

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Obor 23-07-8

strojírenská metalurgie

Katedra materiálů a strojírenské metalurgie

MĚŘENÍ TEPLŮ PŘI VELMI RYCHLÝCH TEPLŮTNÍCH ZMĚNÁCH

KMM-201

Petr S k a l a

Vedení diplomové práce: Ing. Jiří Horyna, CSc.

VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh: 66

Počet stran: 66

Počet tabulek: 13

Počet obrázků: 29

Počet příloh: -

Počet výkresů: -

23.května 1986

Vysoká škola: **Liberec**

Fakulta:

Katedra: **materiálu a strojírenské metalurgie**

Školní rok:

1985/86

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Petr S K A L A

pro

strojírenská technologie

obor

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Měření teplot při velmi rychlých teplotních změnách**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na dané téma.
2. Navrhněte způsob měření teplot vhodný pro ohřevy kovů laserem.
3. Proveďte experimentální měření.
4. Kriticky zhodnoťte navrženou metodu.

VYSOKÁ ŠKOLA DŘEVNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PSČ 461 17

V 209/86 S

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: 50 - 60 stran

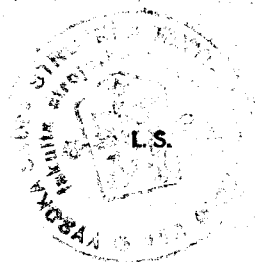
Seznam odborné literatury:

- /1/ MYKYSKĚ, L.: Měření teplot termočlánky
- /2/ Výzkumné zprávy vypracované na KMM
- /3/ Další literatura podle dispozic vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Horyna, CSc

Datum zadání diplomové práce: 9.9.1985

Termín odevzdání diplomové práce: 23.5.1986



Alaxin
Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc

Vedoucí katedry

Alaxin
Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc

Děkan

Liberci

3.9.

85

V dne 19.....

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

Petr Skala

Petr S k a l a

O B S A H

1. ÚVOD	7
2. LASER ZDROJ ENERGIE	9
2.1. Princip laseru	9
2.2. Využití laseru	10
3. METODY MĚŘENÍ TEPLoty	12
3.2. Dotykové metody měření teploty	12
3.2.1. Odporové teploměry	12
3.2.2. Termoelektrické teploměry	14
3.2.3. Krystalický teploměr	17
3.3. Bezdotykové metody měření teploty.....	19
3.3.1. Fotografická pyrometrie	20
3.4. Čidla pro bezdotykové měření teploty	21
3.4.1. Fotorezistor	21
3.4.2. Fotoelektrický článek	21
3.4.3. Fotoelektrický násobič	22
3.4.4. Fototranzistor	24
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	25
4.1. Výběr čidla	25
4.2. Chyby při měření termočlánky	25
4.3. Vliv časové konstanty na přesnost měření teploty	27
4.3.1. Řešení rovnice rekonstrukce signálu	27
4.3.2. Určení dynamické chyby měření	28
4.3.3. Závislost $\Delta t - v$	30
4.3.4. Závislost $\Delta t - \tau$	31
4.3.5. Závislost $\tau_z - \tau$	35

4.3.6. Závislost $\tau_z - v$	36
4.3.7. Závislost $\Delta t - \tau_z$	37
4.3.8. Shrnutí závislostí	38
4.4. Rychlost ohřevu termočláňku	40
4.4.1. Výpočet doby ohřevu termočláňku	40
4.4.2. Výpočet pro konkrétní hodnoty předpokládané v experimentu	42
4.5. Experimentální měření časové konstanty	46
4.5.1. Použité zařízení	46
4.5.2. Naměřené hodnoty	47
4.5.3. Diskuse dosažených výsledků	52
4.6. Měření teploty termočláňky při ohřevu laserem	54
4.6.1. Ohřev kontinuálním laserem	54
4.6.2. Ohřev pulsním laserem	57
5. ZÁVĚR	63

Seznam značek a symbolů

- a - teplotní vodivost
- λ - součinitel teplotní vodivosti
- c - měrná tepelná kapacita
- ζ - měrná hustota
- α - součinitel přestupu tepla
- s - polovina tloušťky desky
- B_i - Biotevo číslo
- F_o - Fourierovo číslo
- F, φ - funkce
- x - vzdálenost měřeného bodu od středové osy
- T_m - sledovaná hodnota teploty středního vlákna v čase
- T_k - teplota lázně
- T_o - počáteční teplota tělesa
- τ - čas
- y - záznam
- k - konstanta úměrnosti
- τ_z - časová konstanta systému
- v - rychlost ohřevu
- R - rychlost tuhnutí
- G - teplotní gradient
- a, b, c - konstanty termačlánku
- Δt - rozdíl teplot
- t_t - teplota teplého konce
- t_s - teplota studeného konce
- α_A, α_B - součinitele určující velikost termoel. napětí

1. ÚVOD

Rozvoj strojírenského průmyslu v posledních letech nese mimo jiné, zvýšené nároky na nové materiály, na jejich vlastnosti a také snížení energetické náročnosti.

To bylo konstatováno i v politické zprávě ÚV KSČ na XVII. sjezdu. ČSSR se účastní na realizaci programu vědeckotechnického pokroku členských zemí RVHP do roku 2000. Tento program je také mimo jiné zaměřen na výrobu nových materiálů, uplatnění nových technologií a techniky, plně odpovídající československým potřebám.

Také na XXVII. sjezdu KSSS bylo konstatováno, že je nutný urychlený rozvoj odvětví náročných na vědecké poznatky.

Ve Zprávě o hlavních směrech hospodářského rozvoje a sociálního rozvoje SSSR bylo uvedeno, že jedním z nejdůležitějších směrů vědeckotechnického pokroku je rozsáhlé zavádění progresivních technologií. Ve 12. pětiletce se má rozšířit uplatnění progresivních technologií pro každé odvětví základních technologií o 50 - 100 %. Významné místo zaujmou zásadně nové technologie, jako jsou membránové, laserové, plazmové technologie s využitím vysokých tlaků a impulsních zatížení atd. Rozsah jejich využití se několikanásobně zvýší, což bude mít bezpochyby velký hospodářský efekt.

Jedna z nejmodernějších technologií používaných v tepelném zpracování je laserová technologie. V našem strojírenství není však použití laseru ještě v podstatě uplatněno.

Přitom jeho využívání poskytuje velké možnosti, jak v obrábění, tak i v tepelném zpracování materiálů. Použít

laser například k transformačnímu zpevnění, znamená celkově snížit náklady na výrobu součástí, zvýšit produktivitu práce, zlepšit mechanické vlastnosti součástí. Většinou odpadají i dokončovací operace, jako je broušení, lapování apod. Dochází také ke zlepšení pracovního prostředí.

Metody tepelného zpracování jsou vysoce citlivé na dodržení jak maximální teploty, tak i celého režimu ohřevu a ochlazování. Rychlost ohřevu i samoochlazení se pohybuje při používání laseru řádově dokonce i v desítkách tisíc Kelvinů za sekundu.

Metoda měření teploty, která by byla schopna zaznamenat tyto rychlosti s dostatečnou přesností nebyla dosud publikována.

K řešení tohoto problému by měla přispět tato práce, jejímž cílem je ověřit možnosti měření těchto velmi rychlých teplotních dějů. Především však zhodnotit využití termočlánků pro toto měření. Zjistit jeho rychlost odezvy na teplotní změnu a určit chyby, které by při tomto měření mohly vzniknout.

2. LASER ZDROJ ENERGIE

2.1. Princip laseru

Laser je zdroj elektromagnetického vlnění o frekvencích ve světlené oblasti nebo blízkém okolí.

K zesílení dochází pomocí stimulované emise záření. Vybuzenému elektronu, který se nachází na vyšší energetické hladině se dodá foton o frekvenci daného přechodu. Vybuzený elektron se vrací na nižší energetickou hladinu. Přitom odevzdává energii hf. Tím dochází k zesílení energie.

Tato energie může být velmi vysoká. Viz tabulka 1. Pro srovnání uvádím některé klasické zdroje /2/.

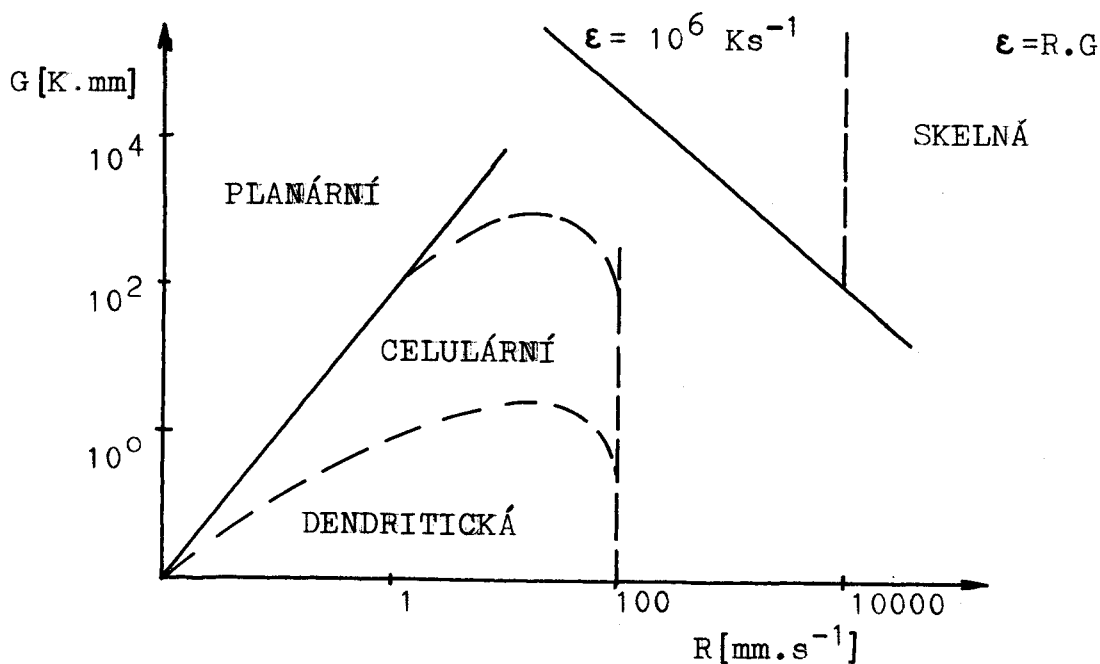
Tabulka 1. Koncentrace tepelné energie dosažitelná různými zdroji

ZDROJ ENERGIE	KONCENTRACE ENERGIE (W. cm^{-2})
Acetylénoxylový plamen	$1 \cdot 10^3$
Kyslíkovodíkový plamen	$3 \cdot 10^3$
El. oblouk	$1 \cdot 10^4$
Plazmový paprsek	$1 \cdot 10^6$
CO ₂ laser	$1 \cdot 10^8$
Elektronový paprsek	$4 \cdot 10^8$
Argonový laser	$5 \cdot 10^8$
Rubínový laser	$5 \cdot 10^{13}$

2.2. Využití laseru

V současné době se udává řada možností využití laseru /7/, avšak výkonové CO₂ lasery (s výkonem nad 1 kW) se používají zatím jen v několika technologických aplikacích, a to při řezání, svařování a tepelném zpracování, přetavování povrchu, dolegování apod.

Při laserovém krátkodobém natavování se v závislosti na teplotním gradientu a rychlosti tuhnutí dá dosáhnout různé struktury.



Obr. č. 1

Určité druhy struktury jsou vhodné pro určité druhy namáhání. S rostoucí rychlostí tuhnutí pokračující zjemňování zrna zvyšuje současně pevnost i tažnost.

Při vysokých rychlostech ohřevu povrch oceli a následném samoochlazení, jak uvádí výzkumná práce VŠST /7/, dochází

k zvýšení

tvrdosti. V ozářené zóně vzniká submartenzitická jemně jehlicová struktura a není vyloučeno zpevnění feritu při fázové přeměně a deformace zrn feritu.

Vysoké rychlosti ohřevu a ochlazování vedou také k posunu kritických bodů A_c a A_r . Čím vyšší je rychlost ohřevu, tím méně homogennější je vznikající austenit a tím větší je teplota austenitizace.

Jemnost struktury si vynucuje tyto vysoké rychlosti ohřevu a ochlazování. Při vysoké intenzitě dopadajícího záření je třeba snižovat délku interakce, nemá-li dojít k natavení. Tím se současně snižuje tloušťka tepelně ovlivněné vrstvy. Vzhledem k těmto faktům je třeba znát velmi přesně parametry materiálu k dosažení žádaného efektu.

3. METODY MĚŘENÍ TEPLoty

3.1. Rozčlenění metod měření teploty

Měření teplot je možné provádět několika metodami. Je možné je rozčlenit podle způsobu kontaktu s měřeným tělesem na dotykové a bezdotykové metody.

Dotykové metody měření je možné provádět pomocí polovodičových odporových teploměrů, odporových teploměrů a termoelektrických teploměrů.

Je možné také využít teplotně závislé změny rezonančního kmity křystalu.

Bezdotykové metody měření je možné provádět pomocí barevného pyrometru, jasového pyrometru, fotoelektrického pyrometru a integrálního pyrometru.

Některé metody, které by bylo možné uplatnit pro měření velmi rychlých teplotních změn budou dále podrobněji rozebrány.

3.2. Dotykové metody měření teploty

3.2.1. Odporové teploměry

Odporové teploměry /3/ patří mezi pasivní prvky elektrického obvodu, tj. jsou napájeny proudem a měří se jejich odpor v závislosti na teplotě. Při vlastním měření je teploměr ohříván

měrným proudem, který musí být co nejmenší.

Vlastním čidlem je vodič z platiny, niklu, mědi nebo india. Nejpožívanější platinové teploměry mají vodič o průměru 0,05 až 0,1 mm navinutý uvnitř keramické spirály. Tyto teploměry měří sice s vysokou přesností v rozsahu až do 1273°C, ale pro svou velkou časovou konstantu (30 sec) jsou nepoužitelné pro měření vysokých rychlostí ohřevů. Tento nedostatek odstraňují tzv. vrstvené (filmové) teploměry /3/. Snímač je tvořen vrstvou platiny nebo niklu o tloušťce 0,1 až 0,01 μm, který se dosáhne buď vákuovým napařením, nebo u platiny nanesením pasty a následným vypálením. Podkladem této vrstvy je sklo nebo keramika.

Teplotní použitelnost je do 560°C (nikl), 820°C (platina na skle), 1870°C (platina na keramice). Odpor snímače je podle tloušťky napařené vrstvy 60 - 100 Ω. Teplotní součinitel odporu u niklové vrstvy je $3 \cdot 10^{-3} \Omega^{\circ C^{-1}}$, u platinové vrstvy $2 \cdot 10^{-3} \Omega^{\circ C^{-1}}$. Výhodou snímačů je malá časová konstanta, kolem 1 μs, vysoká stabilita a mechanická odolnost /3/.

Odporový teploměr přes své jinak dobré vlastnosti není vhodné použít pro měření teploty na povrchu kovu při rychlých změnách teploty.

Protože teploměrem probíhá proud, je nutné ho izolovat od měřeného povrchu. Proudová izolace tvoří současně i izolaci tepelnou.

Při ohřevu laserem, kdy paprsek dopadá na povrch kovu, teploměr zakrývá část měřeného povrchu kovu, která zůstane chladnější než okolí. Zároveň se však sám teploměr zahřívá daleko rychleji než okolní povrch kovu. Výsledky měření proto neodpovídají skutečnosti.

3.2.2. Termoelektrické teploměry /4/

Podstatou termoelektrických jevů je přímá přeměna tepelné energie v energii elektrickou.

Je-li obvod složen ze dvou různých vodičů nebo slitin a mají-li spoje těchto vodičů různou teplotu, pak v tomto obvodu vzniká termoelektrická síla.

Uvnitř vodiče se pohybují elektrony. Vystoupení elektronů z vodiče zabráňuje potenciálová překážka, tvořená ionty krystalické mřížky.

Při spojení dvou kovů dokonale vodivým stykem mohou elektrony z kovu s nižší potenciálovou překážkou přestupovat do kovu s vyšší potenciálovou překážkou a vytváří tak elektrický proud.

Velikost termoelektrické síly se rovná:

$$dE_s = e dt$$

e - termoelektrická síla způsobená zvýšením teploty o 1°C , je funkcí spoje, který měříme.

V obvodu tvořeném dvěma vodiči z různého kovu vzniká mezi chladným a teplým koncem napětí:

$$U = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot (t_t - t_s) \quad [\text{mV}]$$

Tato je však poněkud složitější, obecně je termoelektrické napětí úměrné rozdílu funkcí teplot spojů termoelektrického článku.

$$U = \text{konstanta} \cdot [\varphi(t_t) - \varphi(t_s)] \quad [\text{mV}]$$

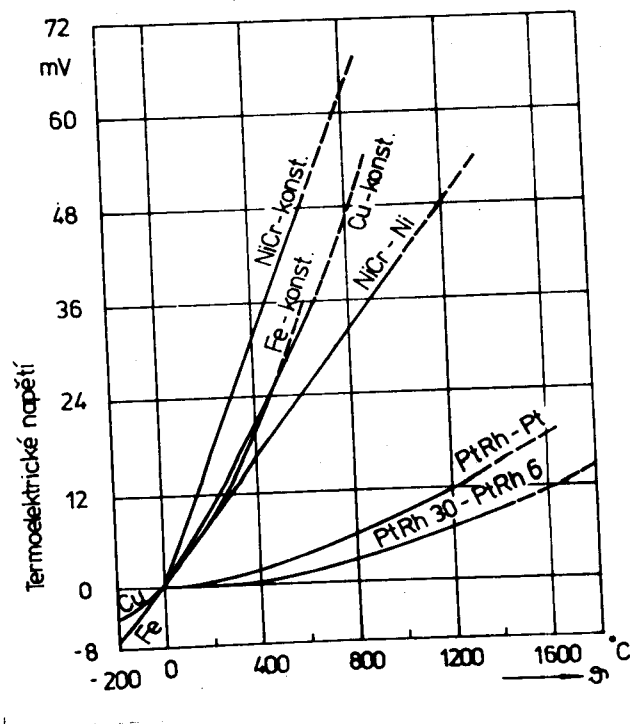
Pro přesnější vyjádření je možné použít vztahu:

$$U = a + b \cdot \Delta t + c \cdot (\Delta t)^2 \quad [\text{mV}]$$

Jako termočlánky se používá několik dvojic kovů o těchto vlastnostech, které jsou zaznamenány v tabulce č. 2.

Tabulka č. 2:

Termoelektrický článek	Cu - Ko	Fe - Ko	NiCr - Ni	PtRh - Pt
Rozsah použití °C	- 200 + 600	-200 +900	0 +1200	0 +1600
Termoel. napětí mV/100°C	4,25	5,37	4,04	0,64



Obr. č. 2. Termoelektrické napětí hlavních elektrických článků v závislosti na teplotě měřeného konce.

- Termoelektrické napětí je ovlivňováno řadou faktorů /3/ např.:
1. Nehomogenitou materiálu, která může být chemická nebo strukturní a kvalitou svaru, včetně čistoty termočlánekových větví.
 2. Stárnutí, které zahrnuje celý soubor změn.
 3. Způsobem zhotovení spoje, jako je chemické spojení, mechanické spojení, případně nesjednocené cejchování.

Vlivem konečné doby šíření signálu dochází ke zpoždění teplotních údajů /5/.

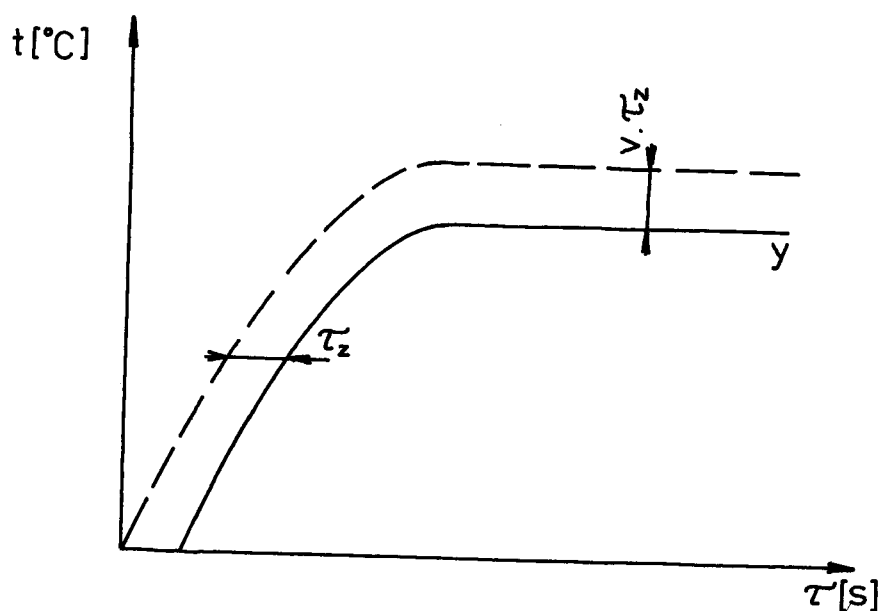
$$\tau_z \cdot \frac{dy}{d\tau} + y = k \cdot t$$

Řešení této rovnice je provedeno za předpokladu, že teplota roste lineárně s rychlostí ohřevu.

$$t = v \cdot \tau$$

$$y = k \cdot \left[t - v \cdot \tau_z \cdot \left(1 - \exp \left(- \frac{\tau}{\tau_z} \right) \right) \right]$$

Jestliže je zanedbán člen $\exp \left(- \frac{\tau}{\tau_z} \right)$, který se uplatní pouze na počátku ohřevu, pak je možno tento vztah chápat tak, že teplotní záznam je proti skutečnosti zpožděn o $t = v \cdot \tau_z$. Nebo tento vztah upravit dosazením $t = v \cdot \tau$ a chápat vztah tak, že je záznam opožděn o dobu τ_z .



Obr. 3

Přesnější vyjádření odchylky naměřené teploty od teploty skutečné se budu zabývat v experimentální části.

Termoelektrické teploměry je možno pro měření velmi rychlých změn použít za předpokladu, že provedeme korekci naměřené hodnoty.

3.2.3. Krystalový teploměr Hewlett-Packard 2801A /11/

Krystalový teploměr tvoří ucelený měřicí systém, který zajišťuje precizní digitální indikaci teploty s citlivostí 0,0001 °C.

Čidlem teploměru je speciálně upravený krystalový výbrus, zapojený v rezonančním obvodu tranzistorového oscilátoru. Mě-

řená teplota mění rezonanční kmitočet krystalu a tím také frekvenci oscilátoru snímače. Kmity snímačového teplotně závislého oscilátoru jsou ve směšovači porovnávány s kmity teplotně nezávislého referenčního oscilátoru přístroje. Rozdílový kmitočet je vyhodnocen čítačem a indikován na šestimístném displeji, jehož frekvenční rozdíl přesně odpovídá teplotě. Indikátor udává přímo teplotu ve stupních Celsia.

Technická data přístroje - souhrn

Rozsah měřených teplot: -80°C až $+250^{\circ}\text{C}$

Rozlišovací schopnost: $0,01^{\circ}\text{C}$ při době integrace 0,1 s

$0,001^{\circ}\text{C}$ 1,0

$0,0001^{\circ}\text{C}$ 10,0 s

Časová konstanta přístroje: menší než 2 s (měřeno ve vodě proudící rychlostí $0,6 \text{ ms}^{-1}$).

K přístroji je možno připojit děrovač pásky nebo štítku, číslicový zapisovač atd.

Čidlo pro snímač tvoří krystalový výbrus o průměru 6 mm hermeticky uzavřený ve válcovém pouzdru z nerezové oceli s vnějším průřezem 0,5 mm. Pro zvýšení teplotní vodivosti je pouzdro plněné héliem.

Problematika využití tohoto přístroje spočívá v embergování většiny výrobků firmy H-P. Po úpravách čidla by tento přístroj bylo možno použít pro měření rychlých změn teploty.

3.3. Bezdotykové metody měření teploty

Při vyhodnocování údajů získaných bezkontaktními čidly je nutné vycházet z toho, že bezdotykové teploměry využívají ke své funkci tepelné záření měřeného tělesa.

Podle funkce je dělíme na:

1. radiační - využívající celkové záření tělesa
2. spektrální - využívající záření určité vlnové délky nebo úzkého pásma
3. barvové - využívající barvy měřeného tělesa.

Výhodou bezdotykových teploměrů je možnost měřit teplotu těles s malou hmotností, teplotu těles s malou tepelnou kapacitou a teplotu pohybujících se těles.

Metoda měření teploty uvedená v 2. bodě, to je metoda využívající záření určité vlnové délky, byla použita ve výzkumné práci J. Laurina /10/.

Záření je snímáno ze spalovacího prostoru motoru sondou. Dopadá po průchodu světlovodem a interferenčními filtry, které propouštějí pouze úzká pásma záření v blízkosti vlnových délek λ_1, λ_2 , na fotokatody fotonásobičů. Napětí z anodových odporů fotonásobičů je po zesílení zesilovači vedeno na obrazovku osciloskopu. Průběhy napětí se fotografují z obrazovky. Teplota v měřeném prostoru se vypočítává buď z poměrů zářivosti nebo z poměru zářivosti a jedné absolutní výchylky. Výpočet teploty se provádí pomocí počítače.

Aplikace této metody na měření teplot při ohřevu laserem by byla poměrně obtížná.

Ohříváný vzorek se nechová jako "černé těleso". To znamená, že ho musíme považovat za "nečerné těleso". Pohltivost, která figuruje ve vzorcích pro přepočet na černé těleso je závislá na vlnové délce a teplotě. Její velikost jde poměrně těžko určit s dostatečnou přesností.

Vzorek se velmi rychle pokrývá oxidickými vrstvami, které vyzařují jinak než základní materiál.

Při použití stávajícího zařízení lze měření provádět v rozsahu teplot 1800°C až 3000°C. Tento rozsah je pro měření teplot vzorků ozářených laserem nepoužitelný.

Odrážené laserové záření by zkreslovalo naměřené údaje. Z hlediska možnosti realizace zařízení je nesnadné opatřit jeho součásti, avšak řešitelné to je.

3.3.1. Fotografická pyrometrie

Fotografická pyrometrie /6/ využívá stejně jako parciální pyrometrie záření tělesa v určitém spektrálním oboru.

Přednost fotografického pyrometru před optickou je, že umožňuje měřit rozdělení teploty měřeného objektu na ploše ohraničené zorným úhlem záběru. Dále umožňuje měřit změny v libovolné časové periodě a měření pohybujících se předmětů.

Princip je založen na skutečnosti, že měřené těleso a srovnávací vyvolávají při stejné vyzařované intenzitě stejné zčernání filmu.

Měření teplot je prováděno srovnáním zčernání filmu, na kterém je nafotografován měřený zdroj, se zčernáním filmu, na

kterém je nafotografován srovnávací zdroj záření při různých teplotách. Jako porovnávací zdroj je používáno wolframové lampy (tzv. wolframový normál), u něhož je možno intenzitu záření regulovat žhavicím proudem.

Spektrální obor, ve kterém je prováděno měření, je volen blízký nebo stejný s oborem používaným při měření optickým pyrometrem, protože je jím kalibrována srovnávací lampa.

Obor měření teplot je směrem k nízkým teplotám ohraničen citlivostí používaného filmu v dlouhovlném oboru spektra. Směrem k vyšším teplotám je hranice určena vyzařováním srovnávací lampy.

Přesnost fotopyrometru závisí na přesném stanovení teploty srovnávací lampy, zpracování fotografického materiálu a optickém systému. Celková chyba měření je při respektování všech dalších chyb $4,5^{\circ}\text{C}$.

Tuto metodu by bylo možné aplikovat na měření při ohřevu laserem, avšak za podmínek, že by se vyřešilo odstranění tvořících se oxidů a také odstranění tvořících se plynů.

Snímací rychlost kamery zaměřené na vzorek je omezená citlivostí použitého filmu.

3.4. Čidla pro bezdotykové měření teploty

3.4.1. Fotorezistor (fotoelektrický odpor) /8/

Čidlo světelného záření, využívající změny elektrické vodivosti vlivem fotoelektrické vodivosti. Vodivost foto-

elektrického odporu se zmenšuje s intenzitou osvětlení přibližně podle exponenciální závislosti v rozsahu přibližně 3 řádů. Fotoelektrický odpor se vyrábí ze ZnS, CdS, CdSe, GaAs, PbS, InSb, Si, Ge atd.

Materiál fotoelektrického odporu určuje tvar spektrální charakteristiky a její polohu. Fotoelektrický odpor se vyrábí jak pro světlenou, tak ultrafialovou a infračervenou oblast záření. V porovnání s ostatními čidly světelného záření se fotoelektrické odpory vyznačují poměrně velkou citlivostí, jednoduchostí konstrukce a jednoduchým zpracováním výstupního signálu. Jejich nedostatkem je velká teplotní závislost, malá časová stálost a poměrně velká časová konstanta, někdy je nevýhodná nelineární závislost odporu na osvětlení.

Pro výše uvedené nedostatky je foto odpor pro měření rychlých teplotních změn nepoužitelný.

3.4.2. Fotoelektrický článek

Fotodioda se strukturou PN, v níž pohlcované záření vytváří elektrické napětí vlivem fotoelektrického jevu.

Fotoelektrický článek je tedy v podstatě čidlo generátorového typu. Jako materiálu se používá Ge, Si, Tl_2S apod.

U nás vyráběná křemíková fotonka hradlová typ 1PP75 má následující parametry: $U = 0,3$ V při 1000 l .

Doba náběhu nebo jiná časová charakteristika není bohužel výrobcem uváděna.

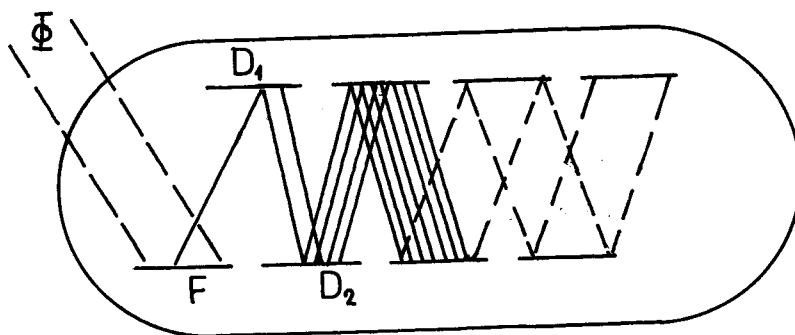
3.4.3. Fotoelektrický násobič

Čidlo světelného záření, vytvořené spojením vakuové

fotonky s násobičem elektronů ve společné baňce. Tímto řešením se dosáhne zvětšení citlivosti vakuové fotonky.

Princip fotoelektrického násobiče:

Elektrony emitované z fotokatody jsou elektrickým polem urychlovány a dopadají na elektrodu D_1 , jejíž součinitel sekundární emise je větší než 1. Z této elektrody vystupují sekundární elektrony, které po urychlení v elektrickém poli dopadnou na elektrodu D_2 . Výsledný proud elektronů dopadá na fotonásobič.



Obr. 4

Spektrální vlastnosti fotonásobiče jsou dány použitou fotoelektrickou katodou. Světelná charakteristika je do určité hodnoty proudu lineární. Teplota okolí má vliv na citlivost fotonásobiče. Fotonásobič se používá pro měření velmi malých světelných toků.

3.4.4. Fototranzistor

Je v podstatě tranzistor s vývodem báze nebo bez něho, ve kterém lze průchod vodičů náboje řídit velikostí dopadajícího záření. Fototranzistory jsou většinou řešeny jako bipolární tranzistory typu PNP nebo NPN. Konstrukčně jsou řešeny tak, aby záření dopadalo a bylo absorbováno v oblasti kolektorového přechodu PN. Generované páry volných vodičů (elektron-díra) jsou v tomto místě zesíleny a ve vnějším obvodu se projeví zvětšeným proudem kolektoru. Pro zvětšení citlivosti se fototranzistoru používá v Darlingtonově zapojení.

Frekvenční charakteristika je u fototranzistorů omezena shora kmitočtem 50 - 100 kHz. Zvýšení této horní hranice lze dosáhnout u fototranzistorů řízených elektrickým polem.

Fototranzistor je možné použít pouze jako indikátor pro označení počátku a konce doby ozařování Laserovým paprskem. Pro měření intenzity dopadajícího světla ho použít nelze, vzhledem k tomu, že potřebuje určitou velikost napětí k uvedení do vodivého směru.

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1. Výběr čidla

Hlavním problémem pro měření teplot za vysokých rychlostí ohřevu je výběr čidla.

Čidlo - zařízení sloužící k vytváření elektrického signálu nebo jiného (neelektrického signálu, který jistým způsobem odpovídá měřené neelektrické veličině). Čidlo může být částí snímače, u kterého se vytváří vlastní převod neelektrické veličiny /8/.

Čidlo by mělo splňovat tyto požadavky:

1. Co nejmenší časová konstanta. To znamená, schopnost mimořádně rychlé reakce na změnu teploty.
2. Schopnost měřit vysoké teploty. Pro tepelné zpracování ocelí by mělo měřit do $\sim 1800^{\circ}\text{C}$.
3. Co nejjednodušší.
4. Co nejmenší. Co nejméně zakrývat měřenou plochu.
5. Schopnost opakovat měření, reprodukovatelnost výsledku.
6. U kontaktních metod měření umožňovat snadný přestup tepla. tj. mít velkou tepelnou vodivost.
7. Dosažitelné. Nízká cena a snadná dostupnost.

Termočlánky většinu těchto bodů splňují, proto se budu dále zabývat jimi.

4.2. Chyby při měření teploty termočlánky

Při měření termočlánky je nutné zanedbat otázku, nakolik

souhlasí teplota měřeného místa s maximální či minimální teplotou vzorku.

Záznam skutečné teploty tohoto místa může být ovlivněn následujícími faktory /5/:

1. Přesnost odečtu teplotních údajů ze záznamu osciloskopu.

Při vyhodnocení záznamu ofotografovaného z obrazovky osciloskopu je možné se dopustit chyby 0,5 mm. To je při dělení 10 mV na dílek 0,625 mV. Jestliže je jako čidlo napojen termoelektrický článek NiCrNi, pak velikost chyby činí 15,6 °C.

K záznamu bylo použito univerzální paměťový osciloskop C8-12A sovětské výroby. Na obrazovce osciloskopu je možné zaznamenávat frekvence maximálně do 50 MHz. Obrazovka má rozměr 50 x 80 mm, dělení obrazovky je po 8 mm.

Šířka dráhy paprsku může být až 1 mm.km.s⁻¹. Maximální rychlost paprsku je 4000°C⁻¹.

2. Rozptyl termoelektrických konstant termočlánku

Použité termoelektrické vodiče DEGUSSA mají zaručenou konstantnost termoelektrického napětí, je nutné však počítat s rozptylem hodnot vlivem různé kvality zhotovení termočlánku. Tento rozptyl podle /5/ nepřesahuje ± 1 % naměřené hodnoty.

3. Ovlivnění termočlánku magnetickým polem.

Jde spíše o ovlivnění vodičů přenášející elektrický signál střídavým polem ze sítě.

4. Zpoždění v řetězu vzorek - termočlánek - osciloskop.

Tímto faktorem se budu podrobně zabývat v následujících kapitolách.

5. Odvod tepla z termočláneku do okolí.

Ve výzkumné zprávě /5/ bylo pokusně a výpočtem prokázáno, za podmínek ochladnutí rychlostí $v = 50^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, že termočlánek odvádí o 80 % více tepla z povrchu, než je průměrný odvod tepla z povrchu. Tato nerovnoměrnost je však vyrovnána tepelnou vodivostí vzorku a je zanedbatelná.

4.3. Vliv časové konstanty na přesnost měření teploty

4.3.1. Řešení rovnice rekonstrukce signálu.

Vlivem konečné doby šíření signálu dochází ke zpoždění teplotních údajů za skutečnou teplotou. Toto popisuje rovnice, která byla uvedena v /5/.

$$\frac{dy}{d\tau} + y = k \cdot t \quad (1)$$

Řešení je provedeno za předpokladu, že $t, k, \tau_2 = \text{konst.}$

Řešení je v tomto tvaru:

$$y = c \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau_2}} + kt$$

Určení konstanty c pro počáteční podmínky $\tau = 0, y = 0$

$$c = -k \cdot t$$

Po dosazení:

$$y = k \cdot t \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_2}}\right) \quad (2)$$

4.3.2. Určení dynamické chyby měření.

Z rovnice (2) je vyjádřena teplota t :

$$t = \frac{y}{k} + t \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau_2}} \quad (3)$$

Za předpokladu, že teplota roste lineárně s rychlostí ohřevu je možné provést substituci:

$$t = v \cdot \tau$$

Pak se rovnice (3) může zapsat v tomto tvaru:

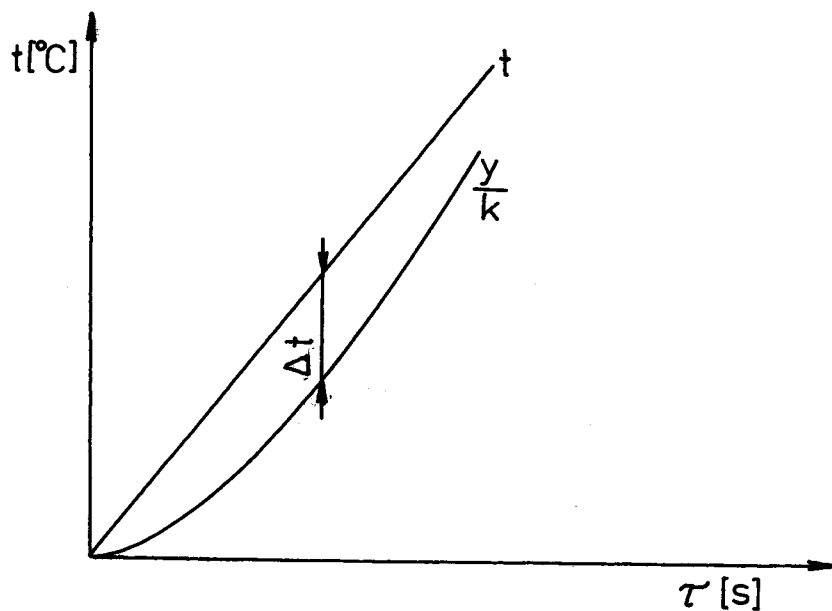
$$t = \frac{y}{k} + v \cdot \tau \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau_2}} \quad (4)$$

Kde t vyjadřuje skutečnou teplotu, $\frac{y}{k}$ vyjadřuje teplotu naměřenou a výraz

$$\Delta t = v \cdot \tau e^{-\frac{\tau}{\tau_2}} \quad (5)$$

vyjadřuje kladnou dynamickou odchylku měření.

Rovnici (4) je možné znázornit v grafu.



Obr. 5

Rovnice (5) obsahuje čtyři proměnné, jestliže je vyjádřena závislostí mezi dvěma proměnnými, je nutné zbývající považovat za konstanty.

Tabulka 3

ZÁVISLOST	KONSTANTY
$\Delta t - v$	τ, τ_2
$\Delta t - \tau$	v, τ_2
$\tau_2 - \tau$	$\Delta t, v$
$\tau_2 - v$	$\Delta t, \tau$
$\Delta t - \tau_2$	v, τ

Z grafických vyjádření těchto závislostí je možné určit například, s jakou chybou pracují zařízení, jaké použít čidlo při požadované přesnosti apod.

Ve výzkumné práci /5/ se uvádí hodnota časové konstanty, pro termočláanky značky DEGUSSA o průměru 0,2 mm Ni-CrNi, 0,01 s.

Bohužel tam není uvedena metoda, kterou byla získána tato hodnota.

Budu ji však považovat za možnou a v následujících kapitolách ji budu používat.

4.3.3. Závislost Δt - v

Výpočet hodnot je proveden podle rovnice (5)

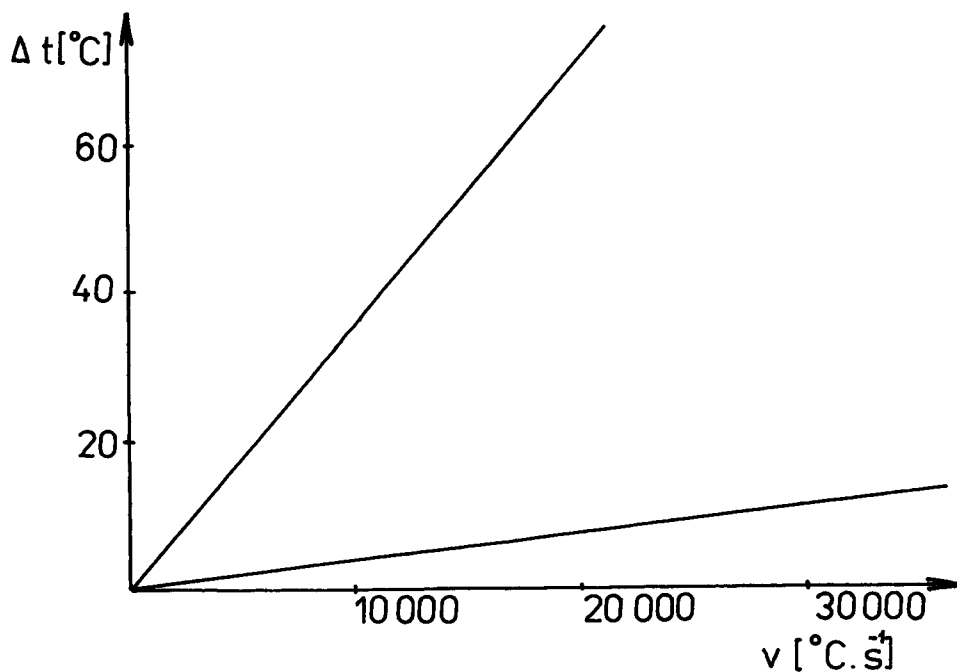
$$\Delta t = v \cdot \tau \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau_2}}$$

Časová konstanta $\tau_2 = 0,01$ s, čas $\tau = 0,01$ s, tam je, jak vyplývá ze závislosti Δt - τ chyba měření Δt největší.

Tabulka 4

v [$^{\circ}\text{C s}^{-1}$]	10 000	20 000	30 000
Δt [$^{\circ}\text{C}$]	36,6	73,3	110

Konstanty: $\tau = 0,01$ s, $\tau_2 = 0,01$ s



Obr. 6

Pro srovnání je zde tabulka s jinými parametry konstant.

Tabulka 5

$v [^{\circ}\text{C s}^{-1}]$	10 000	20 000	30 000
$\Delta t [^{\circ}\text{C}]$	3,6	7,33	11,0

Konstanty: $\tau = 0,001 \text{ s}$, $\tau_z = 0,001 \text{ s}$

Z obrázku je zřejmé, že chyba měření Δt stoupá lineárně s rychlostí ohřevu. Úhel stoupání je dán součinitelem $v\tau e^{-1}$.

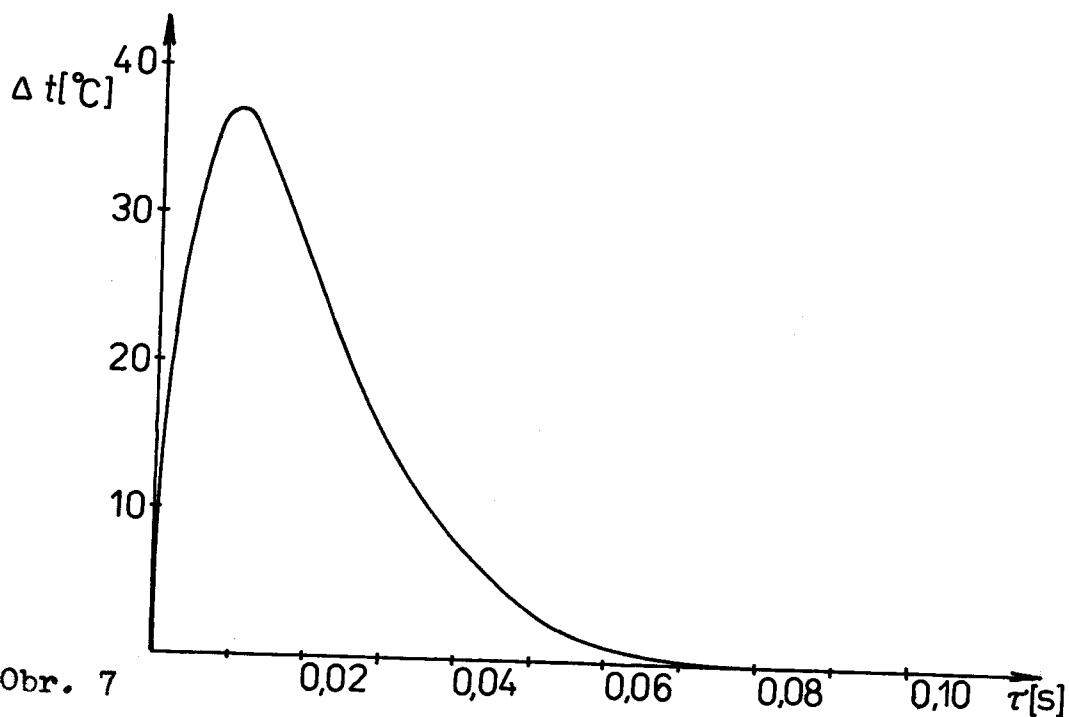
4.3.4. Závislost $\Delta t - \tau$

Zjištění závislosti je provedeno z rovnice (5)

Za konstanty je dosazeno: $v = 10\,000\text{ [}^\circ\text{Cs}^{-1}\text{]}$, $\tau_z = 0,01\text{ [s]}$.

Tabulka 6

$\tau\text{ [s]}$	0,001	0,01	0,1	1
$\Delta t\text{ [}^\circ\text{C]}$	9	37	$4,54 \cdot 10^{-4}$	0

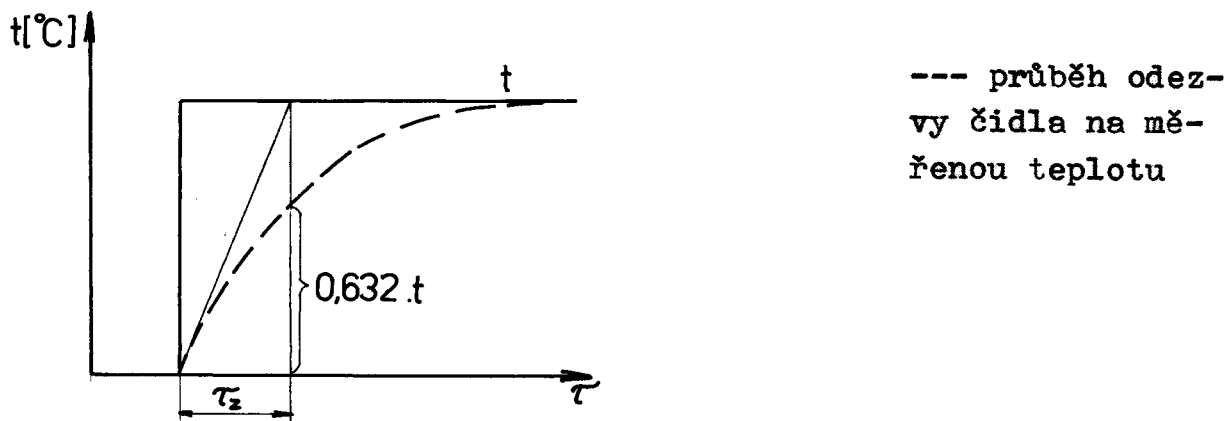


Aby bylo možno popsat tuto křivku, je vhodné definovat nejdříve pojem časová konstanta. Šesták ji v /3/ definuje takto:

" je časová konstanta čidla, tj. doba, za kterou dosáhne měřený údaj 63,2 % své konečné hodnoty. Její určení lze provést změřením dvou teplot t_1 a t_2 v odpovídajících časech.

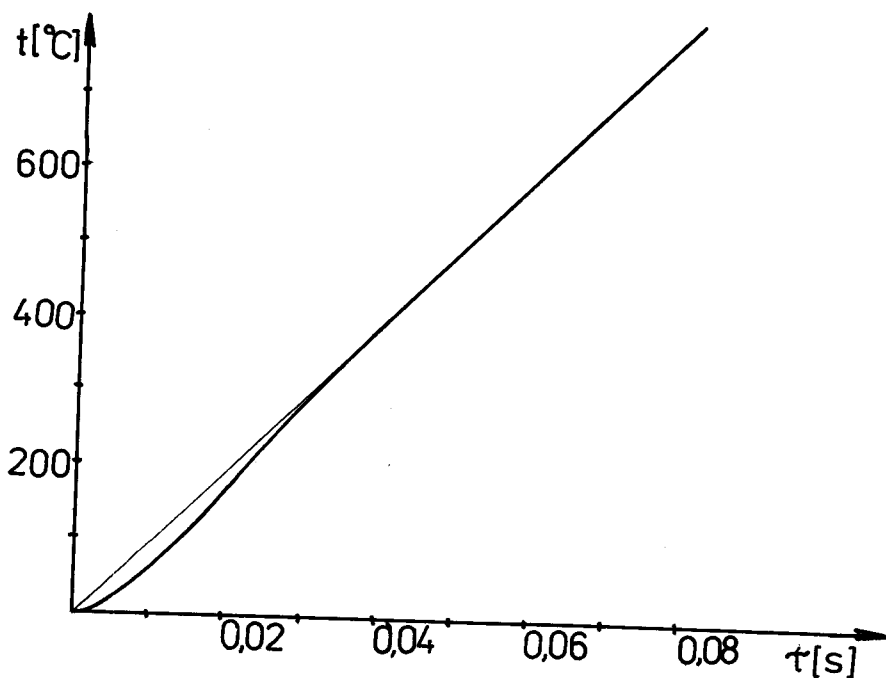
$$\tau_z = (\tau_1 - \tau_2) / \ln(t_2 - t_1) \quad (6)$$

Hodnota časové konstanty udává dobu potřebnou k vyrovnání teplot mezi vzorkem a čidlem, po jejímž uplynutí je čidlo schopné měřit teplotu s danou přesností. Prakticky se dosáhne 100 % hodnoty po $5\tau_z$.

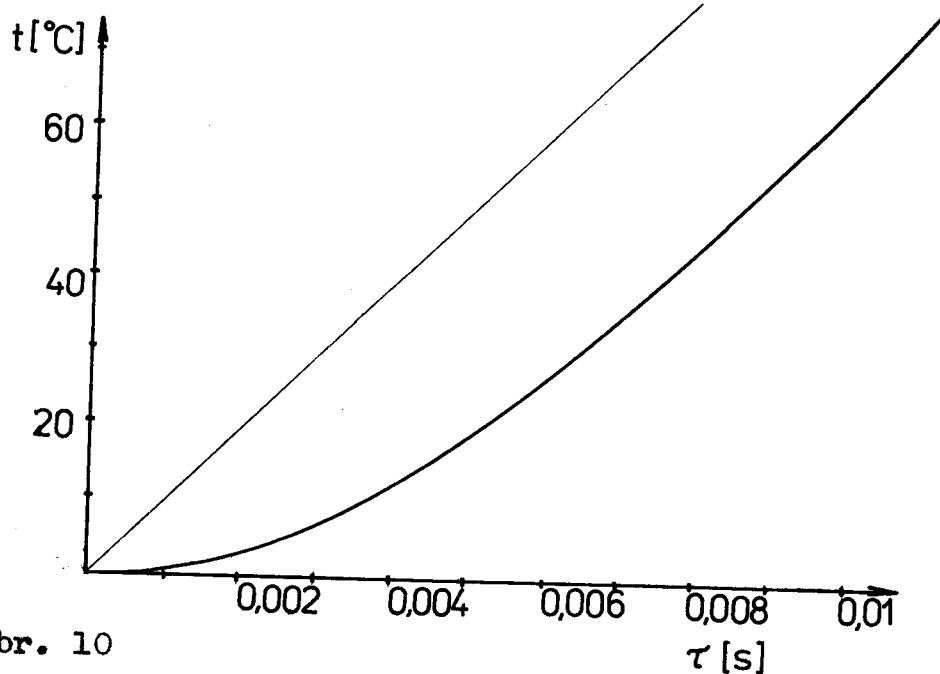


Obr. 8

Vzrůst teploty při špičkových parametrech ohřevu laserem sice netvoří skokovou změnu, ale značně se k ní blíží. Vzrůst chyby měření je v první fázi tedy způsoben pomalou odezvou čidla na měřenou teplotu. V čase rovném časové konstantě dosahuje maxima. Potom se již odezva čidla blíží ke skutečné teplotě. Na obr. 7 je vidět, že chyba v čase 0,05 s je přibližně 6°C . Je nutné si uvědomit, že v čase 0,05 s dosahuje již teplota 500°C , takže chyba činí přibližně 1 % z naměřené hodnoty. Průběh vzrůstu teploty a chyby měření je znázorněn na obr. 9 a 10.



Obr. 9



Obr. 10

Obrázek 9 a 10 stejně jako obrázek 7 znázorňují časový záznam teploty za podmínek, že rychlost ohřevu $v = 10\,000\text{ }^{\circ}\text{C}\text{s}^{-1}$, časová konstanta $\tau_z = 0,01\text{ s}$. Na obrázku 9 a 10 představuje přímka skutečný průběh teploty, křivka hodnotu snímanou čidlem.

4.3.5. Závislost $\tau_z - \tau$

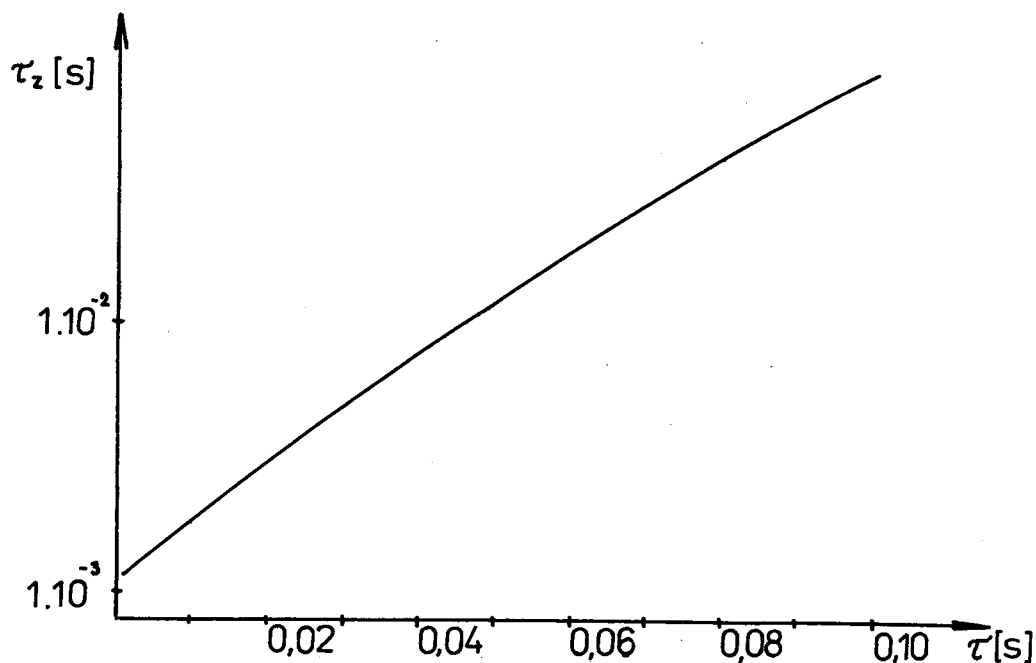
Úpravou rovnice (5) je zjištěna tato závislost:

$$\tau_z = - \frac{\tau}{\ln \frac{\Delta t}{v \cdot \tau}}$$

Při předpokládané přesnosti měření, kde chyba měření Δt by měla být menší než 5°C a rychlosti ohřevu $v = 10\,000^\circ\text{C s}^{-1}$ jsou hodnoty τ_z uvedené v tabulce 7 a znázorněné v obrázku 11.

Tabulka 7

τ [s]	0,1	0,01	0,001
τ_z [s]	$18,8 \cdot 10^{-3}$	$3,33 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$



Obr. 11

Fyzikální význam závislosti uvedené na obrázku 11 je evidentní. Při určitých nárocích na přesnost měření, v daných

časech a konkrétní předpokládané rychlosti ohřevu je nutné použít čidlo s časovou konstantou menší nebo rovnou údajům vyplývajících z grafu.

4.3.6. Závislost $\tau_z - v$

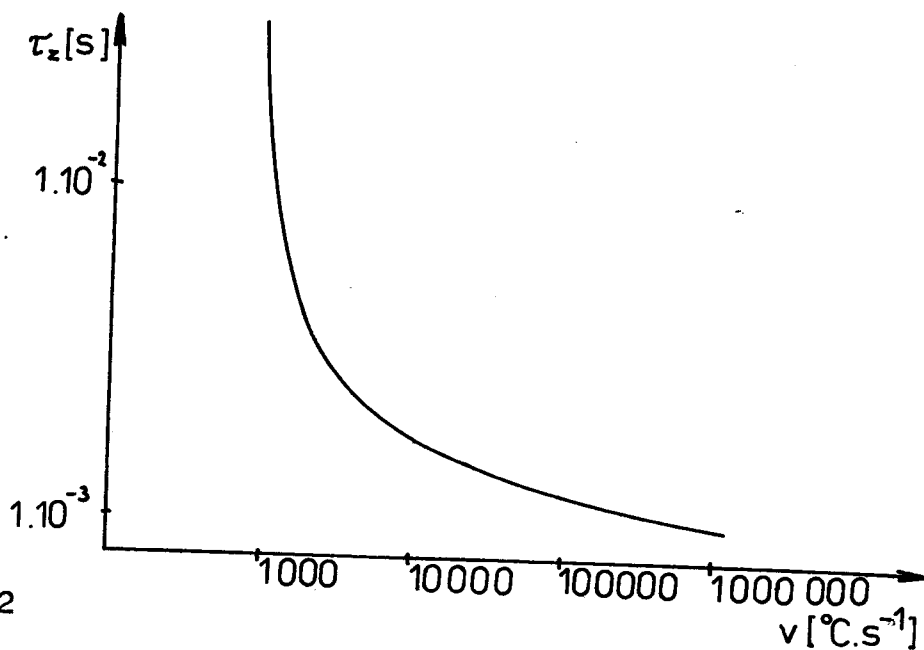
Je použito opět rovnice získané úpravou z rovnice (5)

$$\tau_z = - \frac{\tau}{\ln \frac{\Delta t}{v \cdot \tau}}$$

Je sledována závislost $\tau_z - v$ v čase $\tau = 0,01$ s a přesnost měření 5°C . Získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 8 a vyneseny na obrázku 12.

Tabulka 8

$v [^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}]$	1000	10 000	100 000	1000 000
$\tau_z [\text{s}]$	$14,0 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$



Obr. 12

Z obrázku 12 je zřejmé, že při daných podmínkách a zvyšující se rychlosti ohřevu stoupají nároky na časovou konstantu čidla. Ačkoliv se však zvýšila rychlost ohřevu o tři řády, časová konstanta se zvýšila pouze o jeden řád.

4.3.7. Závislost $\Delta t - \tau_z$

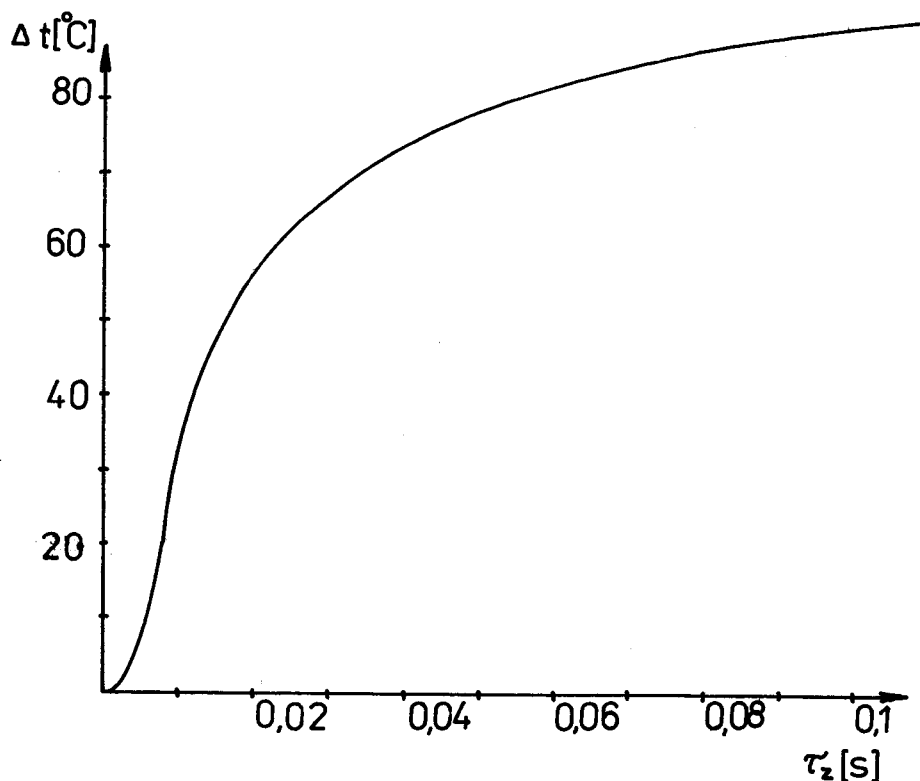
Pro výpočet hledané závislosti je použito rovnice (5)

$$\Delta t = v \cdot \tau \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau_z}}$$

Rychlost ohřevu je $v = 10000 \text{ } ^\circ\text{Cs}^{-1}$ a chyba měření je sledována v čase $\tau = 0,01 \text{ s}$. To znamená, že skutečná teplota vzrostla o $100 \text{ } ^\circ\text{C}$. Vypočtené údaje jsou znázorněny v tabulce 9 a na obrázku 13.

Tabulka 9

$\tau_z [\text{s}]$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$
$\Delta t [^\circ\text{C}]$	$3,7 \cdot 10^{-42}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	36,8.10	90,5.10



Obr. 13

Závislost vynesenu na obrázku 13 je možné rozdělit do tří částí. V první části je chyba měření velmi malá, čidla s nízkou časovou konstantou pracují přesně, jsou už ve druhé fázi křivky na obrázku 7.

Ve druhé části prudce narůstá chyba měření. τ_z se blíží τ , tam kde je $\tau_z = \tau$ je inflexní bod křivky na obrázku 13 a maximum na obrázku 7.

Ve třetí fázi se chyba měření limitně blíží k měřené teplotě. Toto čidlo není schopné reagovat ve sledovaném čase.

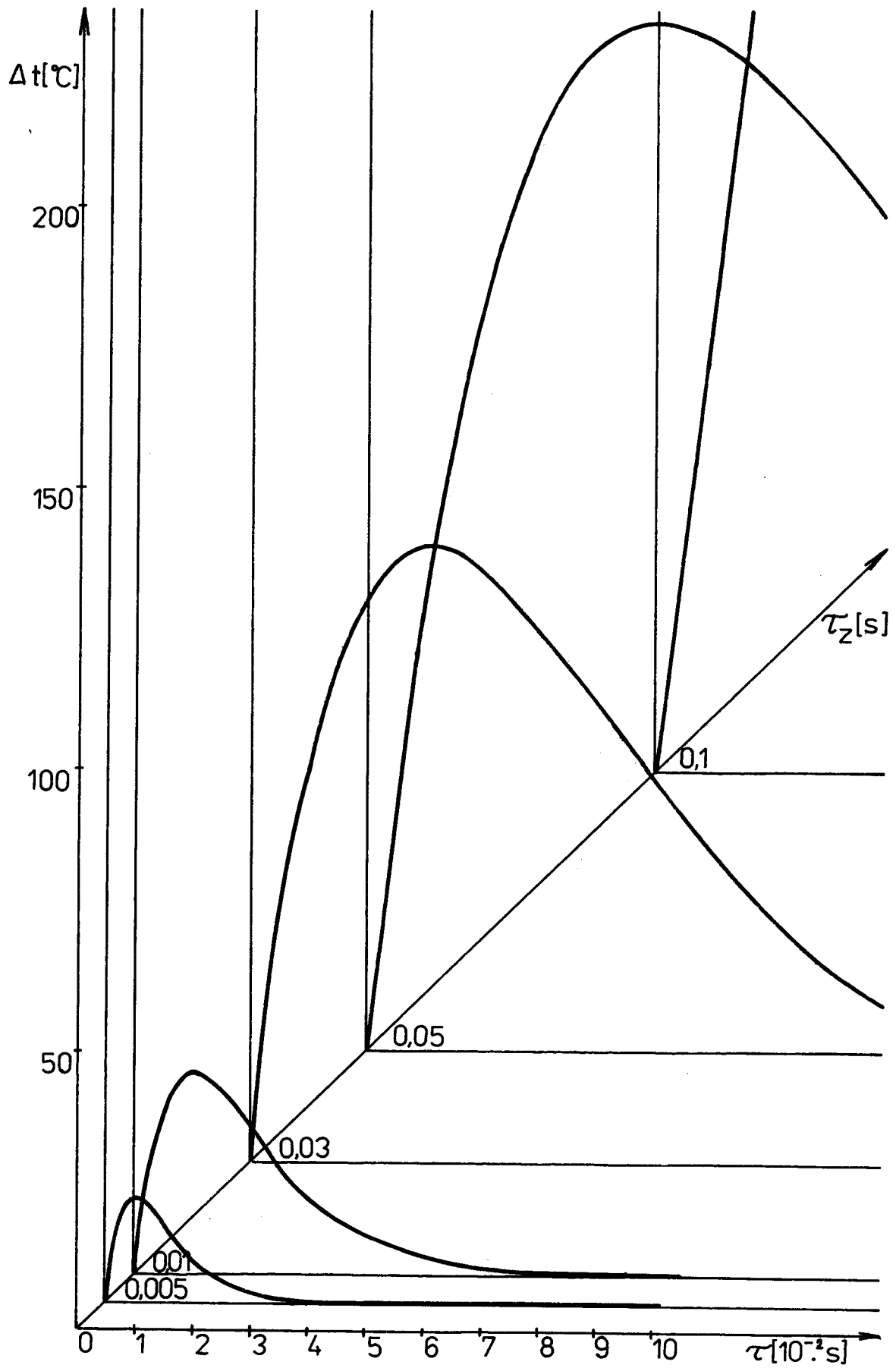
4.3.8. Diskuse teoretických závislostí

Pro experimentální měření mají závislosti uvedené v předešlých kapitolách velký význam.

1. Umožňují určit chybu měření v závislosti na vlastnostech použitého čidla.
2. Umožňují posoudit vhodnost čidla v závislosti na požadované přesnosti měření.
3. Umožňují přesně určit chybu měření při vzrůstající intenzitě a rychlosti ohřevu měřeného tělesa.
4. Umožňují rekonstruovat průběh signálu čidla.
5. Umožňují přesně určit dobu, po kterou je ještě signál ovlivněn chybou způsobenou časovou konstantou.
6. Z grafů jasně vyplývá, že chyba způsobená pomalou reakcí čidla se projevuje jen v počáteční fázi měření.
7. Pro měření při laserovém ohřevu, jestliže se rychlosti ohřevu budou pohybovat i v desítkách tisíc $^{\circ}\text{Cs}^{-1}$ je možné použít čidlo s časovou konstantou $1 \cdot 10^{-2}$ až $1 \cdot 10^{-3}$ s.
8. Umožňuje odhad časové konstanty z tvaru počátku signálu zobrazeném na osciloskopu. Počátek křivky tvoří vždy oblouk. Jestliže je použito čidlo, jehož časová konstanta je známa a čidlo s neznámou časovou konstantou, pak podle velikosti oblouku je možné usoudit na velikost časové konstanty neznámého čidla.

Toto je výhodné zvláště u termočlánků, kde se časová konstanta mění v závislosti na velikosti svaru, jeho kvalitě atd.

Pro přehlednější vyjádření závislostí je názornější trojrozměrný graf. Je v něm zobrazen vztah mezi $\Delta t - \tau$ v závislosti na vzrůstající hodnotě časové konstanty. Graf na obr. 14 je



Obr. 14 Vliv časové konstanty na vzrůst chyby měření.

vytvořen pro konstantní rychlost ohřevu $v = 10000^{\circ}\text{Cs}^{-1}$. Závislost mezi rychlostí ohřevu a chybou měření je, jak vyplývá z kapitoly 4.8.3., lineární. Zatímco ostatní závislosti jsou exponenciální.

4.4. Rychlost ohřevu termočlánku

4.4.1. Výpočet doby ohřevu termočlánku

Za předpokladu, že časové zpoždění je způsobeno pouze tepelnou setrvačností termočlánku a ne termoelektrickým jevem, je možné tvrdit, že velikost časové konstanty je závislá na hmotnosti ohřívaného konce termočlánku.

Teoretické doby ohřevu termočlánku a jeho časovou konstantu, je možné pro konkrétní hodnoty termočlánku a ohřívajícího prostředí spočítat podle teorie ohřevu symetrických těles.

Tato teorie předpokládá, že rozložení teplot v desce je určeno vztahem:

$$\frac{T_m - T_k}{T_0 - T_k} = F(B_i, F_0, \frac{x}{S}) \quad (7)$$

Za předpokladu, že konec termočlánku považujeme za kouli a okolní lázeň má vysokou hodnotu součinitele přestupu tepla, je možné pokládat člen:

$$B_i = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda} = \infty$$

Člen $\frac{x}{S}$, kde x je vzdálenost měřeného bodu od středové osy, je pro teplotu ve středu termočlánku roven nule.

Hodnotu F_0 je možné odečíst z obrázku 15, kde je vynesena v závislosti na:

$$\frac{T_m - T_k}{T_0 - T_k} \quad (8)$$

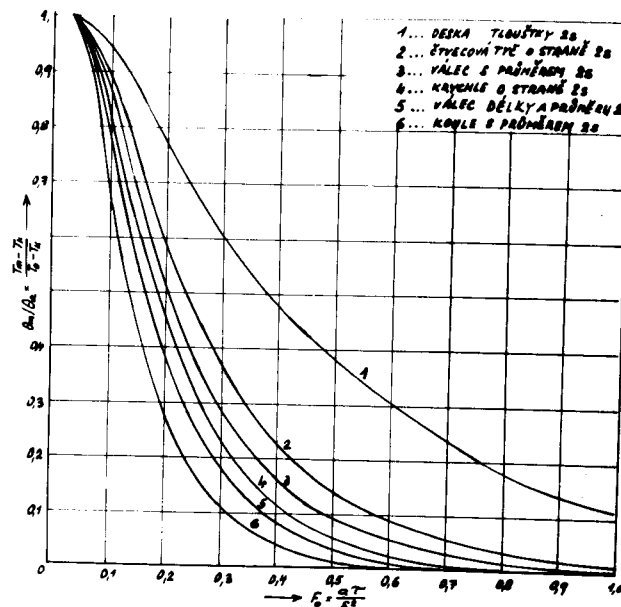
Z hodnoty F_0 je možné spočítat časovou závislost ohřevu termočlánku:

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{r^2} \quad (9)$$

Úpravou (9) lze získat časovou závislost:

$$\tau = \frac{F_0 \cdot r^2}{a}$$

kde teplotní vodivost a je rovna $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$



Obr. 15

4.4.2. Výpočet pro konkrétní hodnoty předpokládané v experimentu.

Teplota $T_k = 750^\circ\text{C}$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Sledovaná teplota $T_m = 474^\circ\text{C}$, je teplota, která, jak vyplývá z kapitoly 4.3.4, je nutná k výpočtu časové konstanty τ_2 . Hodnoty c, λ, ζ popisují vlastnosti niklových slitin, jsou převzaty z [1]. Hodnoty c, λ jsou udávány v poměrně širokém rozmezí.

$$c = 377 \text{ až } 515 \text{ J.kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C.s}^{-1}$$

$$\lambda = 15 \text{ až } 62 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C.s}^{-1}$$

$$\zeta = 8880 \text{ kg.m}^{-3}$$

Pro výpočet bylo použito $\lambda = 15$ a $c = 515$, protože vliv Cr a nečistot ve svaru má velký vliv na teplotní vodivost. Hodnota $a = 3,28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

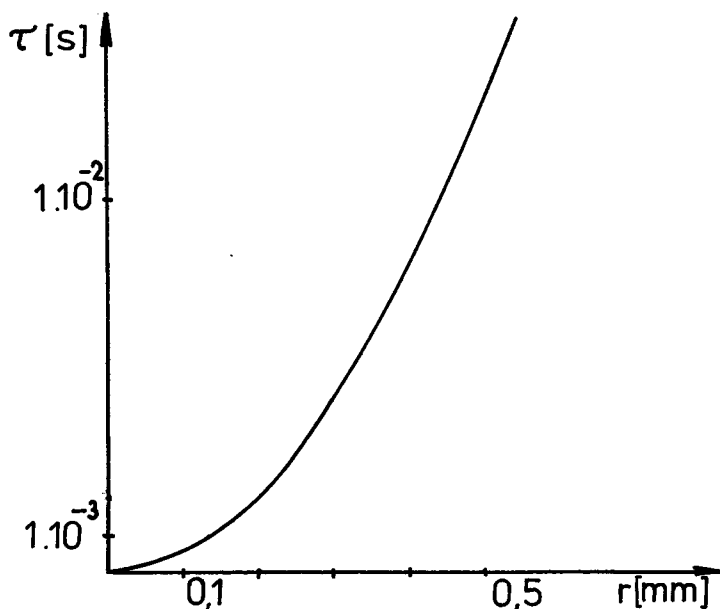
$$\frac{T_m - T_k}{T_0 - T_k} = 0,378$$

Hodnota F_0 odečtená z grafu je 0,17. Čas τ je vypočítán pro různé hodnoty poloměru konce termočládku r v tabulce č. 10.

Tabulka 10

r [mm]	0	0,01	0,05	0,1
τ [s]	0	$5,18 \cdot 10^{-6}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$	$5,18 \cdot 10^{-4}$

r [mm]	0,5	1,0	5,0
τ [s]	$1,29 \cdot 10^{-2}$	$5,18 \cdot 10^{-2}$	$1,29 \cdot 10^0$



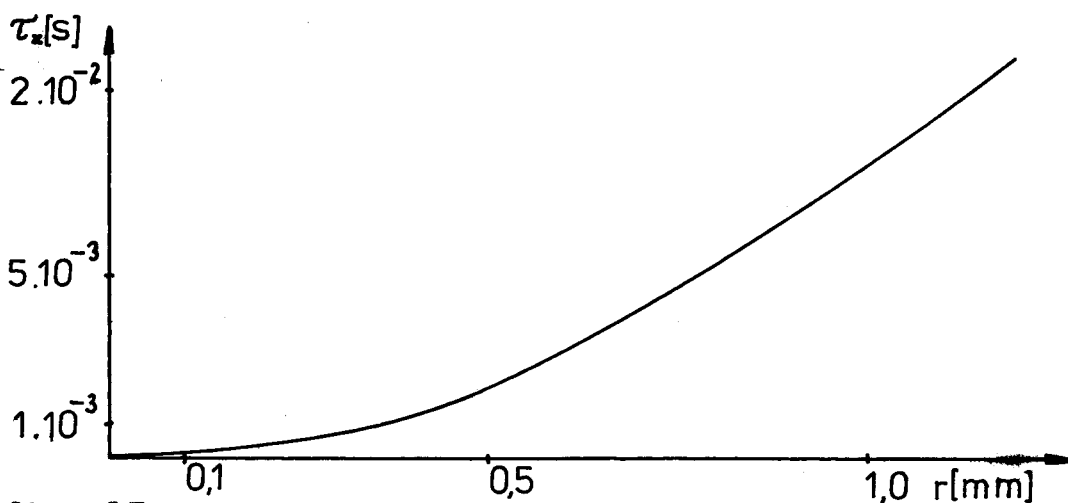
Obr. 16

Z obrázku je zřejmé, že čas potřebný k ohřevu termočlánku stoupá s kvadrátem poloměru termočlánku.

Hodnota časové konstanty termočlánku, vypočtené podle rovnice (5) je v tabulce 11.

Tabulka 11

r [mm]	0	0,01	0,05	0,1	0,5	1,0	5,0
τ_z [s]	0	$7,8 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$



Obr. 17

Vypočtené hodnoty časové konstanty bylo provedeno za několika zjednodušujících předpokladů. Spolehlivost tohoto výpočtu ověří experimentální měření.

4.5. Experimentální měření časové konstanty

Cílem měření bylo potvrdit teoretické hodnoty vypočítané v předešlých kapitolách. To znamená, zjištění časové konstanty, tvaru křivky ohřevu, rychlosti ohřevu termočlátku.

4.5.1. Použité zařízení.

Přivedení skokové změny na termočlánek je spojeno s určitými potížemi. Jakýkoliv rychloohřev termočlátku je nemožný - není to skoková změna. Použití plamenového hořáku nebo elektrického oblouku je vyloučené pro jejich vysokou teplotu a nestabilitnost.

Proto byl experiment proveden takto. Termočlánek svařený do kuličky byl prudce ponořen do roztaveného hliníku. Použití mědi pro tento účel nebylo dobré. Při vysoké teplotě mědi docházelo k tomu, že se termočláanky částečně natavovaly a jejich svary se porušovaly. Při teplotách těsně nad teplotou tání - měď na termočlátku tuhla.

Ohřev kovu byl prováděn ve vysokofrekvenční peci ZEZI umístěné v dílnách VŠST. Její nevýhodou je, že ohřívání množství kovu je malé a proto rychle chladne. Rychlost chladnutí hliníku v kelímku je však proti rychlosti ohřevu zanedbatelná a neovlivňuje měření.

Průběh ohřevu termočlátku byl sledován na osciloskopu s pamětí C8 - 12 A. Jeho přesnost by měla být pro provádění měření plně dostačující.

Pro měření bylo použito termočláneků značky DEGUSSA se zaručenými vlastnostmi.

Byly to termočlánky NiCr-Ni o průměrech 0,1 a 0,2 mm, termočlánek Chromel-Alumel o průměru 0,5 mm.

4.5.2. Naměřené hodnoty

Termočlánek je svařovaný elektrickým obloukem ve rtuťových parách. Velikost svaru je závislá na použitém průměru vodiče.

Tabulka 12

Průměr vodičů (mm)	Materiál	Velikost svaru (mm)	Průměr velikostí svaru (mm)
0,1	NiCr-Ni	0,29 - 0,33	0,310
0,2	NiCr-Ni	0,51 - 0,58	
0,5	Ch-A	0,86 - 0,94	0,545
			0,90

Ponořením termočlánku do roztaveného kovu je na termočlánek přivedena skoková změna. Ovšem za předpokladu, že je zanedbána fáze, kdy se pod hladinu ponořuje postupně kulička termočlánku. Tato fáze trvá při rychlosti pohybu termočlánku 1 ms^{-1} , v závislosti na průměru termočlánku, od $3 \cdot 10^{-4}$ do $9 \cdot 10^{-4}$ s. Na záznamu osciloskopu nemůže být při časové základně 0,1 s patrna a proto je možné ji zanedbat.

Jako ukázka provedeného měření jsou na obr. 17, 19, 21 charakteristické křivky jednotlivých termočláneků.

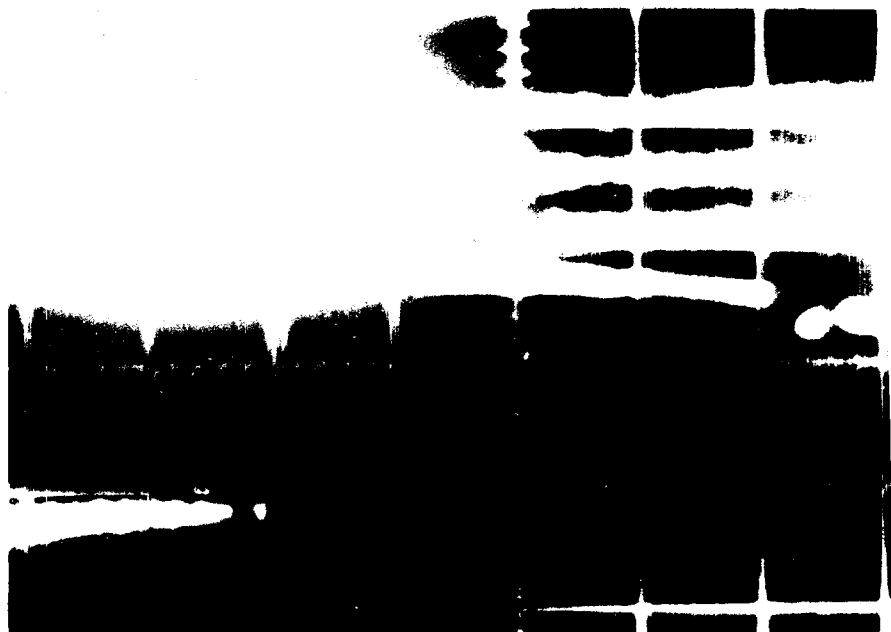
Jsou na nich zachyceny celkem čtyři stopy paprsku. Nahoře jsou dvě stopy, na kterých je zachycen srovnávací kmitočet 50 Hz. Další dvě stopy jsou způsobené dvojnásobným průchozem paprsku osci-

loskopu. Nutnost použít dva nebo i více cyklů je vyvolána špatnou možností synchronizace ponoření termočláčku a současného zapnutí osciloskopu. Osciloskop má tu nevýhodu, že mezi jednotlivými cykly je určitý časový interval. Tím byla znehodnocena řada pokusů. Na obrazovce nebyl zachycen úplný záznam ohřevu termočláčku.

Z řady pokusů byly vybrány ty, které nejlépe charakterizují ohřev jednotlivých typů termočláčků. Velikost napětí byla nastavena na 10 mV na dílek dělení a časová základna na 0,1 s na dílek.

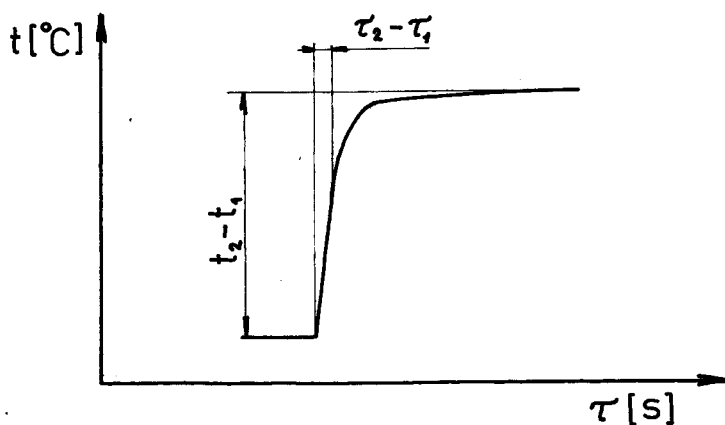
Vyhodnocení časové závislosti ohřevu je provedeno podle kapitoly 4.3.4.

je $34,9^{\circ}\text{C}$, $\tau_2 - \tau_1 = 0,061 \text{ s}$, $t_2 - t_1 = 610^{\circ}\text{C}$. Časová konstanta je rovná $0,0095 \text{ s}$, rychlost ohřevu $10\,000^{\circ}\text{C}\text{s}^{-1}$.



Obr. 21

Na snímku 21 je zachycen průběh vzrůstu teploty termočlánku NiCr-Ni o průměru vodičů $0,1 \text{ mm}$. Průměr termočlánekového svaru je $0,32 \text{ mm}$.



Obr. 22

Počáteční oblouk není na obr. 21 znatelný. Maximální chyba měření je $7,9^{\circ}\text{C}$, $\tau_2 - \tau_1 = 0,0136 \text{ s}$, $t_2 - t_1 = 560^{\circ}\text{C}$,

$\tau_2 = 0,00216$ s. Maximální rychlost ohřevu je $40000^\circ\text{Cs}^{-1}$.

Celkové shrnutí naměřených hodnot je v tabulce 13.

Tabulka 13

Obr.	Termočlánek	Průměr svaru	$\tau_1 - \tau_2$ [s]	$t_2 - t_1$ [°C]	τ_2 [s]	v [°C s ⁻¹]
17	Ch-A 0,5 mm	0,90	0,085	870	0,0125	10 235
19	NiCr-Ni 0,2 mm	0,55	0,061	610	0,0095	10 000
20	NiCr-Ni 0,1 mm	0,32	0,0136	560	0,0022	40 860

Zmenšující se rozdíl naměřených teplot je způsoben zvyšující se citlivostí termočlátku. Než došlo k ponoření termočlátku, stačil se sáláním tekutého hliníku zahřát. Tento nedostatek by bylo možné podstatně omezit stíněním termočlátku až do doby těsně před ponořením.

4.5.3. Diskuse dosažených výsledků.

Průběh vzrůstu napětí termočlátku v závislosti na teplotě potvrdil předpoklady uvedené v kapitole 4.3.

Velikosti časové konstanty vypočítané v kapitole 4.4. však naměřené skutečnosti neodpovídají.

Pro termočlánek o průměru svaru 0,32 mm je naměřená hodnota časové konstanty $2,2 \cdot 10^{-3}$ s a vypočítaná $2 \cdot 10^{-4}$ s. Pro termočlánek o průměru svaru 0,55 mm je naměřená hodnota $9,5 \cdot 10^{-3}$ s a vypočítaná $7 \cdot 10^{-4}$ s.

Není tedy potvrzena shoda co do absolutní velikosti časové konstanty. Je však potvrzeno, že velikost časové

konstanty závisí na druhé mocnině poloměru termočlánu.
Vlastně tedy na zvýšení objemu hmotnosti termočlánu svaru.

Vypočítané hodnoty časové konstanty termočlánu jsou velmi nízké a liší se od předpokládaných hodnot až o řád.

Tento velký rozdíl může být způsoben několika faktory.

1. Chybou v určení hodnoty α . Teplotní vodivost je zásadně ovlivněna Cr a dalšími přítomnými prvky, také povrchovými vrstvami nečistot.
2. Jakostí svaru termočlánu - svar nemusí být dokonale proveden.
3. Tvarem svaru. Termočlánek nemá ideální kulový tvar.
4. Předpokladem okamžitého vzniku termoelektrického napětí. Tento předpoklad nemusí být splněn.
5. Odvodem tepla vodiči ze svaru.
6. Změnou chemického složení termočlánu v místě svaru.
7. Oxidickou vrstvou plovoucí na hladině hliníku, která jestliže obalí termočlánek, působí jako izolace. Tuto možnost by bylo nutné prověřit experimentem, kdy hladina by byla ohraničena vakuem nebo inertním plynem.

Velký vliv teplotní vodivosti je také patrný z hodnot naměřených termočlánekem Ch-A. Ačkoliv poloměr jeho svaru byl více jak dvakrát větší než poloměr svaru termočlánu NiCr-Ni, přesně 2,25krát, časová konstanta byla větší jen 1,31 krát.

4.6. Měření teploty termočláanky při ohřevu laserem.

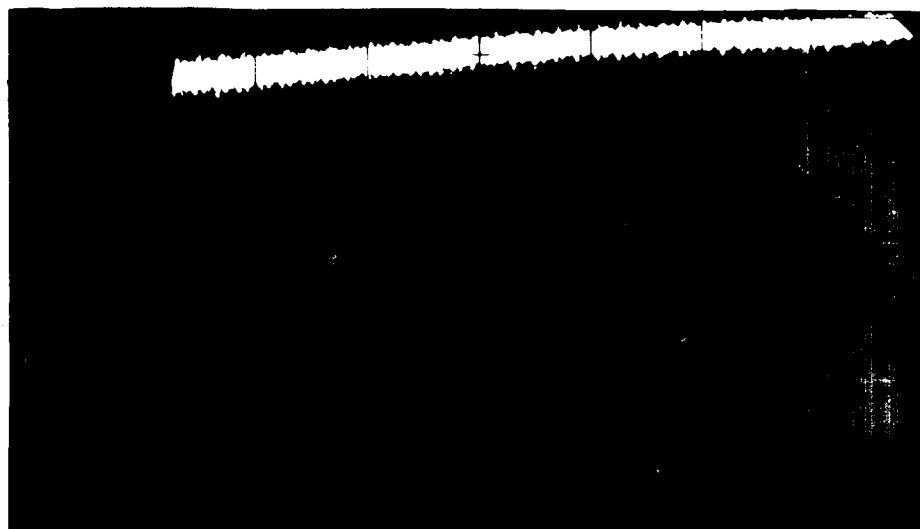
4.6.1. Ohřev kontinuálním laserem.

Pro měření byl použit kontinuální laser ve výzkumném ústavu Monokrystal Turnov o maximálním výkonu 80 W. Laserem byl zahříván termočlánek NiCr-Ni 0,2 mm s průměrem svaru 0,54 mm. Napětí z termočláanky bylo zaznamenáváno na osciloskopu s pamětí Emertex Sdilumbeber.

Cílem měření bylo sejmout detailní náběh počátku křivky a tím zvýraznit velikost chyby měřené teploty. Protože při velmi malé časové základně je velmi nesnadné synchronizovat spuštění paprsku a zároveň osciloskopu bylo použito pro spuštění osciloskopu fotodiody 1 PP75. Tato fotodioda je hradlová, dává tedy napětí v závislosti na intenzitě osvětlení. Byla použita za předpokladu, že náběh napětí je velmi rychlý. Byla umístěna za zrcátko, které propouští malou část laserového paprsku.

Napojena byla na druhý vstup osciloskopu.

Paprsek laseru byl spuštěn odkrytím clony. Výsledek měření je na obr. 22.



Obr. 22

Hodnota napětí byla nastavena na 5 mV na dílek, časové dělení 5 mikrosekund na dílek. Vypočtená rychlost ohřevu je $2185\text{ }^{\circ}\text{Cs}^{-1}$.

Než fotonka naběhla na nastavenou hodnotu 0,25 V, termočlánek se zahřál. Hodnota napětí na termočlátku odpovídající teplotě 440°C svědčí o tom, že termočlánek se ohříval po dobu přibližně 0,2 s. Nastavená hodnota napětí byla příliš vysoká.

Ale i při velmi nízké hodnotě napětí není možné očekávat že fotodioda spustí osciloskop dříve, než začne reagovat termočlánek.

Na obr. 23 je průběh nárůstu napětí při přivedené skokové změně.

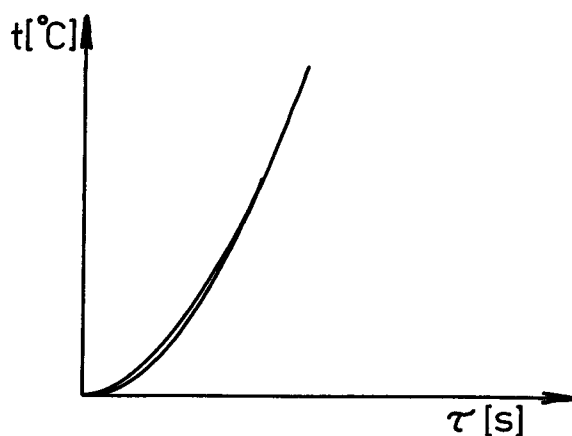


Obr. 23

Hodnotu $0,623 U_{\max}$ dosahuje křemíková fotonka během 0,023 s. Což je doba srovnatelná s termočlátky. Možnost využití této fotodiody k bezdotykovému snímání teploty na principu měření vzrůstu intenzity záření ohřívaného tělesa by přineslo

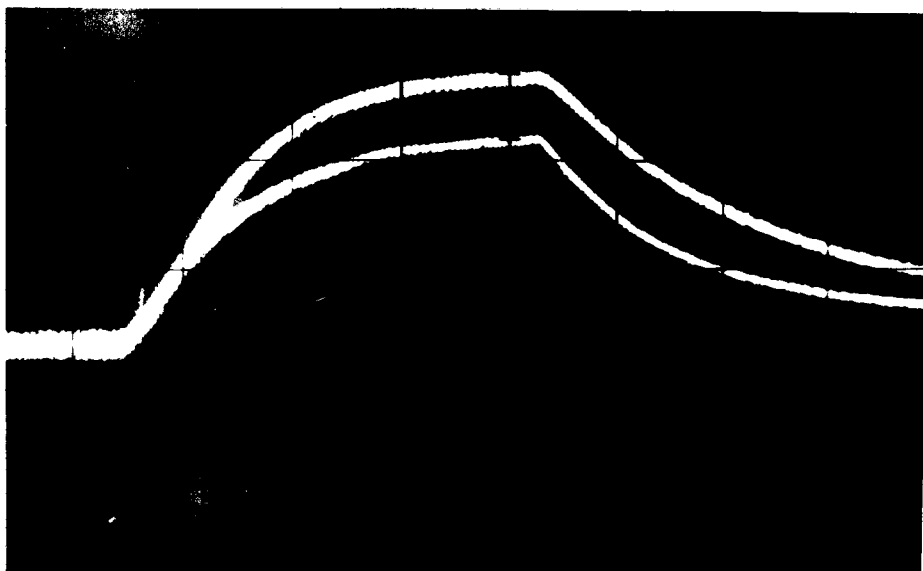
výsledky prakticky shodné s termočlánky. Ovšem za předpokladu, že by se podařilo provést opatření uvedená v kapitole 3.3.1.

Další experiment byl proveden takto. Do ohniska lseru byly umístěny dva termočlánky. Cílem měření bylo zaznamenat rozdíl v ohřevu termočlánků v počáteční části měření. Protože není možné vyrobit dva absolutně shodné termočlánky co do velikosti svaru, měla se rozměrová odchylka promítnout v odchylce rychlosti ohřevů v počáteční fázi měření.



Obr. 24

Tento předpoklad se neukázal správný, jak je vidět na obr. 25.



Obr. 25

Hodnota něptí je 5 mV/dílek, časová základna 1 s na dílek. Rozdíl v rychlosti ohřevu se projevil spíše v konečné fázi ohřevu. Měření rozdílu ohřevů v počáteční části křivky by bylo nutné provést s časovou základnou 1 ms na dílek. Pak by rozdíl počátečních rychlostí měl být patrný.

Rozdíl teplot v konečné fázi měření je způsoben nepřesnou instalací termočlánků do paprsků laseru. Průměr paprsku laseru je 1 mm.

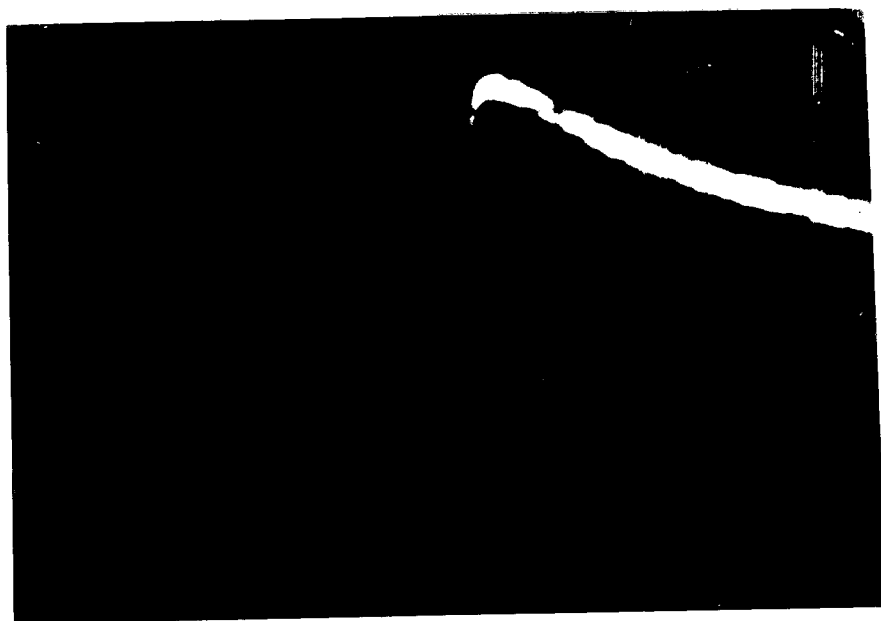
Lepší provedení tohoto pokusu by bylo na laseru o větším průměru paprsku. Také termočlánky by bylo vhodné přivařit na vzorek. Předpokladem je také synchronizovat spuštění laseru a osciloskopu jedním povelom. Provedení pokusu zabraňuje to, že v ČSSK dosud takový laser není instalován.

4.6.2. Ohřev pulsním laserem

Měření bylo prováděno ve výzkumném ústavu Turnov. Ohřev termočlánku byl proveden pulsním laserem o maximální energii 2 J. Ohřev termočlánku byl zaznamenán na osciloskopu s pamětí Enertie Schlambeber 5082 s minimální velikostí dělení časové základny 1 ns.

Experiment byl proveden na termočlánku NiCr-Ni o průměru vodičů 0,2 mm. Průměr svaru byl 0,54 mm. Termočlánek nebyl umístěn přímo do ohniska, aby nedošlo k jeho spálení. V místě instalace termočlánku měl paprsek průměr 3 mm. Délka impulsu laseru byla sto mikrosekund. Nastavená hladina energie 1,1 J. ohřála termočlánek na teplotu 415°C.

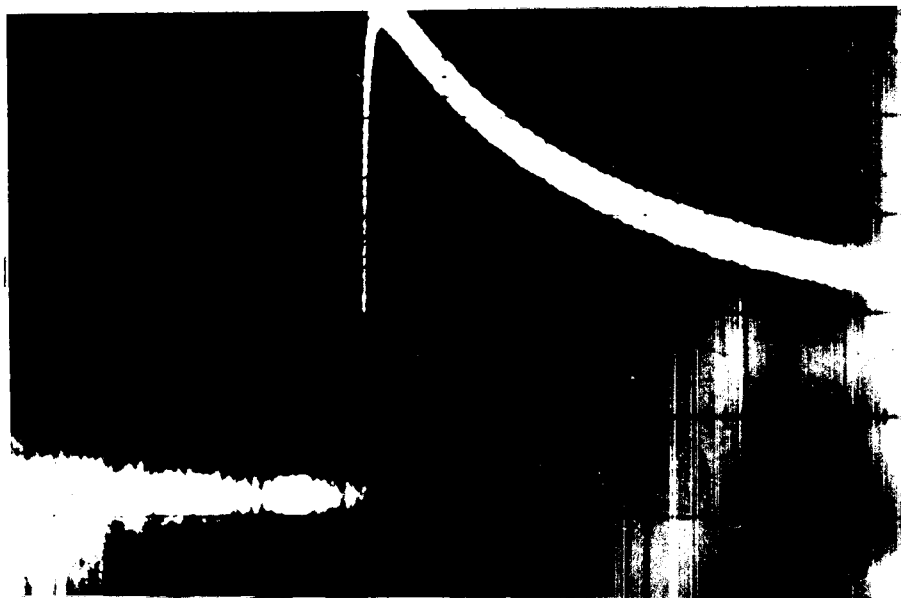
Průběh vzrůstu teploty je na obr. 26.



Obr. 26

Hodnota napětí byla nastavena 5 mV na dílek, čas 0, 05 s na dílek. Průměrná rychlost ohřevu činila $24\,500\text{ }^{\circ}\text{Cs}^{-1}$, maximální rychlost ohřevu $221\,200\text{ }^{\circ}\text{Cs}^{-1}$. O 100°C se termočlánek ohřál během $4,5 \cdot 10^{-4}$ s.

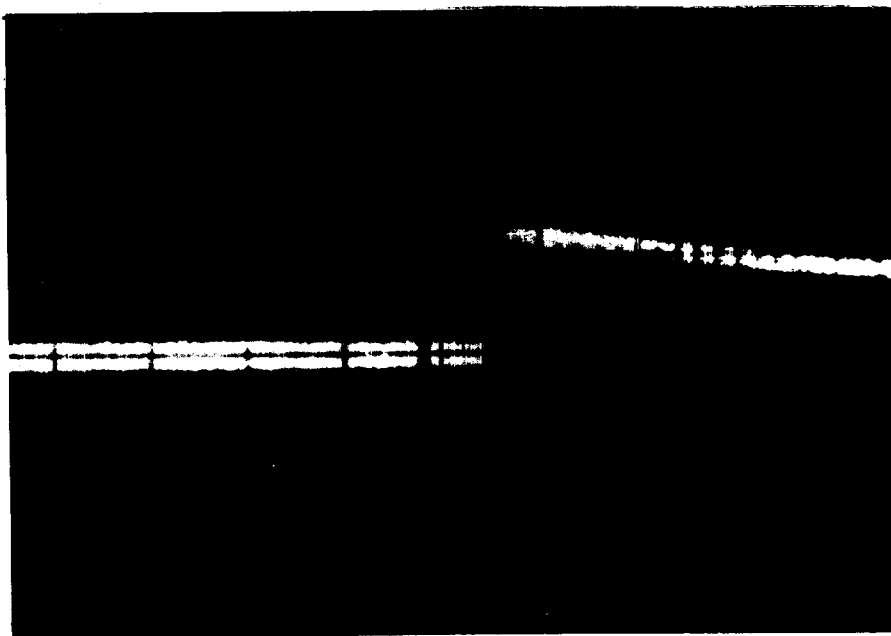
Druhý experiment byl proveden na tomtéž termočlátku. Hodnota energie i délka impulsu laserového paprsku zůstala stejná. Termočlánek byl však posunut do ohniska. Průměr laserového paprsku se zmenšil na 2 mm. Termočlánek se ohřál na teplotu 610°C . Průběh ohřevu je na obr. 27.



Obr. 27

Hodnota napětí byla nastavena na 5 mV na dílek, čas 0,05 s. Průměrná rychlost ohřevu činila $47\ 200^{\circ}\text{Cs}^{-1}$. Maximální rychlost ohřevu $283\ 200^{\circ}\text{Cs}^{-1}$. O 100°C se termočlánek ohřál během $3,52 \cdot 10^{-4}$ s. Na obr. 27 je zřetelně vidět, že vzrostla rychlost ohřevu i rychlost ochlazování. Široký počátek signálu byl způsoben šumy indukovanými v přívodním vodiči.

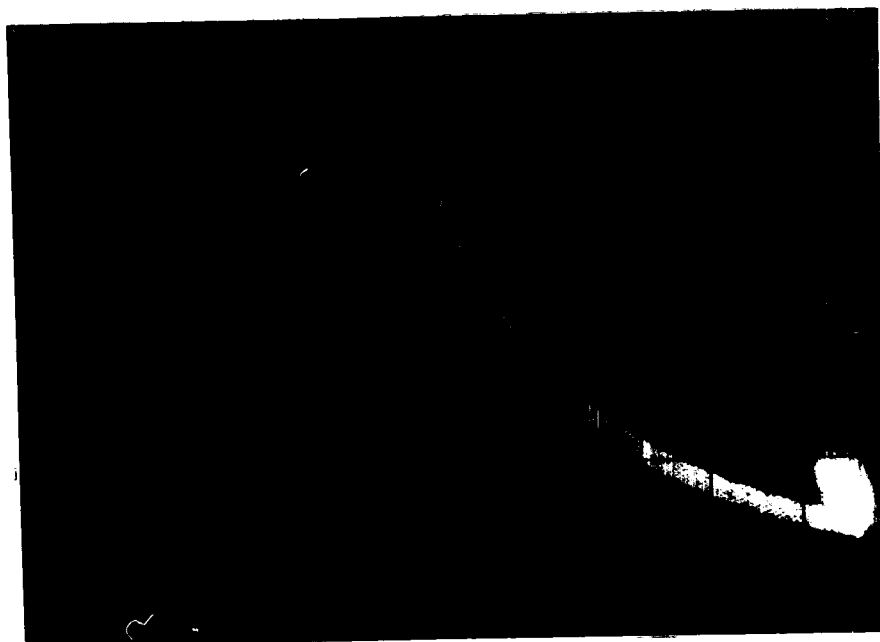
Třetí experiment byl proveden na termočlánek Chromel-Alumel o průměru vodiče 0,5 mm. Průměr svaru byl 0,9 mm. Energie i délka impulsu laserového paprsku zůstala stejná. Průměr paprsku byl 2 mm. Termočlánek se impulsem paprsku ohřál o 190°C . Průběh vzrůstu teploty je na obr. 28.



Obr. 28

Hodnota napětí byla nastavena na 5 mV na dílek, čas 0,05 s na dílek. Průměrná rychlost ohřevu činila $67\ 893^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Maximální rychlost ohřevu není možné určit, ale je zřejmé, že byla vyšší než v předcházejících případech, osciloskop jí nebyl schopen zaznamenat. O 100°C se termočlánek ohřál během $1,5 \cdot 10^{-3}$ (vypočítáno z průměrné hodnoty).

Jako poslední pokus byl proveden ohřev termočláneku připevněném na válečku o výšce 15 mm a průměru 20 mm. Termočlánek byl navařen kondenzátorovou svářečkou jako "termoduo". Materiál termočláneku byl NiCr-Ni o průměru vodičů 0,2 mm. Vzorek byl ozářen v místě, kde byl přivařen termočlánek. Hodnota energie i délka impulsu laserového paprsku zůstala stejná. Průměr laserového paprsku byl 2 mm. Vzorek se ohřál na teplotu 800°C . Průběh ohřevu je na obr. 29.



Obr. 29

Hodnota napětí i čas zůstaly stejné jako v předcházejícím případě. Průměrná rychlost ohřevu činila $182\ 000^{\circ}\text{Cs}^{-1}$. Maximální rychlost ohřevu nebylo možné odečíst. Z údajů v předchozích měřeních ji je možné odhadnout na 5 až 10 násobek průměrné rychlosti.

4.5.3. Diskuse výsledků měření.

Z průběhu křivek ohřevu je zřejmé, že vliv časové konstanty na zpoždění termočlánku není patrný. Nárůst teploty je tak velký, že osciloskop ho nedokáže zaznamenat. Propojením dvou posledních zaznamenaných bodů je možné obdržet téměř kolmici. Obvyklý příznak vlivu časové konstanty, tj. oblouček v počátku křivky, zde není. To dokazuje, že časová konstanta termočlánku změřená v kapitole 4.5.2 se při vysokých hustotách energie prudce zmenšuje. Rozdíl mezi naměřenou a skutečnou teplotou je minimální.

Pro další měření průběhu teplot při ohřevu laserem bude nezbytně nutné sestavit přístroj, který by synchronizoval okamžik spouštění laseru se zapnutím osciloskopu.

5. ZÁVĚR

Mým úkolem bylo navrhnout způsob měření velmi rychlých teplotních změn vhodný pro měření ohřevů kovů laserem.

Po prověření několika metod se jevílo jako nejvhodnější měřit rychlé ohřevy kovů pomocí termočlánku. Závěry, které je možné učinit z teoretické i experimentální části tento předpoklad plně potvrdily.

Je nutné však rozlišit měření teplot prováděná za "nízké" hustoty energie a za "vysoké" hustoty energie.

Hranice mezi nimi je dána rychlostí vedení tepla v materiálu. Jestliže rychlost přívodu a odvodu tepla je srovnatelná, je nutné počítat se zpožděním teplotních údajů způsobených časovou konstantou.

Jestliže hustota energie přiváděné je několikanásobně vyšší než hustota energie odvedené vedením tepla, bude se hodnota časové konstanty snižovat úměrně hustotě přiváděné energie. Z tohoto vyplývá, že čím rychlejší bude ohřev, tím přesnější budou naměřené hodnoty.

Pro průmyslové měření rychlých ohřevů za "nízké" hustoty energie termočlánek ve spojení s osciloskopem dává plně uspokojivé a přesné výsledky za následujících předpokladů:

1. Termočlánek musí být navařitelný na měřený povrch.
2. Termočlánekový vodič musí mít co nejmenší průměr. Pro měření do rychlosti ohřevu $10\ 000^{\circ}\text{Cs}^{-1}$ plně postačuje termočlánek o průměru 0,2 mm NiCr-Ni.

3. Termočlánek musí mít malou časovou konstantu. Její hodnota by pro rychlosti ohřevu do $10\ 000^{\circ}\text{Cs}^{-1}$ měla být nižší než 0,01 sekundy.
4. Přesné výsledky měření, nezatížené chybou způsobenou časovou konstantou τ_z jsou, až po uplynutí doby $5\tau_z$. V údobí 0 až $5\tau_z$ je nutné počítat s chybou měření. Její velikost pro $\tau_z = 0,01$ s a pro rychlost do $10\ 000^{\circ}\text{Cs}^{-1}$ činí maximálně 37°C .
5. Pro vyšší rychlosti ohřevu je nutné k dosažené stejné nebo vyšší přesnosti použít termočlánek s menší časovou konstantou.
6. Časovou konstantu termočlátku je nutné změřit. Na její velikost má velký vliv, mimo jiné, velikost termočlátkového svaru a materiál termočlátku.
7. Velikost časové konstanty je možné podstatně omezit zapojením termočlátku jako termoduo.

Pro další výzkum rychlých teplotních změn je možné doporučit měření pomocí velmi tenkých termočláneků. Bude však nutné podrobně prozkoumat vliv zvyšující se rychlosti ohřevu na přesnost údajů termočlánekem předávaných.

Seznam literatury

- /1/ Sedláček J.: Neželezné kovy /SNTL Praha 1979/.
- /2/ Kuncipál J.: Svařování pro konstruktéry a technology /SNTL Praha 1980/.
- /3/ Šesták J.: Měření termofyzikálních vlastností pevných látek /Academia, Praha 1982/.
- /4/ Mikyška L.: Termoelektrické články /SNTL, Praha 1964/.
- /5/ Výzkum kinetiky austenitizace vybraných nástrojových ocelí, určených pro povrchové indukční kalení /Výzkumná zpráva VŠST - KTM - 1.díl, Liberec 1974/.
- /6/ Gross B.: Měření vysokých teplot /SNTL, Praha 1962/.
- /7/ Impulsní ohřevy při tepelném zpracování kovů /Výzkumná zpráva VŠST, Liberec 1985/.
- /8/ Matyáš - Zehnula - Pala: Malá encyklopedie elektrotechniky /SNTL, Praha 1983/
- /9/ Chaloupecký V.: Studium kinetiky fáz. přeměn ocelí při různých rychlostech indukčního ohřevu. /Kand. dis. práce, Liberec 1968/.
- /10/ Laurin J.: Měření teploty hořící směsi ve vznětovém motoru.
- /11/ Wolf K.: Krystalový teploměr Hewlett-Packard 2861 A.
- /12/ Šinták J.: Teoretické základy energetických zařízení II. /připravovaná skripta/.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji s. ing. Horynovi CSc. za vedení a cenné připomínky k diplomové práci.

Dále děkuji s. ing. Loudovi a s. Maříkovi za pomoc v měření.

Debr Škala