. 10-14.
- P137 Současná úroveň špičkové pyrometrie ve světě Sborník z II. semináře "Měření, regulace a automatizace" Znojmo 1987, str. 135-145.
- P138 Symposium "Major problems of present-day pyrometry" zpráva čas. Automatizace 1987, vol 30, č. 10, vložka.
- P139 Záříče pro kontrolu pyrometrů (se spoluautory účast 25%) Sborník z konference "Měření teploty v průmyslu 87", DT VTS Praha 1987, str. 255-257.
- P140 Dotykové měření teploty materiálu v pecích Sborník ze školení "Měření a regulace teplot v keramickém průmyslu", DT VTS Brno 1987, str. 34-41.
- P150 Pokroky světové pyrometrie: Sborník ze "Dne metrologie 87" Ostrava, ZP VTS, listopad 1987.
- P151 Zařízení pro měření zářivosti: Sborník z konference "Infračervená radiometrie - infrasytémy" DT VTS, Brno 1985, str. 59-66.
- 152 Metrologie teploty: Studijní skripta z kurzu: "Aplikovaná metrologie": Institut VHJ Vítkovice, str. 177-198/12 (33 str.).
- P153 Pokroky pyrometrie ve světě Sborník ze školení "Měření a regulace teplot v keramickém průmyslu", DT VTS Brno 1987, str. 3-7.

- P154 Hlavní problémy současné pyrometrie
Sborník z konference "Měření teploty v průmyslu 87", DT VTS
Praha 1987, str. 293-302.
- P155 Zkušenosti z práce konzultačního střediska "Měření teploty"
Sborník z II. semináře " Měření, regulace a automatizace"
Znojmo 1987, str. 129-134.
- P156 Typové zkoušky měřidel: Sborník z konference "Metrologie
teploty 88" Praha, DT VTS 1988, str. 35-38.
- P157 Charakteristické křivky emisivit: Sborník z konference
"Infračervená radiometrie", Brno, DT VTS 1988 (7 str.).
- P158 Dynamické vlastnosti pláštových termočlánků v proudu
vzduchu za nízkých absolutních tlaků: Sborník z konference
"Měření teploty v průmyslu 89", Praha, DT VTS 1989,
str.58-67 (se spoluautory účast 50 %).
- P159 Bezdotykové měření teploty: kapitola ze skript kurzu Apli-
kovaná metrologie (dodatek): Institut VHJ Vítkovice Ostrava
1989, str. 12-47.
- P160 Měření teploty tekutin: Sborník z konference "Měření, mode-
lování a regulace tepelných procesů", Ústí n/Orlicí,
ZP ČSVTS a Úst. pro zprac. chem. vláken, říjen 1990,
str. 36-44.
- P161 Dvoupásmové a vícepásmové metody pyrometrie: Sborník z kurzu
"Měření teplot a jejich vyhodnocování (aplikace theoretic-
kých postupů při měření teplot)", Praha, DT VTS 1991,
str 129-155.
- P162 Směrnice pro měření teplot v průmyslu: ČSN 25 8010, vydava-
telství Úřadu pro normalizaci a měření Praha 1988,
(se spoluautory účast 15 %).
- D) Výzkumné zprávy
- P163 Vývoj termoelektrických teploměrů pro vysoké teploty:
Zpráva VŽKG 943.4-074-68, Ostrava, únor 1968.
- P164 Měření teplot pod mřížovím 3. ohříváče větru 6. VP:
Zpráva VŽKG 943.4-075-68, Ostrava, září 1968.
- P165 Výroba odporových a termoelektrických teploměrů pro OV 64:
Zpráva VŽKG 943.4-077-68, Ostrava, listopad 1968.
- P166 Měření povrchových teplot válců 4,5 m duo:
Zpráva VŽKG 940.23-104-71, Ostrava, únor 1971.
- P167 Měření povrchových teplot válců 3,5 m kvarto VŽKG:
Zpráva VŽKG 940.23-126-72, Ostrava, listopad 1972.
- P168 Měření teplot pláštovými termočlánky:
Zpráva VŽKG 940.23-1081-73, Ostrava, září 1973.
- P169 Zpráva VŽKG 940.23-183-75, Ostrava, listopad 1975.

- P170 Analýza průběhu teplot v pracovní vrstvě válce v závislosti na parametrech válcování a válcovaného materiálu, při válcování plechů pásů za studena (se spoluautorem, účast 50%) : Zpráva VŽKG 940.23-1082-73, Ostrava, listopad 1973.
- P171 Ověřování radiačních pyrometrů Ardocol-Siemens a U-Pyr - Uher Zpráva VŽKG 940.23-186-75, Ostrava, listopad 1975.
- P172 Výzkum a vývoj algoritmu ohřívacích pecí s ohledem na optimalizaci válcovacího procesu (se spoluautorem, účast 50%): Zpráva VŽKG 940.23-187-75, Ostrava, listopad 1975.
- P173 Moderní metody pro měření teploty materiálu v pecích pro
P174 ohřev a tepelné zpracování:
P175 Zpráva VŽKG 940.23-1100-77, Ostrava, únor 1977 - studie,
P176 Zpráva VŽKG 940.23-1103-77, Ostrava, listopad 1977-průb.zpráva,
Zpráva VŽKG 940.23-218-79, Ostrava, září 1979
- průb.zpráva,
Zpráva VŽKG 940.23-241-80, Ostrava, listopad 1980
zav.zpráva.
- P177 Měření protlačovací trati ve VTŽ Chomutov:
Zpráva VŽKG 940.23-192-76, Ostrava, březen 1980.
- P178 Zpřesnění měření teplot v průběhu ohřevu a kování oceli:
P179 Zpráva VŽKG 940.23-256-82, Ostrava, listopad 1982, - studie,
Zpráva VŽKG 940.23-268-85, Ostrava, červen 1985
- záv.zpráva.
- P180 Měření teploty při navařování
Zpráva VŽSKG Ostrava, prosinec 1983.
- P181 Výzkum měření teplot při technologickém zpracování oceli 10GN2MFA: Zpráva VŽKG 940.11-282-86, Ostrava, červenec 1986.
- P182 Montáž zařízení pro zkoušky v THZ (se spoluautory, účast 30%): VÚAP - OSAT, protokol č.1974, zpráva z etapy 20.02
- P183 Ověření dynamických vlastností měřicích sond:
(se spoluautorem, účast 30%)
VÚAP - OSAT, protokol č.2068, zpráva z etapy 20.03.
- P184 Projekt metrologického zabezpečení programu Vltava:
VÚAP - OSAT, protokol č.2085, zpráva z etapy 20.
- P185 Přípravné práce pro zajišťování speciálních měření na agregátu J/K - měření teploty:
VÚAP - OSAT, protokol č.2084, zpráva z etapy 20.
- P186 Příprava metrologického zabezpečení zakázek VLTAVA:
VÚAP - OSAT, protokol č.2319, zpráva z etapy 20, prosinec 1988.
- P187 Modernizace měření teplot v provozech MZ KSB (studie pro Královopolskou strojírnou Brno): DT ČSVTS Praha, 31. srpna 1989.
- P188 Měření teplot v reakční troubě (Návrh měření pro CHZWP Nováky, I. část): Praha, DT ČS VTS, září 1989.

- P189 Přípravné práce pro zajišťování provozu metrologické laboratoře: VÚAP - OSAT, protokol č.2438, zpráva z etapy 20/02, prosinec 1989.
- P190 Inovace rychlých teplotních sond:
- P191 VÚAP - OSAT, protokol č.2328, zpráva po 2. etapě, prosinec 1988.
VÚAP - ÚSAT, protokol č.2561, závěrečná zpráva, červen 1990.
- P192 Výzkum vlastností teplotních sond za nízkých absolutních tlaků, VÚAP - OSAT, protokol č.2437, zpráva z etapy 20/02, prosinec 1989.
- P193 Měření teplot pro Agrostroj Jičín (měření teplot litiny při odlévání) Temperature eng. Praha, zpráva č. 001/90, prosinec 1990
- P194 Příprava k činnosti metrologické laboratoře
VÚAP - ÚSAT, protokol č.2564, zpráva z etapy 20/01, červen 1990.
- P195 Výzkum vlastností snímačů za nízkých tlaků a teplot .
VÚAP - ÚSAT, protokol č.2563, zpráva z etapy 20/01, červen 1990.
- P196 Výzkum pevnostních charakteristik snímačů. (zpráva spolupráci s SVÚSS Běchovice),
VÚAP - ÚSAT, protokol č.2562, červen 1990.
- P197 Speciální snímače teploty:
VÚAP - ÚSAT, protokol č.2560, závěrečná zpráva, červen 1991.
- P198 Spektrální vlastnosti umělých střev
VUAP-ÚSAT, protokol č.2662, závěrečná zpráva, červen 1991.
- P199 Výpočty a zkoušky výměníků V7 a V22: VÚ armatur a potrubí:
Zpráva č. 3629/92-TP300, Praha, červen 1992.