

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

Katedra energetických zařízení

E F E K T I V N O S T T M E L I C Í H O

P R O C E S U

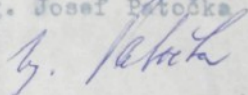
Kandidátská disertační práce

Vedoucí katedry : Prof. Ing. J. Šinták, CSc.

Školitel : Prof. Ing. J. Mayer

Zpracoval : Ing. Josef Batočka

Prosinec 1980



O B S A H

Úvod	4
1. Obecné problémy mechanizace a automatizace	8
2. Cíl práce	18
3. Teoretické úvahy a předpoklady	20
3.1. Časový průběh teploty tmelky	24
3.1.1. Teplota tmelky jako technologický parametr	24
3.1.2. Teplota tmelky jako výsledek fyzikálních procesů	30
3.1.3. Teoretický výpočet teploty tmelky	39
3.2. Závěr teoretické části	57
4. Experimentální měření	60
4.1. Optimální poloha tmelky a hořáku	60
4.1.1. Experimentální zařízení	61
4.1.2. Volba a rozsah proměnných veličin	64
4.1.3. Naměřené výsledky	64
4.2. Ohřev a ochlazování tmelky	70
4.2.1. Experimentální zařízení	70
4.2.2. Volba a rozsah proměnných veličin	72
4.2.3. Naměřené výsledky	76
4.3. Návrh na realizaci výsledků	94
4.3.1. Plynový trubkový hořák	94
4.3.2. Kombinovaná tmelka	100
4.4. Optimální teplota tmelky při rozhodujících fázích tmelicího procesu	114

4.4.1. Nabírání tmelu	114
4.4.2. Nabírání suroviny a domačkování	116
4.4.3. Přetmelení a odtmelení	119
4.4.4. Poloha tmelek při ohřevu, zviditelnění plamene hořáku, tvr povrchu tmelky, vliv času na pevnost přitmelení	120
5. Doporučení k dalšímu výzkumu	126
6. Literatura	128

Ú V O D .

Zvýšení technické úrovně technologických procesů je jedním z předpokladů materiálního rozvoje společnosti. S neustále stoupajícím rozvojem jak technického tak společenského vzdělání roste životní úroveň celé společnosti. V období vědecko technické revoluce, kdy věda v obecném slova smyslu se nezabývá pouze vysvětlováním a hledáním základních zákonů jak fyzikálních tak společenských, ale hlavně udává směr rozvoje a koncepci jednotlivých výrobních odvětví, je třeba klást zvýšený důraz na základní výzkum, jako prostředek nejracionálnějšího poznání, vedoucí k efektivnějšímu využívání lidské práce při přeměně přírodních materiálů ve výrobky s co nejvyšší užitnou hodnotou. Snížení podílu lidské práce na jednotku výroby lze v podstatě dosáhnout dvěma způsoby. Buď intenzifikací lidské práce, nebo automatizací výroby. Intenzifikace lidské práce má však své poměrně úzké hranice a je účelná jen v časově krátkých údobích při okamžité potřebě zvýšení produkce v podstatě bez investičních nákladů. V žádném případě to však není dlouhodobé řešení a koncepce výzkumu a celého rozvoje konkrétního oboru musí být založena na zdokonalování a zvládnutí technologických procesů vedoucích k automatizaci výroby. Podstatou rozvoje výroby musí být rozvoj technické úrovně dávající předpoklady k postupné automatizaci výroby. Z této pozice je třeba vycházet při všech koncepčních úvahách a studiích. Pracovníci pověřeni výzkumem

a rozvojem v daném oboru jsou nejen morálně, ale i zákonně odpovědní za koncepci rozvoje daného oboru. Tato koncepce musí vycházet z komplexního vyhodnocení jak dosavadních vědecko technických poznatků, tak z vyhodnocení dosavadní úrovně a poznatků konkrétních výrobních postupů. Přecenění jednoho nebo druhého faktoru vede vždy buď k odtržení výzkumu od reálné možnosti jeho aplikace, nebo k realizaci závěrů výzkumu bez podstatného zvýšení produktivity práce. Pouze vyvážená syntéza těchto dvou uvedených faktorů může splnit požadavky obecně kladené na výzkumné a vývojové pracovníky.

V oboru výroby strojně broušených kamenů se dostávají v posledních letech do popředí otázky spojené s tmelicími operacemi. Jsou to operace sloužící k pevnému uchycení skleněné suroviny (kuličky, předlisované tvary) na čelo kovové válcové tyčinky, t.zv. tmelky, která slouží jako držák při jejím broušení a leštění. Tmelení je technologická operace, při které je skleněná surovina pomocí tmelu určitého složení / 18 / za tepla přilepena na čelo kovové, příslušně tvarované tmelky. Ochlazením suroviny, tmelu a tmelky dojde k pevnému spojení, což umožní vybroušení skleněné suroviny - kamene po jedné straně. Po této operaci následuje t. zv. přetmelení, spočívající v tom, že jednostranně vybroušený kámen je za tepla přilepen vybroušenou stranou pomocí tmelu na novou tmelku. Ochlazením nové tmelky a ohřátím původní tmelky dojde k předání (přetmelení) kamene mezi těmito dvěma protilehlými tmelkami. Pomocí nové tmelky, sloužící opět jako držák, dojde k vybroušení druhé strany kamene. Po vybroušení druhé strany kamene, t.j. jedné i druhé strany je tmelka ohřátá, tím se vybroušený kámen uvolí a vlastní tíhou nebo pomocí vnější síly odpadne. Tento technologický úkon se nazývá odtmelení.

Ve vztahu k dříve uvedeným dvěma faktorům podmiňujícím technický rozvoj a pokrok lze konstatovat, že tmelicí operace jsou prováděny na základě praktických zkušeností manuálních pracovníků, kteří spolu s dlouhodobě získávanou zruč-

ností vytváří těžko napodobitelnou syntézu. Každá snaha o pouhé napodobení ruční práce pomocí automatu bude úspěšná jenom tehdy, když není požadována jakási "zpětná vazba" mezi průběhem technologického děje a jeho řízením. Povaha tmelících operací však v každém případě vyžaduje kontrolu děje buď trvalou, tak jak ji provádí pracovník při ručním tmelení a přetmelování, nebo občasnou, jak ji provádí seřizovač u strojů poloautomatických a automatických. Kvalitu ručních tmelících operací by jednoznačně zajistila aplikace adaptivního systému řízení technologické operace, tak jak je tento systém znám z provozu kovoobráběcích strojů. Lze však předpokládat vysokou investiční náročnost a vývoj řady pomocných zařízení. V současném stavu poznání je účelnější realizovat a provozně vyzkoušet neadaptivní systém tmelících strojů založený na občasném seřízení stroje, nikoliv však podle subjektivních znalostí a odhadu seřizovače, jak je to dosud prováděno, ale podle technicky zdůvodněných parametrů technologického procesu. K tomu je však potřeba pomocí základního výzkumu tyto parametry nejen určit, pokud se týká fyzikálních vztahů, ale najít rozhodující proměnné veličiny a jejich vliv na stabilitu tmelících operací.

Předkládaná práce neřeší problémy tmelících operací v celé šíři, neboť by to zdaleka přesáhlo její rámec. Nelze však ji vytrhnout ze souvislostí daných problémy, proto budou v jednotlivých kapitolách buď uváděny fyzikální závislosti naměřené autorem, nebo bude proveden odkaz na příslušnou odbornou literaturu. Tam, kde nebylo možno provést ověřovací měření v dostatečné šíři, ani problematika není popsána v literatuře, je problém zasluhující si podrobnějšího výzkumu zahrnut do kapitoly (kap. 5) "Doporučení k dalšímu výzkumu". Těžiště práce spočívá jak v teoretickém, tak v praktickém výzkumu problému nestacionárního sdílení tepla v celém průběhu tmelících operací a rozboru

vlivu jednotlivých faktorů, ovlivňujících ohřev a ochlazení .

Autor děkuje všem spolupracovníkům z katedry energetických zařízení za teoretickou i manuální spolupráci a pracovníkům k.p. Preciosa za odbornou pomoc a realizaci některých návrhů již během zpracovávání závěrů této výzkumné činnosti.

1. OBECNÉ PROBLÉMY MECHANIZACE A AUTOMATIZACE.

Před každým průmyslovým podnikem stojí v současné době řada problémů vycházejících z nedostatku pracovních sil a nedostatečné kapacity výrobních zařízení. Tyto vážné problémy nabývající neustále na významu je možno řešit důslednou mechanizací a automatizací výroby. Jsou to činnosti, směřující k zavedení takových výrobních procesů, ve kterých se používá mechanizovaných nebo automatizovaných výrobních strojů a zařízení, při čemž mechanizace vede k ulehčení nebo k úplnému odstranění fyzické práce člověka a automatizace je činnost, která v mechanizovaném procesu člověka ulehčuje, nebo úplně odstraňuje duševní práci člověka, bezprostředně vázanou na výrobní proces. Automatizace nutně předpokládá předchozí mechanizaci vyššího typu, kdy je používáno mechanismů se zdrojem přídavné energie. Řídící funkci člověka přebírá řídicí soustava, která je dvojího druhu. Buď je vhodná pro řízení zcela určitého výrobního procesu t.zv. speciální soustava, nebo soustava použitelná u několika typů výrobního procesu t.zv. univerzální, která pro konkrétní výrobní proces musí být naprogramována. Mezi požadavky kladenými na automatizované zařízení patří zejména :

- a) h o s p o d á r n o s t - výroba jednotky produkce na automatizovaném stroji musí být levnější nežli stejná výroba na konvenčním ručně řízeném stroji. Zároveň je nutná dostatečná životnost stroje a rychlá návratnost investic.
- b) s p o l e h l i v o s t f u n k c e - je charakterizována dobou mezi dvěma poruchami stroje nebo systému. V případě, že není zaručena vysoká spolehlivost, vznikají potíže

přerušováním výrobního toku vlivem poruch a je nutné nasa-
dit do provozu více strojů téhož typu.

c) j e d n o d u c h o s t k o n s t r u k c e - má vliv
na cenu stroje i na spolehlivost jeho funkce. U komplikova-
ných mechanismů s rozvětvenými kinematickými řetězci je vět-
ší pravděpodobnost poruchy.

d) s e ř í d i t e l n o s t - znamená schopnost přizpůsobit
výrobní zařízení v krátké době výrobě jiné součásti, tvaro-
vě i rozměrově odlišné od součásti předchozí. Je to důležit-
té kritérium, které řadí automatický obráběcí stroj do sku-
piny buď t.zv. strojů s tvrdou automatizací, nebo s pružnou
automatizací.

Tvrdá automatizace je charakterizována dlouhou dobou,
nutnou pro seřízení automatického stroje na jiný obrobek,
po př. nemožností takovouto změnu provést. Uplatňuje se při
mnohaleté výrobě součástí, které nepodléhají změnám a vyrá-
bějí se ve velkých seriích. Tvrdá automatizace je typická
pro velkoseriovou a hromadnou výrobu.

Pružná automatizace předpokládá využití takového auto-
matizovaného výrobního zařízení, kde seřízení stroje pro
obrábění jiného obrobku probíhá relativně v krátké době, po-
kud možno mimo stroj.

Rozhodující pro volbu typu automatizovaného výrobního
zařízení jsou celkové náklady na výrobek, které se stanoví
podrobným ekonomickým rozbořem.

U automatizovaných výrobních strojů probíhá pracovní
cyklus bez zásahu obsluhy do režimu obrábění. Informace,
které jsou nutné k řízení všech potřebných funkcí stroje
jsou připraveny technologem programátorem mimo stroj a jsou
zaznamenány v programu, což je souhrn informací, nutných k
řízení výrobního stroje. Podle formy programu lze rozdělit
automatizované obráběcí stroje na :

- a) stroje řízené narážkami a dorazy
- b) stroje řízené vačkovými kotouči a bubny
- c) stroje řízené kopírovacími systémy
- d) stroje řízené číslicovým systémem
- e) kombinované systémy

Číslicové řízení, pro které se běžně užívá zkratky NC (numerical control), je nejvyšším typem programového řízení výrobních strojů. Číslicově řízený obráběcí stroj pracuje rychleji a přesněji než-li kvalifikovaný pracovník, nemá však možnost hodnotit výrobní proces a přizpůsobovat se změnám podmínek. Uvedený nedostatek řeší t.zv. adaptivní systém řízení, kde kontrolní činnost a zásahy člověka jsou nahrazeny soustavou čidel, které sledují jednotlivé parametry výrobního procesu a tyto porovnávají s parametry zakódovanými do programu. Z vyhodnocení, prováděného ve vlastním řídicím systému, plyne signál pro řízení stroje.

Podle složitosti jsou rozlišovány dvě skupiny adaptivního řízení:

- a) l i m i t n í a d a p t i v n í ř í z e n í (ACC), kdy jsou podmínky výrobního procesu udržovány tak, aby produkce byla co největší a sledované parametry byly udržovány těsně pod hranicí (limitou) maximální dovolené hodnoty.
- b) o p t i m a l i z e č n í a d a p t i v n í ř í z e n í (ACO), při kterém jsou udržovány optimální podmínky z hlediska přesnosti výroby, množství výrobků a velikostí výrobních ztrát.

Systém ACC je jednodušší a v současné době více rozšířen.

Automatizaci výrobních procesů je třeba posuzovat jak z hlediska kladných, tak z hlediska záporných účinků. Teprve komplexní vyhodnocení dá odpověď, zda v konkrétní situaci daného oboru je natolik účelná, že ve svých násled-

cích vede ke zvyšování životní úrovně. Snahou společenské výroby je dosažení co nejvyšší výrobnosti výrobního zařízení a co nejvyšší produktivity práce.

Velikost produkce je dána vztahem

$$Q = Z \cdot w \quad (2.1)$$

kde Q - velikost produkce

Z - množství práce

w - produktivita práce

zvýšení Q lze provést zvýšením množství práce Z (extensivně) nebo zvýšením produktivity práce w (intensivně) nebo zvýšením obou faktorů. Vzhledem k vyčerpání extensivních zdrojů je reálné zabývat se pouze zvyšováním produktivity práce

$$w = u \cdot v, \text{ kde } u - \text{účinnost fondů} \\ v - \text{fondová vybavenost}$$

$$u = \frac{Q}{F} \quad - \text{množství produkce, která připadá na jednotku fondů v hodnotové formě}$$

$$v = \frac{F}{Z} \quad - \text{fondová vybavenost, hodnota fondů, která připadá na jednoho dělníka v hlavní směně}$$

hodnotu u lze vyjádřit :

$$u = \frac{Q' - s}{F}, \text{ kde } Q' - \text{teoretická kapacita výrobního zařízení}$$

s - stupeň využití této kapacity

Zvýšení produktivity práce znamená, že :

$$w = \frac{Q' - s}{F} \cdot \frac{F}{Z}, \quad (2.2)$$

je-li w_1 - původní produktivita práce

w_2 - nová produktivita práce

pak musí platit $w_1 < w_2$. Z toho vyplývá :

$Q_2' > Q_1'$ - nové zařízení musí mít vyšší teoretickou výrobní kapacitu,

$s_2 > s_1$ - využití tohoto výrobního zařízení musí být vyšší, je to záležitost organizace a řízení,

$Z_2 < Z_1$ - zavedení vícestrojové obsluhy nebo menší potřebný počet dělníků u výrobního zařízení.

Pro oprávněnost zavedení automatizovaného výrobního zařízení musí platit jednoduchá podmínka :

$$P > N_A - N_R$$

kde P - přínos automatizace

N_A - náklady na automatizovanou výrobu

N_R - náklady na ruční výrobu,

při čemž automatizace probíhá zhruba ve dvou etapách :

I. etapa - výzkum, vývoj, ověřování a nasazení první série strojů do žkušebního provozu

II. etapa - zdokonalování strojů a systémů a hromadné nasazení do výroby.

V I. etapě zpravidla kapacita výrobního zařízení roste pomaleji než cena výrobního zařízení vzhledem k vysokým nákladům na výzkum, vývoj a ověřování. Vynaložené prostředky je nutné důsledně zhodnotit během II. etapy. Podmínkou pro využití zvýšených nákladů na výzkum je soustavné a důsledné uplatňování poznatků základního výzkumu v procesu rozvoje daného oboru. Nesprávná je domněnka některých pracovníků, že rozvoj oboru lze úspěšně a levněji provádět bez dostatečně

vědecky podloženého základního výzkumu. Úspěšný vědeckotechnický rozvoj se stále více stává závislým na vědecky správném určení i na vědecky zvládnutých předpokladech výzkumu. Zákonitý soulad postupu vědy s potřebami socialistické společnosti není automatickou záležitostí a jeho realizace vyžaduje zprostředkování cílevědomou a dlouhodobou strategií rozvoje vědy jako součásti všeobecné strategie rozvoje socialistické společnosti. Tato strategie vědy se stává jedním z určujících prvků perspektivy vývoje a už zdaleka ji nelze určovat podle potřeb existující výroby. Moderní výroba se bude stále více opírat o předstih vědy. Tento aktivní vztah vědy k výrobě podmiňuje soustavné využití technických převratů a inovační charakter celého národního hospodářství. Je třeba dosáhnout zásadního obratu v růstu společenské produktivity práce a to lze dokázat jen s využitím nejnovějších poznatků vědy a techniky. Plné využití možností vědeckotechnického pokroku se stává jedinou možnou alternativou dalšího rozvoje ekonomiky. Proto je třeba respektovat, že vědeckotechnická revoluce přesahuje dosavadní tradiční cesty zdokonalování výroby, vyžaduje nový přístup k realizaci technického rozvoje a výroby. Při této činnosti je třeba uvážene respektovat specifiku daného oboru ve vztahu k ostatním průmyslovým oborům, zvláště k těm, kde proces automatizace dosáhl vysoké úrovně. Spolu s aplikací matematiky a technické kybernetiky je třeba vytvářet a budovat vlastní koncepci rozvoje. V žádném případě to nesmí být akce jednorázová, ve své podstatě statická, která na sobě nese již při svém zrodu pečeť rychlého morálního stárnutí. Zavádění automatizace musí být chápáno jako dynamický děj, neustále se zdokonalující, navazující na dosavadní poznatky a zkušenosti. Na této cestě je třeba odpovědně vyhodnotit i takové záměry, jejichž správnost nebyla při praktické aplikaci prokázána. Důležitým faktorem při automatizaci výrobních procesů je vypracování základní metodiky přístupu

pracovníků k obecně platným zákonitostem. Konkrétní, specifické zákonitosti mají vždy určitý vztah k zákonitostem platícím v obecnější úrovni, což dává možnost zpětně využívat obecně platných poznatků z jiných odvětví výroby.

Je dostatečně prokázáno, že moderní automatické výkonné stroje, charakteristické tím, že jsou vysoce produktivní, přesné a spolehlivé, jsou bezpodmínečně nutné pro rozvíjející se národní hospodářství. Ovšem automaty nebo systémy strojů pracující bez zásahu člověka jsou řízeny podle determinovaného zákona / 2 /, avšak výrobní a technologické procesy se nechovají jako deterministické soustavy, pro které je charakteristická jednoznačnost účinku proměnných veličin, ale mají stochastickou povahu. Tato povaha ukazuje, že reakce na změnu parametrů nezávisle proměnných mají tvar spekter pravděpodobnosti zákonů rozdělení výsledků. Toto je potřeba brát v úvahu při projektování systému řízení stroje. Řešení se zdá být snadné pro pevnou automatizaci. Problémy však vyvstávají při automatizaci pružné. Zde je třeba budovat na znalostech fyzikálních zákonů technologického procesu. V konkrétním případě v oboru strojně broušených kamenů při tmelících operacích. Velkou překážkou pro řešení automatizace jak pružné, tak i pevné, je nedokonalá znalost všech dějů, které souvisejí s tmelícími operacemi. Dalším nepříznivým faktorem v oboru výroby strojně broušených kamenů je přežívání zcela subjektivistického hodnocení některých parametrů technologického procesu. Jako příklad lze uvést neznalost optimální teploty konce tmelky v jednotlivých fázích tmelících operací a to neznalost z hlediska technologického t. zn. určení nejvýhodnější teploty pro danou surovinu, tmel a tmelku a z hlediska možnosti tuto teplotu při tmelících operacích kontrolovat. Nepochybně existují i další faktory ovlivňující kvalitu tmelících operací. Patří k nim teplota a vlhkost vzduchu, složení a zrnitost tmelu, chvění stroje, přítlačné síly, dynamické účinky zrychlení jednotlivých součástí stroje atd. Poněvadž tyto faktory jsou ve své podstatě

proměnnými veličinami, ovlivňují více či méně vznik systematických nebo nahodilých chyb. Oprávněnost vzniku a vlivu nahodilé chyby byla autorem popisována v práci / 17 /. Vznik chyb si vynucuje nutnost aktivního vstupu do technologického procesu. Když je stroj řízen pracovníkem, existuje možnost kontrolovat některé z uvedených faktorů a provádět korigující zásahy. U strojů automatických to vyžaduje aplikaci uvedeného adaptivního systému řízení. Pracovníci Moskevského institutu strojů a nástrojů rozpracovali dvě cesty, jež upravují "pružné odchylky" systému stroj - nástroj - obrobek / 1 /. Proces je popsán závislostí

$$A_{\Delta} = A_u + A_s + A_D \quad (2.3)$$

kde A_{Δ} - stav získaný jako výsledek děje

A_u - stav nastavení děje

A_s - stav statického nastavení náležející rozměrovému řetězci systému stroj - nástroj - obrobek

A_D - rozměr dynamického nastavení téhož rozměrového řetězce

První cestu konstatního rozměru A_{Δ} představuje zabezpečení možnosti kompenzace změn rozměru dynamického nastavení A_D zanesením nutných odchylek Δ_s do rozměru statického nastavení A_s :

$$A_{\Delta} = A_u + (A_s - \Delta_s) + (A_D + \Delta_D) \quad (2.4)$$

kde $\Delta_s = \Delta_D$

Druhá cesta se zakládá na kompenzaci změn Δ_D rozměru dynamického nastavení A_D způsobem zanášení oprav Δ'_D s opačným znaménkem, t.j.

$$A_{\Delta} = A_u + A_s + (A_D + \Delta_D - \Delta'_D) \quad (2.5)$$

kde $\Delta'_D = -\Delta_D$

Rozpracování těchto teoretických základů se stalo počátkem nové etapy v technologii - etapy adaptivního řízení obráběcích strojů. I když realizace systému adaptivního řízení značně zvyšuje přesnost a současně i produktivitu operací, ve většině případů zůstává nevyřešen úkol optimalizace a optimálního řízení celého procesu. V souvislosti s tím jde o nalezení optimálních podmínek, které jsou dostatečně "úzké" pro dosažení žádané přesnosti, ale současně zaručují dostatečnou produktivitu. Velmi vysokým stupněm organizace výroby vynikají systémy zajišťující přímé řízení souboru strojů počítačem při optimalizaci technologických procesů. S tím vzrůstá úloha teoretických prací na sestavení matematických modelů objektů i procesů, sestavení optimálních algoritmů a programů, bez nichž nelze nalézt optimální řešení. Základní úloha matematického modelování spočívá v zabezpečení optimálního řízení systémem nebo procesem. V důsledku toho úplný matematický model musí popisovat vazby mezi základními proměnnými procesu při ustálených režimech (statický model) a v čase přechodu od jednoho výrobku k druhému (dynamický model).

Technologický objekt a jeho činnost nebo řada technologických objektů, sjednocených za určitým cílem a jejich činnost je možno popsat formálním matematickým schématem, obecným a platným pro všechny technologické procesy / 2 / :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n, w_1, w_2, \dots, w_e, u_1, u_2, \dots, u_k, t) \quad (2.6)$$

kde skupina $x_1, x_2, \dots, x_n$ představuje "vstup" systému, množina ukazatelů procesu $y_1, y_2, \dots, y_m$ představuje "výstup", množina $w_1, w_2, \dots, w_e$ vymezuje chyby, vyvolané náhodnými a systematickými faktory, které odklánějí proces od jeho normálního průběhu. V technologickém procesu provádí řízení buďto člověk nebo nějaký systém. Jeho působení představuje skupina $u_1, u_2, \dots, u_k$. Zobecněné matematické schéma technologického procesu může být forma-

lizováno vektorově v podobě

$$\vec{Y} = F / \vec{A}(t), X(t), W(t), U(t), t, \quad (2.7)$$

kde $\vec{A} = (a_1, a_2, \dots, a_j)$ - vektor neznámých parametrů, který charakterizuje proces i jeho stav

F - operátor určující proces

Výsledkem činnosti každého technologického procesu je vždy žádaný výstup $y_z(t)$, který je zadán technickými podmínkami. Rozdíly vzniklé jako důsledek skutečného výstupu $y_1(t)$ technologického procesu a zadaného výstupu charakterizují kvalitu řízení daného procesu, mohou být popsány lineární funkcí

$$e(t) = y_z(t) - y_1(t) \quad (2.8)$$

nebo kvadratickou funkcí

$$e(t) = / y_z(t) - y_1(t) /^2 \quad (2.9)$$

Úpravu je nutno provést takovým způsobem, aby bylo minimalizováno kritérium jakosti typu

$$e(t) = \int_t^T e(t) d\tau \quad (2.10)$$

pro $t \leq \tau \leq T$

2. CÍL PRÁCE.

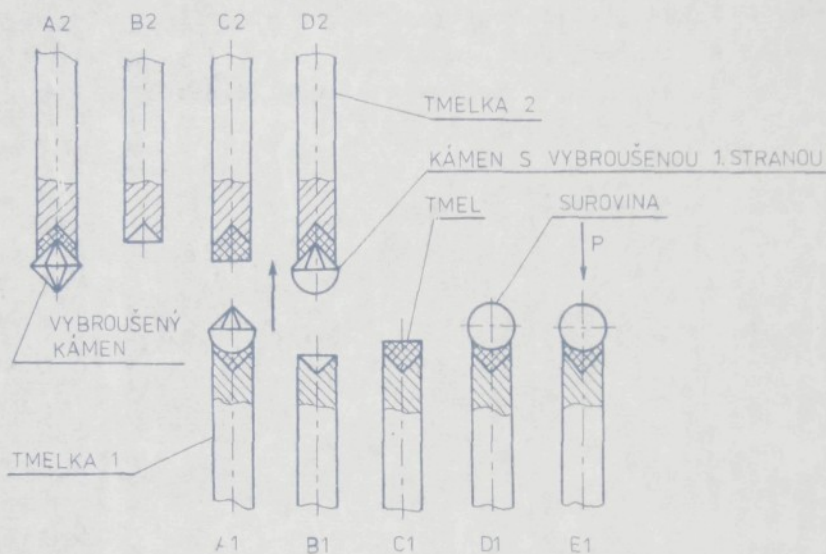
V předchozí kapitole byla dostatečně obšírně zdůrazněna nutnost poznání základních proměnných veličin, určujících průběh technologické operace. V prvním přiblížení problému je potřeba provést výčet všech možných vlivů, které jsou obecně součástí rovnice (rov. 2.6). V dalším je nutno zjistit závislost výsledku děje na jednotlivých vstupech a zjistit citlivost technologického děje na chyby jednotlivých proměnných veličin. Teoreticky je tato problematika zpracována a uváděna pod pojmem *analýza senzitivity* /3/. V uvedené literatuře je velká část věnována rozhodovacím modelům a vlastní náplň se týká ekonomické problematiky řízení. Obsahuje však řadu obecně platných a použitelných matematických metod pro určení optimálního výsledku děje. I v oblasti tmelících operací je nutno respektovat nejen hlediska technické uskutečnitelnosti děje, ale i hlediska ekonomická, neboť přechod výroby na sortiment větších kamenů by při zachování dosud aplikovaného empirického přístupu k tmelícím operacím znamenal neúměrný nárůst spotřeby energie. V této práci je navazováno na řadu poznatků jak provozních, tak výzkumných. Jak bylo v úvodu řečeno, nemůže autor provést dostačující a zcela vyčerpávající výzkum, neboť by práce byla příliš rozsáhlá. Zároveň ani nemůže být ukončením cesty poznávání zákonitostí dějů při tmelících operacích, neboť každý krok při realizaci poznatků základního výzkumu zpravidla sebou přináší další, někdy i nepředvídané dopady, jak v záporném, tak v kladném smyslu a vynucuje si další, zpravidla obšírnější výzkum. Snahou autora je při-

spět touto prací jednak k poznání těch fyzikálních vztahů, které v dané problematice nejsou dostatečně zpracovány a o nichž lze předpokládat, že mají zcela konkrétní objektivní charakter, jednak zaujmout stanovisko k některým úvahám z výzkumné činnosti výrobce. V žádném případě autor nechápe svá stanoviska jako kritiku dosavadního výzkumu v oboru tmelení, ale jakousi diskuzi výsledků ve vztahu k metodice provádění některých měření. Vedle konkrétních fyzikálních zákonitostí ověřovaných jak experimentálně, tak teoreticky, jsou některé závěry výzkumné činnosti autorem předkládány k diskuzi. Tyto závěry by spolu s uváděnými fyzikálními vztahy měly být jedním z podkladů pro návrh spolehlivého, efektivního a stabilně pracujícího automatického "středového" stroje.

3. TEORETICKÉ ÚVAHY A PŘEDPOKLADY.

V průběhu tmelících operací vystupuje řada proměnných veličin, jejichž účinek na výsledek děje nebyl dosud dostatečně ověřován. Dosavadní poznatky vycházejí z empiricky stanovených podmínek tmelení, které jsou na různých provozních zpravidla známé seřizovačům a technologům, postrádají však objektivní rozměrové vyjádření v SI soustavě. Důsledkem empirického přístupu je zpravidla pouze souhrn řady účinků na výsledek děje, nikoliv však analýza citlivosti děje na jednotlivé vstupy, včetně zpracování výsledků chyb jednotlivých vstupů na výsledek. V předkládané práci byl volen systém rozložení tmelících operací na jednotlivé prvky; ty pak jsou zkoumány zcela samostatně, jak teoreticky, tak prakticky. To umožnilo zcela se odpoutat od závislosti na provozním zařízení výrobce a jednotlivé prvky tmelících operací sledovat na zařízeních, která daný prvek modelují. Hlavním důvodem tohoto postupu však nebyla pouze realizace nezávislosti na výrobním zařízení, ale eliminace všech dalších vlivů (vstupů) do technologického děje. Většina měření byla prováděna na takových modelech, které vylučovaly všechny nežádoucí proměnné vstupy. Tam, kde z fyzikální podstaty děje nebylo možno nežádoucí proměnné vstupy odstranit, byly tyto alespoň průběžně identifikovány. Tento způsob "přenesení výroby" do laboratorních podmínek by mohl vyvolat námitku proti možnosti budoucí realizace v podmínkách provozních. Autor proto ve výsledcích své práce uvádí fyzikální zákonitosti jednotlivých prvků operací, u kterých je oprávněnost předpokladu objek-

tivní platnosti jak za laboratorních, tak provozních podmínek.



Obr. 3.1. Přehled jednotlivých fází tmelících operací.

Schematicky je technologie tmelících operací uvedena na (obr. 3.1.), kde pos. A₁ představuje technologickou fázi, kdy do tmelících zařízení přichází tmelka (aparát) s jednou vybroušenou stranou, ve fázi B₁ je kámen předán protilehlé tmelce druhého aparátu. Ve fázi C₁ je prováděno čištění konce tmelky a nabrání potřebného množství tmelu, D₁ nabrání (nalepení) nové suroviny a E₁ pružné dotlačení suroviny do dna (kališku) tmelky. U protilehlého aparátu dochází ve fázi A₂ ke snímání hotového kamene,

B₂ čištění tmelky, C₂ nabrání nového tmelu a D₂ přitmelení kamene s jednou vybroušenou stranou. Tato základní technologie se s malými obměnami vyskytuje ve všech závodech koncernu. Rozdíly na př. mezi systémy SAV1, TS-2, TS-3 a ručními technologiemi jsou pro studium tepelných pochodů nepodstatné. Způsob označení jednotlivých fází je shodný s pracemi / 17, 20/. Přehledně jsou jednotlivé fáze uvedeny v / tab. 3.1./ spolu s výčtem proměnných vstupů.

Proměnné vstupy tmelících operací	Přetmelení	Čištění	Nabírání tmelu	Nabírání suroviny	Domačknutí suroviny
Časový průběh teploty tmelky	////	////	////	////	////
Materiál tmelky		////		////	
Výkon hořáku	////		////	////	////
Geometrické uspořádání hořáku vůči tmelce	////	////	////	////	////
Bod tání tmelu	////	////	////	////	////
Citlivost skla na rychlou změnu teploty	////			////	////
Mechanická pevnost skla	////			////	////
Teplota aparátu	////	////	////	////	////
Teplota okolí	////				
Tlak plynu	////	////	////	////	////
Výhřevnost plynu	////	////	////	////	////
Rychlost děje	////	////	////	////	////
Geometrické uspořádání soustavy pro nabírání suroviny				////	
Geometrické uspořádání soustavy pro nabírání tmelu			////		
Zrnitost tmelu			////		
Síla přitisknutí suroviny		////		////	////
Geometrie a přesnost suroviny				////	////

Tab. 3.1. jednotlivé fáze tmelících operací a veli-
činy ovlivňující kvalitu natpmelení

výrazný vliv //// částečný vliv \\\

bez vlivu ☐

3.1. Časový průběh teploty tmelky

Obeecnou problematiku ~~teplotní~~^{teploty} závislosti konkrétního místa tmelky v závislosti na čase je třeba sledovat ze dvou zcela rozdílných hledisek a to :

a) teplota funkční části (konce) tmelky jako technologický parametr různý pro jednotlivé fáze technologického děje, závislý na vlastnostech tmelu, částečně i suroviny

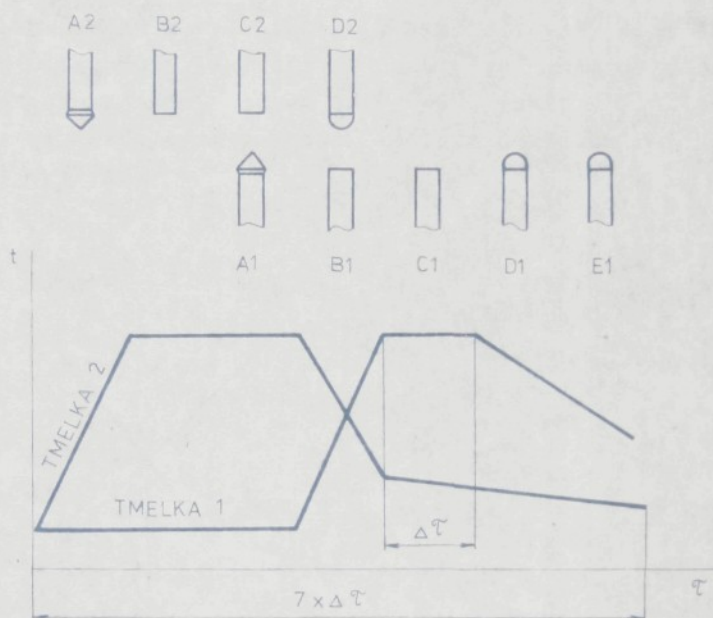
b) teplota funkční části (konce) tmelky jako výsledek fyzikálních procesů determinovaných jednotlivými vstupy (ohřev, vedení tepla, konvekce, sálání, nucené ochlazování atd.).

3.1.1. Teplota tmelky jako technologický parametr

Pro návrh tmelicího stroje ^{je} znalost optimálních teplot v jednotlivých fázích operace nevyhnutelnou podmínkou, bez jejíž znalosti bude sice nový stroj schopen tmelící operace zajišťovat, ale bude se to " učit" tak, jak se to učí pracovník při ruční obsluze. U automatického stroje je toto " učení" zprostředkováno seřizovačem. Komplikace seřízení spočívají v tom, že se najednou uplatňuje celá řada proměnných vstupů, zatížených případnou nestabilitou (výhřevnost plynu, tlak plynu, teplota pracoviště).

Poznání fyzikálních zákonitostí a vztahů dá teprve předpoklady k zvládnutí celého technologického děje. Autor považuje znalost teploty tmelky jako technologického parametru za nevyhnutelnou. Proto se v kapitole "Experimentální měření" orientačně zabývá určením optimální technologické teploty pro nejdůležitější fáze tmelení / kap. 4.4./.

Problematikou teploty jako technologického parametru se autor rovněž zabýval v pracích / 17,20/. Nedostatečně byly dosud teoreticky analyzovány teplotní změny tmelek při operaci přetmelování, která se u automatických strojů jeví jako nejvíce problematická, neboť rychlost přetmelování je limitujícím faktorem rychlosti stroje.

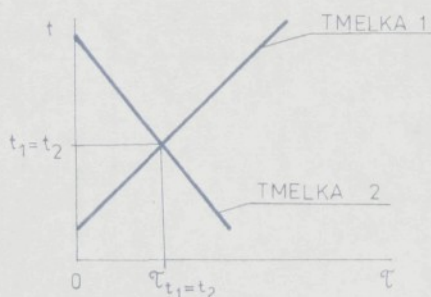


Obr. 3.2. Schéma průběhu teploty tmelek při tmelících operacích

Tmelicí cyklus je znázorněn na (obr. 3.2.). Shodně s dříve uvedeným popisem je kámen přetmelován z tmelky označené 1 na tmelku označenou 2 ve fázi $B_1 - D_2$.

Současně je graficky znázorněn časový průběh teploty tmelek, tak jak procházejí jednotlivými fázemi. Časový úsek $\Delta\tau$ představuje t.zv. krok stroje, t.j. časový úsek, za který se uskuteční jedna fáze operace. Poněvadž jde o kontinuální návaznost, probíhají u automatických strojů všechny operace současně, takže krok stroje představuje základní časovou jednotku, která spolu s počtem tmelek v aparátu určuje velikost produkce stroje.

Ve fázi $B_1 - D_2$ dochází k přetmelení jednostranně vybroušeného a vyleštěného kamene z tmelky 1 na tmelku 2. Tento technologický děj se uskutečňuje bez jakýchkoliv pomocných zařízení, kámen je "předán" na protilehlou tmelku vlivem nestejných pevností tmelu v důsledku rozdílných teplot tmelek.



$$\Delta\tau < \tau_{t_1=t_2}$$

$$\Delta\tau > \tau_{t_1=t_2}$$

Obr. 3.3. Odvození první podmínky k určení kroku stroje

Pro teoretický rozbor jsou teploty tmelek ve fázi přetmelení zakresleny na (obr. 3.3.), kde průsečík teplot tmelky 1 a 2 rozděluje děj na interval

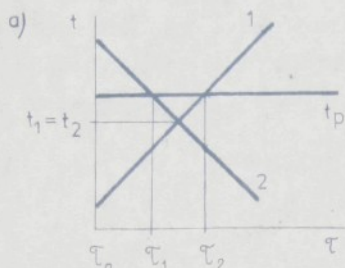
$$\tau < \tau_{t_1=t_2}$$

a

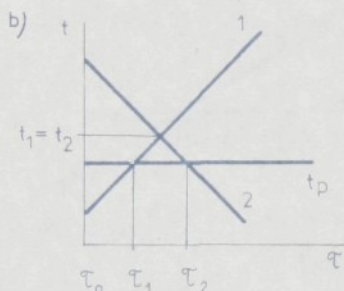
$$\tau > \tau_{t_1=t_2}$$

Při $\tau < \tau_{t_1=t_2}$ dojde při oddálení tmelek k tomu, že jednostranně vybroušený kámen zůstane spojen s původní tmelkou 1 a k přetmelení nedojde. Je to děj nežádoucí.

Při $\tau > \tau_{t_1=t_2}$ dojde k přetmelení. První podmínkou tedy je, že krok stroje $\Delta \tau > \tau_{t_1=t_2}$



časový interval	spojení kamene s tmelkou 1	spojení kamene s tmelkou 2
$\tau_0 - \tau_1$	pevné	plastic-ké
$\tau_1 - \tau_2$	pevné	pevné
$> \tau_2$	plastic-ké	pevné



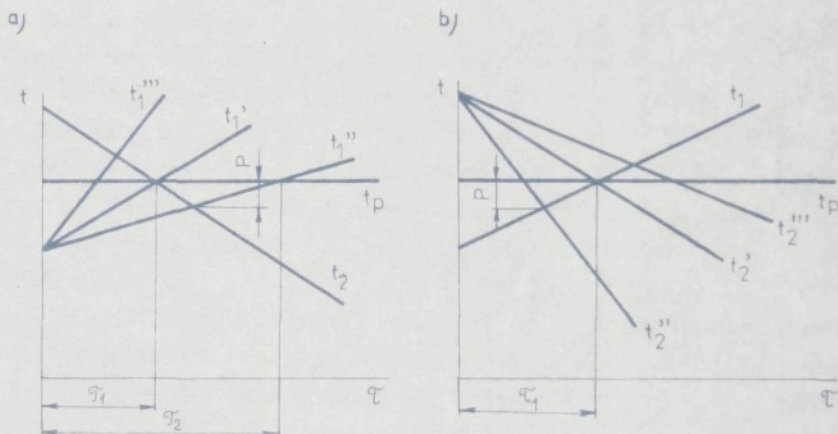
$\tau_0 - \tau_1$	pevné	plastic-ké
$\tau_1 - \tau_2$	plastic-ké	plastic-ké
$> \tau_2$	plastic-ké	pevné

Obr. 3.4. Odvození druhé podmínky k určení kroku stroje.

Na (obr. 3.4.) jsou teploty tmelek doplněny o teplotu t_p , která představuje teplotu, při které tmel z pevného skupenství přechází do plastického, případně tekutého stavu. Spolu s nákresem je proveden rozbor pevnosti přetmelení k oběma tmelkám. Podle (obr. 3.4a.) dochází při přetmelení

vždy k pevnému uchycení kamene alespoň k jedné tmelce, což je stav žádoucí.

Podle (obr. 3.4b.) je v časovém úseku $\tau_2 - \tilde{\tau}_1$ uchycení kamene oboustranně plastické, při kterém může dojít k "plavání" kamene a změně jeho polohy vůči tmelkám. Důsledkem toho je, že vybroušенý kámen nemá osy souměrnosti jedné a druhé strany totožné, což je stav, ke kterému v praxi sice dochází, ale je zcela nežádoucí. Z toho vyplývá druhá podmínka pro krok stroje $\Delta \tau > \tau_2$, a průsečík teplot $t_1 = t_2 < t_p$.



Obr. 3.5. Vliv rychlosti ohřevu a ochlazování tmelek na rychlost přetmelení - určení kroku stroje

Spolu s dříve uvedeným požadavkem na maximální zkrácení kroku stroje vyplývá podle (obr. 3.5a.), že k dané rychlosti ochlazování tmelky 2, podle křivky t_2 je maximální rychlost ohřevu tmelky 1 daná křivkou t_1' . Při poma-

lejším ohřevu podle křivky t_1'' dochází k prodloužení kroku stroje z hodnoty $\Delta T > T_1$ na $\Delta T > T_2$ a přetmelení se uskuteční v požadované kvalitě. Při rychlejším ohřevu podle křivky t_1''' dochází k nesplnění druhé podmínky, děj je tudíž nežádoucí. Z (obr. 3.5b.) vyplývá, že k dané rychlosti ohřevu tmelky 1, podle křivky t_1 , je minimální rychlost ochlazování tmelky 2 daná křivkou t_2' . Při rychlejším ochlazování podle křivky t_2'' zůstává krok stroje $\Delta T > T_1$ nezměněn, neboť by nemělo docházet k přetmelení při oboustranně pevně uchyceném kameniu. Při pomalejším ochlazování podle křivky t_2''' rovněž dochází k nesplnění druhé podmínky správného přetmelení.

Hodnota P představuje jakousi míru bezpečnosti, že kámen je v každém časovém okamžiku pevně přitmelen. Z uvedeného vyplývá důležitost znalosti teplotních poměrů jak při ohřevu, tak při ochlazování tmelek ve vztahu k používaným tmelům. V této souvislosti je nutno poukázat na metodicky ne zcela správný přístup u práce /18/, kde autoři bez zjištění a tím i respektování fyzikálních vztahů hodnotili nové složení tmelů za použití tradičních vstupů tmelicích operací.

Často diskutovaným problémem je poloha os obou tmelek a směr přetmelování. Používané jsou dva základní způsoby :

- 1) svislá poloha tmelek
- 2) vodorovná poloha tmelek

U svislé polohy tmelek dochází buď k přetmelování zdola nahoru, nebo shora dolů. V práci /19/ je proveden výčet důsledků volby jednotlivých uspořádání a v příslušném závěru je doporučení vertikální polohy přetmelování, neboť při vodorovném přetmelování může podle uvedené práce dojít před úplným vychladnutím tmelu k vychýlení kamenů. S tímto lze souhlasit pouze u ručních operací, kde lze připustit technologický proces za určitého rizika, jehož únosná velikost je neustále kontrolována a minimalizována obsluhou. U automatických strojů, pracujících bez stoprocentní

kontroly všech dějů (neexistuje stroj s úplnou kontrolou všech dějů) je nutno nekontrolovaný děj zajistit dostatečnou mírou jistoty, že proběhne s žádoucími výsledky. V procesu přetmelení je touto jistotou míra P podle (obr. 3.5.), kdy ve vztahu k (obr. 3.4a.) bude v každém časovém okamžiku kámen pevně přitmelen k jedné nebo druhé tmelce. Tím odpadne hlavní důvod, pro který nebyl horizontální směr doporučován a vystupují do popředí výhody :

- 1) horizontální stroj
- 2) méně tmele ulpívajícího na kamenu
- 3) vyloučení přirozené konvekce zvyšující teplotu aparátu

K poslednímu bodu je třeba několik vysvětlujících poznámek . Ohřev tmelek je zvláště u velkých kamenů energeticky značně náročný. Je proto potřeba podřídit děje více tomuto hledisku, neboť dochází k nežádoucímu ohřevu jak aparátů, tak celé konstrukce stroje. Lidskému oku je viditelný pouze malý úsek teplotních polí vytvářejících se při tmelících operacích. Tímto úsekem je plamen hořáku. Co však následuje dále je možno přibližně vyhodnotit pomocí teorie přirozené konvekce, nebo tok energie zviditelnit, jak je to provedeno v (kap. 4.4.4.). Nevýhoda vertikální polohy vlivem zasažení aparátu proudem směsi spalín a vzduchu je zřejmá.

3.1.2. Teplota tmelky jako výsledek fyzikálních procesů

V předchozí kapitule byl zdůrazněn požadavek znalosti teploty tmelky v závislosti na poloze a času. Obsahem této kapitoly je problematika, jakými prostředky předem požadovanou teplotu dosáhnout, a které proměnné veličiny (vstupy) celý děj ovlivňují. V této kapitole autor spatřuje těžiště své práce. Z hlediska termokinetiky se jedná v každé fázi

operace o nestacionární sdílení tepla, probíhající ve velmi krátkých časech ($10^{-1} - 10^2 \text{ sec.}$).

V oboru výroby strojně broušených kamenů byla ohřevu tmelek věnována značná pozornost / 17,20/. V této práci je uvedena a prověřována celá řada možných způsobů ohřevu s vyhodnocením vhodnosti pro realizaci automatických tmelicích strojů. Na základě rozhodovací analýzy bylo dohodnuto řešit ohřev pomocí trubkového hořáku spalujícího svítiplyn, případně zemní plyn.

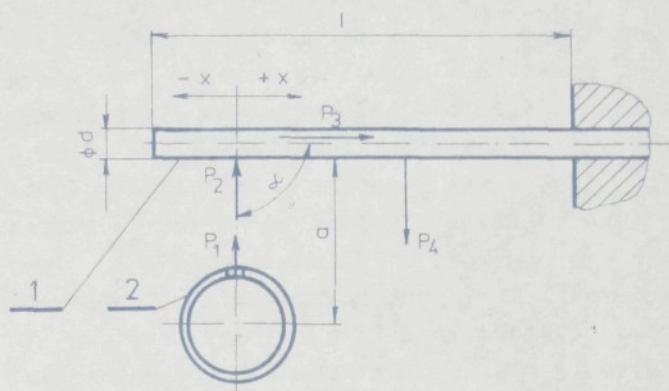
Výchozí údaje známé před začátkem této práce jsou následující : ohřev tmelek je prováděn trubkovým hořákem, skládajícím se ze směšovače plynu a primárního vzduchu a hořákové tenkostěnné trubky kruhového nebo obdélníkového průřezu. Výtokové trysky jsou vrtány v řadě, kolmo na podélnou osu hořáku, s roztečí odpovídající zpravidla rozteči tmelek příslušného aparátu. U větších sortimentů je na jednu rozteč výtokových trysek několik. Hořák se zapíná cyklicky ve sledu pracovních operací. Zapalování se provádí trvale hořícím plamenem. Seřizování výkonu hořáku i vzájemného poměru plynu a vzduchu je ruční, podle vizuální kontroly obsluhy. Vrtání trysek 1 - 1,5 mm. Vlastní problematikou sdílení tepla mezi plamenem a tmelkou a vedením tepla v tmelce se zatím nikdo obšírněji nezabýval.

Na (obr. 3.6.) je schematický náčrtek tmelky 1 ohříváné plynovým trubkovým hořákem 2. Kótami značené hodnoty lze spolu s výkonem a seřizením hořáku, teplotou a materiálem tmelek považovat za proměnné veličiny tmelicí operace. Ohřev tmelky zahrnuje přestup tepla mezi plamenem a tmelkou, přičemž vztah mezi výkonem hořáku P_1 a tmelkou využitým výkonem P_2 lze nazvat účinností sdílení tepla mezi plamenem a povrchem tmelky a vyjádřit vztahem

$$\eta = \frac{P_1 - P_z}{P_1} = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.1)$$

- kde P_z představuje ztracený výkon do okolí. Naměřené

hodnoty jsou uvedeny v (kep. 4.1.).



Obr. 3.6. Ohřev tmelky

Dále se do ohřevu zahrnuje sdílení tepla kondukcí (vedením) uvnitř tmelky a současné ochlazování konvekcí (prouděním) a radiací (sáláním) z neohřívaného povrchu do okolí. Konduktce je v (obr. 3.6) označena P_3 a tepelné ztráty konvekcí a sáláním P_4 a platí

$$P_2 = P_a + P_3 + P_4 \quad (3.2)$$

- kde P_a je výkon využitý k ohřevu funkční části tmelky. Se zahrnutím rovnice (rov. 3.1) platí

$$P_a = \eta P_1 - P_3 - P_4 \quad (3.3)$$

nebo obráceně

$$P_1 = (P_a + P_3 + P_4) \frac{1}{\eta} \quad (3.4)$$

Vyčíslením tohoto vztahu se získá potřebný výkon hořákové trysky vztažený na jednu tmelku. Vzhledem k předešlému lze učinit závěr, že sdílení tepla při ohřevu tmelky lze rozdělit na vnější a vnitřní sdílení.

Oblastí vnějšího sdílení se rozumí jednak výměna tepla mezi žhavými spaliny a povrchem tmelky, jednak výměna tepla mezi povrchem tmelky a okolním vzduchem. Určující vliv zde mají jevy aerodynamiky, palin a vzduchu, komplex fyzikálně chemických jevů, spojených se spalováním paliva a konečně technologické zásahy spojené s čistotou teplosměnného povrchu. Tyto proměnné spolu s ostatními znesnadňují matematickou formulaci ohřevu materiálu.

Oblastí vnitřního sdílení tepla je vedení tepla uvnitř ohřívajícího pevného materiálu. Zde mají určující vliv tepelně fyzikální vlastnosti (c, λ, ρ), velikost tělesa, způsob a intenzita ohřevu.

Obě uvedené oblasti přes rozdílný charakter a rozdílnost určujících veličin mají mezi sebou úzký vztah daný t.zv. Biotovým kriteriem (číslem) :

$$Bi = \frac{\alpha \cdot b}{\lambda} \quad (3.5)$$

kde α je celkový součinitel vnějšího přestupu tepla
/ W m⁻² K⁻¹/

λ - tepelná vodivost ohřívajícího materiálu / W m⁻¹ K⁻¹/

b - charakteristický rozměr /m/

Biotovo kritérium je využíváno v současné teorii ohřevu a ochlazování při rozlišování těles na t.zv. "tenká tělesa" a "tlustá tělesa" se zřetelem nejen k velikosti těles, ale k teplotním spádům v průřezu ohřívajícího nebo ochlazovaného předmětu. V dalším bude používána pouze formulace ohřev, neboť ochlazování se řídí stejnými zákony,

pouze děj probíhá v opačném smyslu. U tenkých těles probíhá ohřev rovnoměrně po celém průřezu, takže teplotní spád po průřezu tělesa je nepatrný a nemusí se při výpočtu respektovat. Ve výpočtech ohřevu tenkého tělesa je rozhodující vnější přestup tepla. Ohřev tlustých těles je doprovázen menším nebo větším teplotním spádem mezi povrchem a středem ohřívajícího tělesa. Při výpočtech takových těles je nutno uvažovat nejen vnější, nýbrž i vnitřní sdílení tepla. Teplotní rozdíl v ohřívání tělesa není dán pouze tloušťkou ohřívajícího tělesa, ale i jeho tepelnou vodivostí a rychlostí ohřevu. Těleso velkých rozměrů se tedy může při pomalém ohřevu chovat jako tenké a naopak těleso malých rozměrů při značných ohřívacích rychlostech jako těleso tlusté.

Pro ohřev kovů doporučuje G.P. Ivancov / 34 / rozlišovat tělesa podle Bi následovně :

při $Bi \leq 0,25$ je nutno těleso považovat za tenké

při $Bi \geq 0,5$ se těleso chová jako tlusté

při $0,25 < Bi < 0,5$ je těleso v oblasti přechodné, v níž se tělesa při přesných výpočtech považují za tlustá, při přibližných výpočtech za tenká.

Teoretický výpočet ohřevu tenkého tělesa nacházejícího se v prostředí s konstantní teplotou vyjadřuje rovnost mezi vnějším příkonem energie a změnou vnitřní energie tenkého tělesa:

$$q \cdot S \cdot d\tau = m \cdot c \cdot dt \quad (3.6.)$$

kde q je měrný tepelný tok / Wm^{-2} /

S - teplosměnná plocha / m^2 /

$d\tau$ - čas / s /

m - hmotnost ohřívajícího tělesa / kg /

c - měrné teplo tělesa / $J kg^{-1} K^{-1}$ /

dt - teplotní rozdíl / K /

Za použití Newtonova zákona přestupu tepla dostaneme řešení rovnice (rov. 3.6.) buď jako určení potřebné doby

ohřevu τ , je-li dána konečná teplota ohřívaného materiálu, nebo naopak konečnou teplotu kovu, je-li známa doba ohřevu. Doba ohřevu je tedy

$$\tau = \frac{b \cdot \rho \cdot c}{k \cdot \alpha} \ln \frac{t_o - t_p}{t_o - t_k} \quad /s/ \quad (3.7)$$

Teplota tělesa ke konci ohřevu

$$t_k = t_o - (t_o - t_p) \exp \left/ - \frac{k \alpha \tau}{b \cdot \rho \cdot c} \right/ \quad (3.8) \\ /^{\circ}\text{C}/$$

kde t_o je teplota okolí

t_p - počáteční teplota ohřívaného tělesa

t_k - konečná teplota ohřívaného tělesa

b - výpočtová tloušťka ohřívaného tělesa

ρ - měrná hmotnost ohřívaného tělesa

k - součinitel tvaru tělesa, zachycující poměr hmotnosti ohřívaného kovu k jeho povrchové teplosměnné ploše

$$\text{platí } \frac{m}{S} = \frac{b \cdot \rho}{k} \text{ pro válec po dosazení } \frac{m}{S} = \frac{r \cdot \rho}{2} \quad (3.9)$$

Teoretický výpočet ohřevu tlustých těles spočívá v řešení Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla pro směr x

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (3.10)$$

Šíří-li se teplo i v osách y a z , pak výsledná trojrozměrná rovnice vedení tepla má tvar

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (3.11)$$

Zavedením vztahu

$$\frac{\lambda}{c \cdot \rho} = a \quad (3.12)$$

a diferenciálního Laplaceova operátoru dostává rovnice zkrácený tvar :

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t \quad (3.13)$$

Ve válcových souřadnicích má po zavedení

$$x = r \cos \varphi$$

$$y = r \sin \varphi$$

rovnice tvar

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (3.14)$$

Pro válec o nekonečné délce při symetrickém rozdělení teplotního pole se rovnice vedení tepla zjednoduší na

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (3.15)$$

Existuje řada metod pro řešení Fourierovy rovnice vedení tepla. Jejich výčet je podrobněji uveden v knize H.S. Carslaw a J.C. Jaeger "Conduction of Heat in Solids" (ruský překlad 1964) / 22 /. Pro rychlé řešení je v praxi vhodné použít výpočtových diagramů, umožňujících výpočet hledané teploty těles základního tvaru (deska, válec, koule, poloohraničené těleso) i těles vzniklých jejich vzájemným průnikem. Diagramy jsou zpracovány na př. v literatuře / 11, 12, 13, 26 /. Aby řešení rovnice vedení tepla bylo jednoznačné, je nutno stanovit podmínky jednoznačnosti řešení, které závisí na :

- a) geometrickém tvaru tělesa
- b) okrajových podmínkách
- c) intenzitě a rozložení tepelných zdrojů
- d) tepelně technické charakteristice tělesa

Jak bylo uvedeno, jsou výpočtové diagramy sestrojeny pro čtyři základní t v a r y t ě l e s . Jsou využitelné pro dalších sedm geometrických tvarů těles vzniklých kolmým průnikem základních tvarů. Při složitějších případech ohřevu lze možností řešení pomocí diagramů rozšířit použitím principu elementární, nebo kombinované superposice / 26 /.

O k r a j o v é p o d m í n k y zahrnují t. zv. podmínku počáteční a povrchovou. Počáteční podmínka charakterizuje teplotní pole v tělese v libovolný okamžik, na př. na počátku ohřevu. Nejjednodušší případ nastává, má-li těleso před ohřevem ve všech bodech stejnou teplotu. Povrchová podmínka je charakterizována tepelnými podmínkami na povrchu tělesa. Obvykle se v teorii sdílení rozlišují čtyři druhy povrchových podmínek :

- a) Podmínka I. druhu, při níž je dána povrchová teplota tělesa jako funkce souřadnic a času.
 - b) Podmínka II. druhu, při níž je dána intenzita vnějšího tepelného toku jako funkce času.
- Z Fourierova zákona plyne

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=+0} = q \quad (3.16)$$

Označení $x = +0$ značí, že teplotní gradient se vztahuje k bodu tělesa, který je v blízkosti povrchu tělesa.

c) Podmínka III. druhu, při níž je známa teplota prostředí, které obklopuje těleso, a je dán matematický vztah, zachycující přestup tepla mezi prostředím a povrchem tělesa. Nejčastěji je přestup tepla z prostředí na

povrch tělesa vyjádřen vztahem :

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=+0} = \alpha (t_k - t_{x=+0}) \quad (3.17)$$

kde t_k je teplota obklopujícího prostředí.

- d) Podmínka IV. druhu, při níž je sledované těleso v těsném styku s druhým tělesem s jinými fyzikálními vlastnostmi. Dotyk na povrchu obou těles musí být dokonalý, aby teplota na styku byla stejná

$$t_{/x=+0} = t_{/x=-0}$$

Bilanční rovnice na hranici těles má tvar

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=+0} = -\lambda' \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=-0} \quad (3.18)$$

Uvedené rovnice charakterizující jednotlivé povrchové podmínky mají stejnou levou stranu, která charakterizuje intenzitu tepelného toku uvnitř tělesa. V pravých stranách rovnic je matematicky zachycen přestup tepla z vnějšku na povrch tělesa.

T e p e l n é z d r o j e jsou charakterizovány sedmi znaky, podle kterých je dělíme do následujících skupin :

- a) zdroje o dané teplotě nebo dané intenzitě tepelného toku
- b) zdroje kladné a záporné
- c) zdroje bodové, přímkové, plošné a objemové
- d) zdroje vnitřní a vnější
- e) zdroje s okamžitým nebo nepřetržitým působením
- f) zdroje konstantní a časově proměnné
- g) zdroje stabilní nebo pohyblivé

Tepelně technická charakteristika materiálu tělesa je dána fyzikálními vlastnostmi materiálu. Mezi nejdůležitější patří :

λ - tepelná vodivost / $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ /

c - měrné teplo / $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ /

ρ - měrná hmotnost / kg m^{-3} /

$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ - součinitel teplotní vodivosti / $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ /

$f = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$ - součinitel tepelné setrvačnosti
/ $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-0,5} \text{K}^{-1}$ /

3.1.3. Teoretický výpočet teploty tmelky

Metodika výpočtu teploty každého tělesa závisí jednak na charakteru ohřívajícího tělesa, zda je tenké či tlusté, jednak na okrajových podmínkách daných jak vlastním tělesem, tak tepelným zdrojem. Pro řešení diferenciální rovnice nestacionárního sdílení tepla je nutno uvedené podmínky přesně specifikovat. Zároveň však je účelné provést maximální zjednodušení úlohy, aby vůbec tato byla početně řešitelná. Zpravidla je třeba najít kompromis tak, aby výsledek byl dostatečně přesný. Neméně důležité je rozhodnout předem o tom, co má být výsledkem teoretického řešení a tomu podřídít teoretický výpočet. V této práci je kladen zvýšený důraz na poznání fyzikálních dějů a vztahů při ohřevu tmelky. Řešení tudíž je prováděno tak, aby byly získány údaje o vlivu rozhodujících proměnných veličin tmelicích operací, t.j. vlivu výkonu hořáku a vlivu konstrukce a materiálu tmelky. Hodnoty teplotních polí a průběh teploty tmelky v závislosti na čase jsou pouze prostředkem k

poznání obecnějších zákonitostí ohřevu. Je proto v práci provedeno několik zjednodušení, která však v rámci uvedených okrajových podmínek λ (teplota, čas, materiál a průměr tmelky) nevnesou do teoretického řešení podstatnější chybu. Z hlediska teorie sdílení tepla je nutno tmelku hodnotit jako těleso složitého tvaru, jehož teplotní pole lze řešit s využitím diagramů řešení Fourierovy rovnice jako kolmý průnik poloohraničeného tělesa a nekonečně dlouhého válce, případně jako kolmý průnik nekonečné rovinné desky s nekonečně dlouhým válcem. Matematicky je řešení součinem teplotních polí uvedených dvojic jednoduchých těles / 26 /. S použitím první dvojice základních tvarů obdržíme řešení pro poloohraničený válec, s použitím druhé dvojice obdržíme řešení pro válec o konečné délce. Ve vztahu ke konkrétním podmínkám, t.j. k uložení tmelky v aparátu, by při přesnějším teoretickém výpočtu bylo třeba pomocí metody superposice přiřadit záporný tepelný zdroj s proměnnou teplotou.

Ve vztahu k proměnným veličinám ohřevu (λ, c, ρ, q) je potřeba omezit počet možných řešení na taková, která jsou realizovatelná s ohledem na běžně používané konstrukční materiály a výkony hořáku. Záměrem této kapitoly je porovnat tmelku mosaznou, ocelovou a hliníkovou. I tato specifikace však dává v podstatě nekonečně mnoho řešení vyplývajících z toho, že součinitel tepelné vodivosti se v závislosti na složení uvedených kovů může měnit v poměrně širokém rozmezí. Čisté kovy mají větší tepelnou vodivost než slitiny, neboť mají delší volné dráhy elektronů a pravidelnější rozložení atomů v krystalické mřížce. U ocelí používaných v průmyslu se součinitel tepelné vodivosti pohybuje v rozmezí $12 - 64 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, u slitin kovů s mědí $20 - 150 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, u hliníkových slitin $140 - 250 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ / 26 /.

Pro teoretický výpočet jsou použity následující předpoklady :

- a) tmelku tvoří homogenní isotropní kov s tepelně fyzikálními vlastnostmi uvedenými v tabulce (tab. 3.2).

	Alternativa		
	I.	II.	III.
λ /Wm ⁻¹ K ⁻¹ /	25	64	210
c /J kg ⁻¹ K/	460	540	880
ρ /kg m ⁻³ /	$7,8 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^3$
α / m2 s ⁻¹ /	$6,96 \cdot 10^{-6}$	$13,94 \cdot 10^{-6}$	$88,38 \cdot 10^{-6}$
odpovídající materiál	ocel	mosaz	hliník

Tab. 3.2. Tepelně fyzikální vlastnosti použité pro teoretický výpočet

- b) počáteční podmínka je dána konstantní teplotou tmelky i aparátu
- c) povrchová podmínka je dána konstantním tepelným tokem poloohraničeného tělesa

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = q$$

s alternativami

$$q = 10^5; 2 \times 10^5; 5 \times 10^5; 10^6 \quad / \text{W m}^{-2} /$$

- d) v průřezu kolmém na osu tmelky má tmelka charakter tenkého tělesa, v průřezu rovnoběžném s osou tmelky má tmelka charakter tlustého tělesa

e) doba ohřevu je použita alternativně v rozsazích

$$\tau = 5; 10; 20; 40; 60; 120; \quad / \text{sec.} /$$

f) sledovaný rozsah průměrů tmelek

$$\phi d = 6 - 25 \text{ mm}$$

g) výpočet je proveden pouze pro jednorázový ohřev bez ochlazení

h) výpočet Fourierova čísla je počítán ze vztahů platících pro polohraničenou nekonečnou desku

$$Fo = \frac{a \tau}{x^2}$$

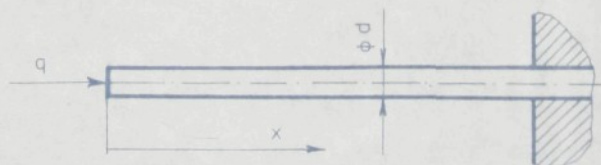
kde x / m / je vzdálenost od ohřívajícího povrchu

i) pro grafické znázornění teplotních závislostí jsou počítány teploty ve vzdálenostech od čelní plochy tmelky

$$x = 0; 4; 20; 40; 80; \quad / \text{mm} /$$

V (tab. 3.3) je vyčíslena hodnota Fourierova čísla pro jednotlivé konstrukční materiály.

Porovnání jednotlivých konstrukčních materiálů je provedeno pro ohřev podle zjednodušeného schématu uvedeného na (obr. 3.7).



Obr. 3.7. Schema ohřevu pro porovnání vlivu příkonu hořáku a materiálu tmelky na průběh teploty

x	Materiál	$\tau / s /$					
		5	10	20	40	60	120
4	ocel	2,17	4,35	8,7	17,4	26,1	52,2
	mosaz	4,36	8,71	17,42	35	52	104
	hliník	27,6	55	110	221	331	663
20	ocel	0,086	0,17	0,34	0,69	1,03	2,07
	mosaz	0,17	0,35	0,69	1,4	2,1	4,18
	hliník	1,1	2,2	4,4	8,8	13,2	26
40	ocel	0,022	0,043	0,086	0,17	0,26	0,52
	mosaz	0,05	0,09	0,17	0,34	0,52	1,04
	hliník	0,276	0,55	1,1	2,2	3,3	6,6
80	ocel	0,0059	0,011	0,022	0,043	0,064	0,13
	mosaz	0,01	0,022	0,043	0,087	0,13	0,26
	hliník	0,069	0,14	0,28	0,55	0,83	1,66

Tab. 3.3. Fourierovo číslo tmelek

Výpočet teploty povrchu ($t_{x=0,\tau}$) je proveden podle vztahu

$$t_{x=0,\tau} = t_p + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{q\sqrt{\tau}}{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}}$$

kde $t_{x=0,\tau}$ - teplota ohřívaného povrchu v závislosti na čase

t_p - počáteční teplota tmelky

Úpravou

$$t_{x=0,\tau} - t_p = \Delta t_{x=0,\tau} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{q\sqrt{\tau}}{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}}$$

získáme $\Delta t_{x=0,\tau}$ jako změnu teploty povrchu, čímž se zjednoduší výpočet a získá hodnota nezávislá na počáteční teplotě. V (tab. 3.4) je provedeno vyčíslení změny teploty povrchu jednotlivých tmelek v závislosti na tepelném toku a materiálu tmelky.

q /W m ⁻² /	Materiál	τ / s /					
		5	10	20	40	60	120
10 ⁵	ocel	26,6	37,7	53,3	75,4	92,3	130,5
	mosaz	14,8	21,0	29,7	42,0	51,4	72,7
	hliník	11,3	16,0	22,6	32,0	39,1	55,3
2.10 ⁵	ocel	53,0	75,4	107	151	185	261
	mosaz	29,6	42,0	59,4	84,0	102,8	145
	hliník	22,6	32,0	45,2	64,0	78,2	111
5.10 ⁵	ocel	133	188	266	377	461	652
	mosaz	74	105	148	210	257	363
	hliník	56,5	80	113	160	195	276
10 ⁶	ocel	266	377	533	754	923	1305
	mosaz	148	210	297	420	514	727
	hliník	113	160	226	320	391	553

Tab. 3.4. Změna teploty povrchu tmelky v závislosti na tepelném toku a materiálu tmelky

Výpočet teploty tmelky ve vzdálenosti $x > 0$ od ohřívaného povrchu je vyčíslen v (tab. 3.5) podle vztahu

$$t_{x,\tau} = t_p + \theta \cdot \frac{q \cdot x}{\lambda}$$

kde θ je bezrozměrný teplotní simplex získaný řešením Fourierovy rovnice nestacionárního vedení tepla na samočinném počítači / 26 /.

Úpravou

$$t_{x,\tau} - t_p = \Delta t_{x,\tau} = \theta \frac{q \cdot x}{\lambda}$$

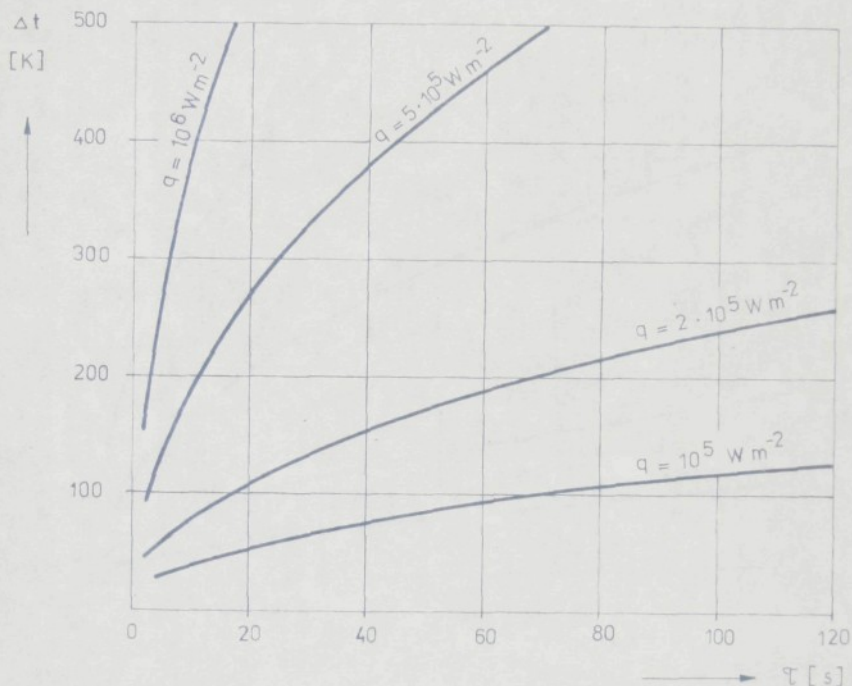
získáme $\Delta t_{x,\tau}$ jako změnu teploty ve vzdálenosti $x > 0$ od ohřívaného povrchu. V (tab. 3.5) je provedeno vyčíslení změny teploty jednotlivých tmelek v závislosti na vzdálenosti, příkonu a čase.

$\frac{\dot{q}}{Wm^{-2}} \frac{x}{mm}$		Materiál	$\tau [s]$					
			5	10	20	40	60	120
10^4	4	ocel	1,28	2,24	3,84	6,08	7,68	11,5
		mosaz	0,937	1,5	2,37	3,56	4,5	6,87
		hliník	0,93	1,41	2,09	3,04	3,61	5,32
	20	ocel	0	0,16	0,72	2,08	3,2	6,4
		mosaz	0	0,28	0,81	1,56	2,5	4,37
		hliník	0,38	0,76	1,42	2,28	3,02	4,75
	40	ocel	0	0	0	0,32	0,96	3,04
		mosaz	0	0	0,125	0,56	1,12	2,69
		hliník	0,114	0,361	0,817	1,58	2,28	3,8
	80	ocel	0	0	0	0	0,016	0,32
		mosaz	0	0	0	0	0,125	0,625
		hliník	0,0027	0,0038	0,23	0,76	1,29	2,29
$5 \cdot 10^4$	4	ocel	6,4	11,2	19,2	30,4	38,4	57,6
		mosaz	4,68	7,5	11,8	17,8	22,5	34,3
		hliník	4,65	7,05	10,4	15,2	18,0	26,6
	20	ocel	0,08	0,8	3,6	10,4	16	32
		mosaz	0,31	1,4	4,06	7,8	12,5	21,8
		hliník	1,9	3,8	7,1	11,4	15,1	23,7
	40	ocel	0	0	0,18	1,6	4,8	15,2
		mosaz	0	0,08	0,62	2,8	5,6	13,4
		hliník	0,57	1,8	4,1	7,9	11,4	19
	80	ocel	0	0	0	0	0,08	1,6
		mosaz	0	0	0	0,13	0,62	3,12
		hliník	0,013	0,19	11,5	38	64,5	115,0
10^5	4	ocel	12,8	22,4	38,4	60,8	76,8	115,2
		mosaz	9,37	15,0	23,7	35,6	45	68,7
		hliník	9,31	14,1	20,9	30,4	36,1	53,2
	20	ocel	0,168	1,6	7,2	20,8	32	64
		mosaz	0,625	2,81	8,12	15,6	25	43,7
		hliník	3,8	7,6	14,2	22,8	30,2	47,5

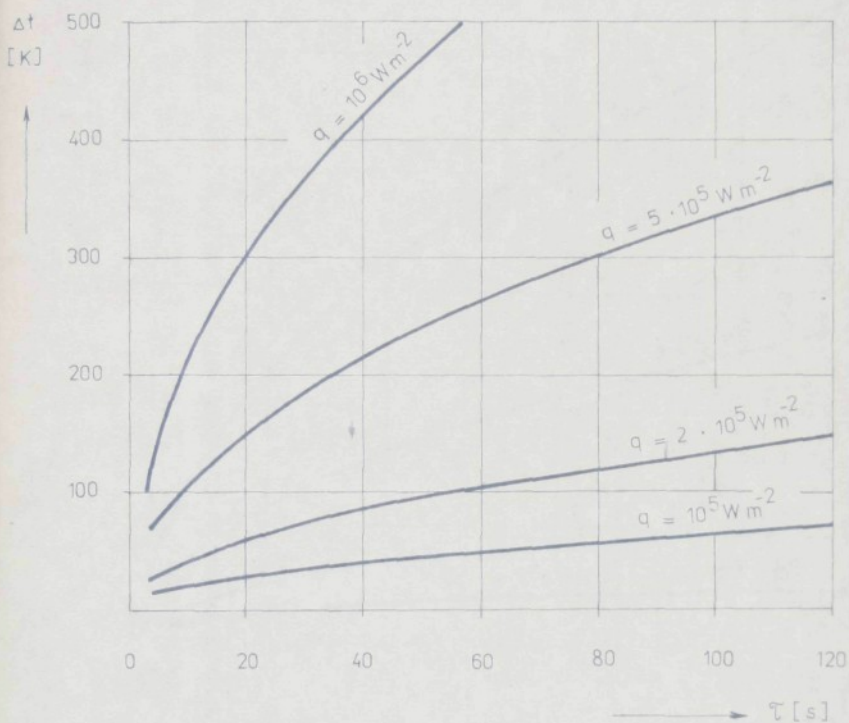
10^5	40	ocel	0	0	0,36	3,2	9,6	30,4
		mosaz	0	0,16	1,25	5,62	11,2	26,9
		hliník	1,14	3,61	8,17	15,8	22,8	38
	80	ocel	0	0	0	0	0,16	3,2
		mosaz	0	0	0	0,275	1,25	6,25
		hliník	0,027	0,37	2,3	7,6	12,9	22,9
$5 \cdot 10^5$	4	ocel	64	112	192	304	384	576
		mosaz	46,8	76	118,5	178	225	343
		hliník	46,6	70,5	104	152	180	266
	20	ocel	0,84	8	36	104	160	320
		mosaz	3,12	14	40,6	78	125	218
		hliník	19	38	71	114	151	237
	40	ocel	0	0,08	1,68	16	48	152
		mosaz	0,05	0,81	6,25	28,1	56	134
		hliník	5,7	18	40,8	79,0	114	190
	80	ocel	0	0	0	0	0,8	16
		mosaz	0	0	0,06	1,37	6,25	31,2
		hliník	0,13	1,9	11,5	38	64,5	114
10^6	4	ocel	128	224	384	608	768	1152
		mosaz	93,7	150	237	356	450	687
		hliník	93,1	141	209	304	361	532
	20	ocel	1,68	16	72	208	320	640
		mosaz	6,24	28,1	81,2	156	250	437
		hliník	38	76	142	228	302	475
	40	ocel	0	0,16	3,36	32	96	304
		mosaz	0,094	1,625	12,5	56,2	112	269
		hliník	11,4	36,1	81,7	158	228	380
	80	ocel	0	0	0	0	1,6	32
		mosaz	0	0	0,125	2,75	12,5	62,5
		hliník	0,27	3,8	23	76	129	229

Tab. 3.5. Změna teploty tmelky v závislosti na příkanu
hořáku a materiálu tmelky.

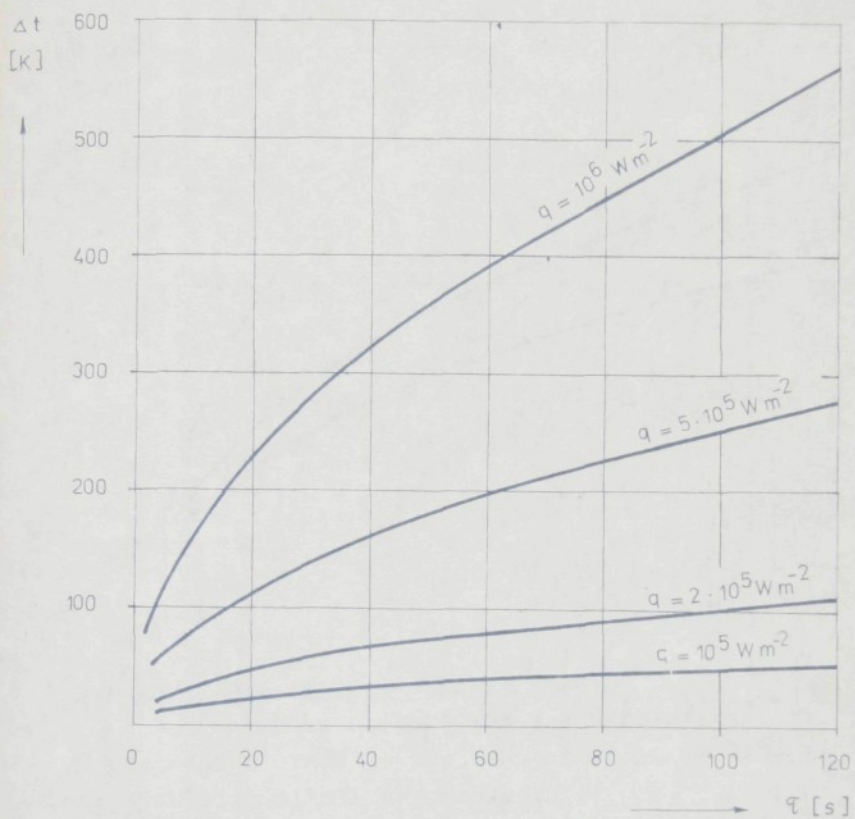
Vybrané číselné výsledky jsou zpracovány graficky na (obr. 3.8; 3.9; 3.10), kde je znázorněna změna teploty ohřívaného čela tmelky v závislosti na příkonu a čase.



Obr. 3.8. Změna teploty povrchu ocelové tmelky v závislosti na příkonu hořáku

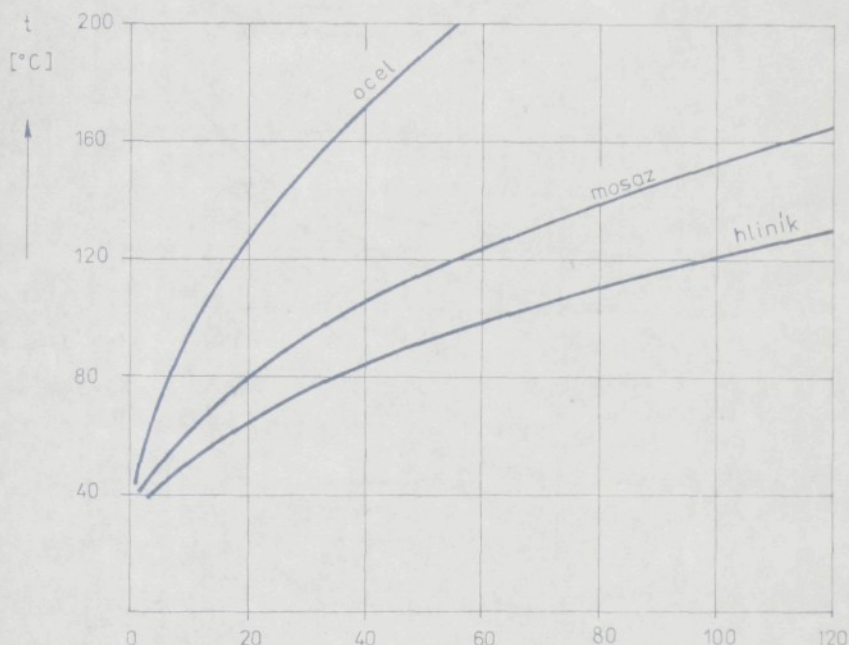


Obr. 3.9. Změna teploty povrchu mosazné tmelky v závislosti na příkonu hořáku



Obr. 3.10. Změna teploty povrchu hliníkové tmelky
v závislosti na příkonu hořáku

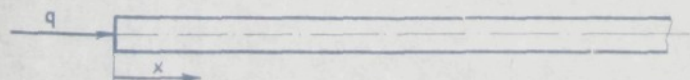
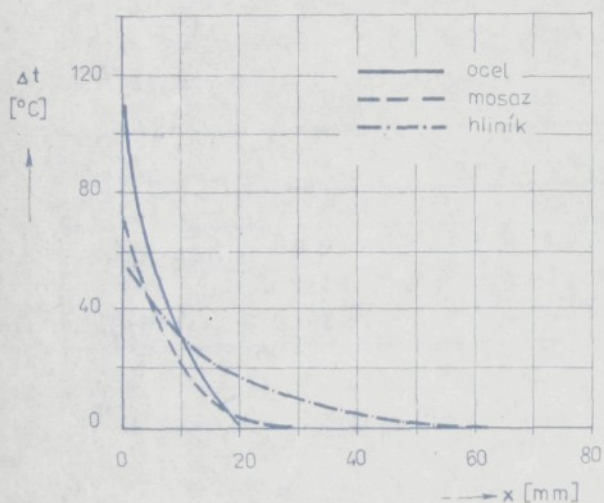
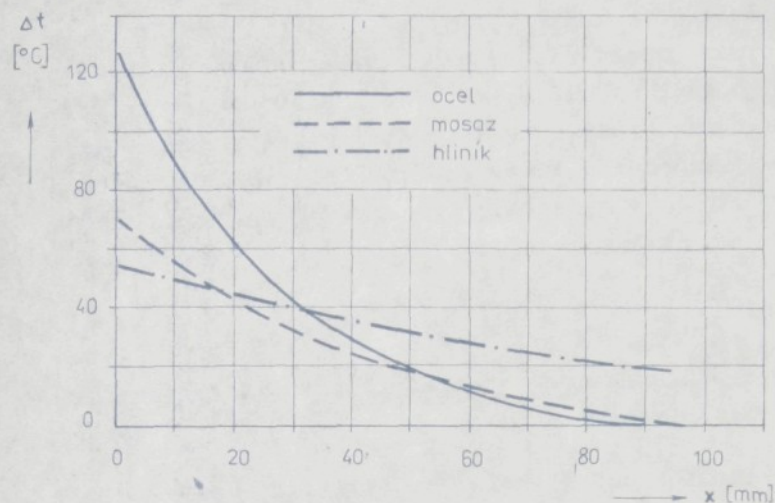
Porovnání jednotlivých materiálů tmelek je provedeno na (obr. 3.11) .



Obr.3.11. Porovnání rychlosti ohřevu τ [s]
povrchu ocelové, mosazné a hliníkové tmelky.

Z posledního grafu je zřejmé že ocel se na čele ohřívá nejrychleji, hliník nejpomaleji.

Kromě teploty čela tmelky je neméně důležitým faktorem tmelicích operací průběh teploty v podélné ose tmelky. Na (obr. 3.12) je grafické znázornění tohoto průběhu teploty v závislosti na příkonu. Pro čelo tmelky ($x = 0$) je, tak jako v předešlých grafech, teplota ocelové tmelky nejvyšší, ale v určité vzdálenosti, která závisí na příkonu hořáku, je teplota ocelové tmelky nejnižší a hliníkové nejvyšší. S ohledem na sdílení tepla vedením do aparátu odvede nejvíce tepla hliníková tmelka, nejméně ocelová tmelka. Výsledky dosud provedeného teoretického výpočtu



Obr. 3.12. Průběh změny teploty tmelky při ohřevu čelní plochy

ohřevu tmelek nebudou v této fázi dále diskutovány, poněvadž ohřev při skutečných tmelicích operacích se neprovádí z čela tmelky, ale z boku tmelky v určité vzdálenosti od čela (obr. 3.6). Proto jsou výpočty doplněny o další část, která vychází z řešení Fourierovy rovnice nestacionárního sdílení tepla nekonečnou deskou o konečné tloušťce. Ve vztahu k předešlým výpočtům musí platit, kromě již uvedených, další okrajová podmínka

$$t_{x=+0,\tau} = t_{x=-0,\tau} ,$$

vyplývající z rovnosti teploty povrchu polohraničeného tělesa $t_{x=+0,\tau}$ a teploty povrchu nekonečné desky $t_{x=-0,\tau}$.

V (tab. 3.6) je vyčíslena hodnota Fourierova čísla pro jednotlivé konstrukční materiály, v (tab. 3.7) jsou vyčísleny teploty ve vzdálenostech od ohřívaného průřezu $x = 0; - 7,5; - 15 \text{ mm}$.

Materiál	$\tau[\text{s}]$					
	5	10	20	40	60	120
ocel	0,153	0,307	0,613	1,23	1,84	3,7
mosaz	0,309	0,62	1,24	2,48	3,72	7,4
hliník	1,96	3,9	7,8	15,7	23,0	47,0

Tab. 3.6. Fourierovo číslo

Materiál	x / mm /	τ [s]		
		5	10	40
ocel	0	133	188	151
	- 7,5	38	86	107
	- 15	16	55	98
mosaz	0	74	105	84
	- 7,5	33	68	70
	- 15	20	52	64
hliník	0	56	80	64
	- 7,5	45	72	62
	- 15	41	69	61

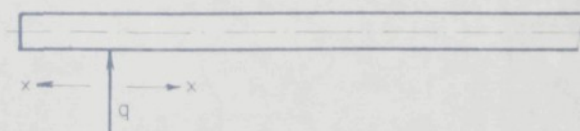
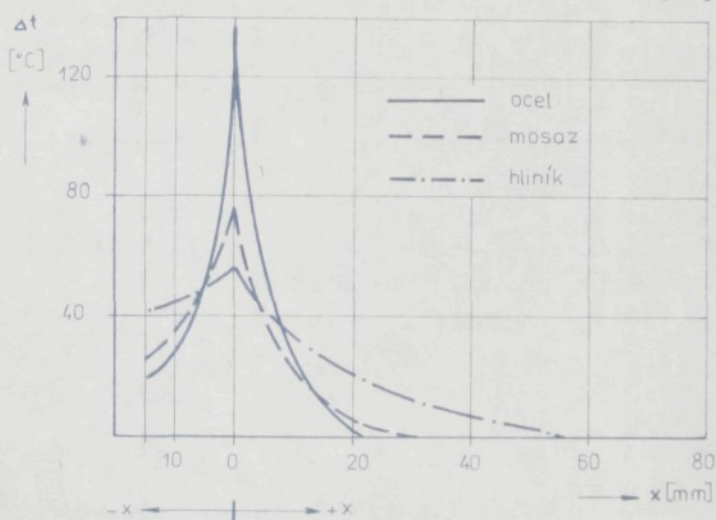
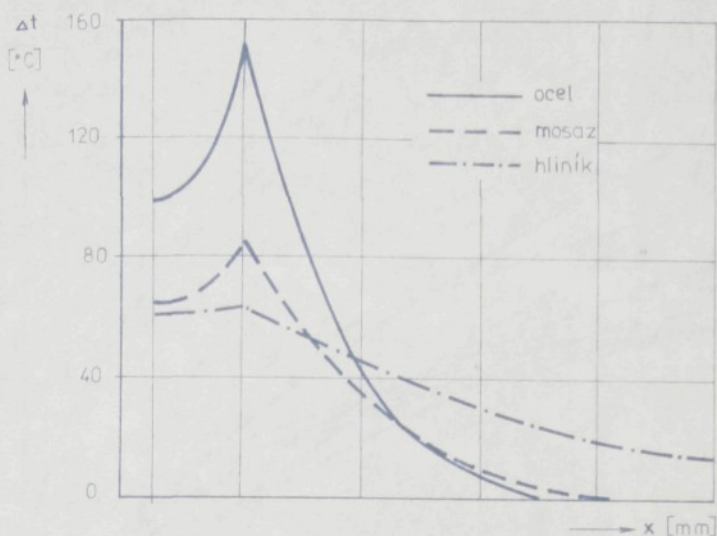
Tab. 3.7. Změna teploty tmelky v závislosti na příkonu hořáku a materiálu tmelky

Vybrané teoretické výpočty jsou znázorněny graficky na (obr. 3.13). Podle (obr. 3.13.a) platí stejné zákonitosti jako v předešlých odstavcích. Podle (obr. 3.13.b) však mohou nastat podmínky, kdy čelo ocelové tmelky je méně ohřáto, než čelo tmelky mosazné a hliníkové. Tyto podmínky nastávají u tmelek malých průměrů, kde tepelný tok q je relativně vysoký a ohřívací časy krátké. Vybrané výsledky početního řešení jsou znázorněny graficky na (obr. 3.14) pro tepelný tok $q = 10^6 \text{ W m}^{-2}$. Pro praktickou potřebu konstruktérů a technologů nelze přímo použít tepelný tok q jako samostatnou proměnnou veličinu, protože q je funkcí výkonu hořáku, účinnosti přestupu tepla a průměru tmelky. Velikost tepelného toku je ve vztahu k uvedeným proměnným veličinám vyhodnocena pomocí tepelné bilance ohřevu, kde musí současně platit vztahy mezi výkonem hořáku

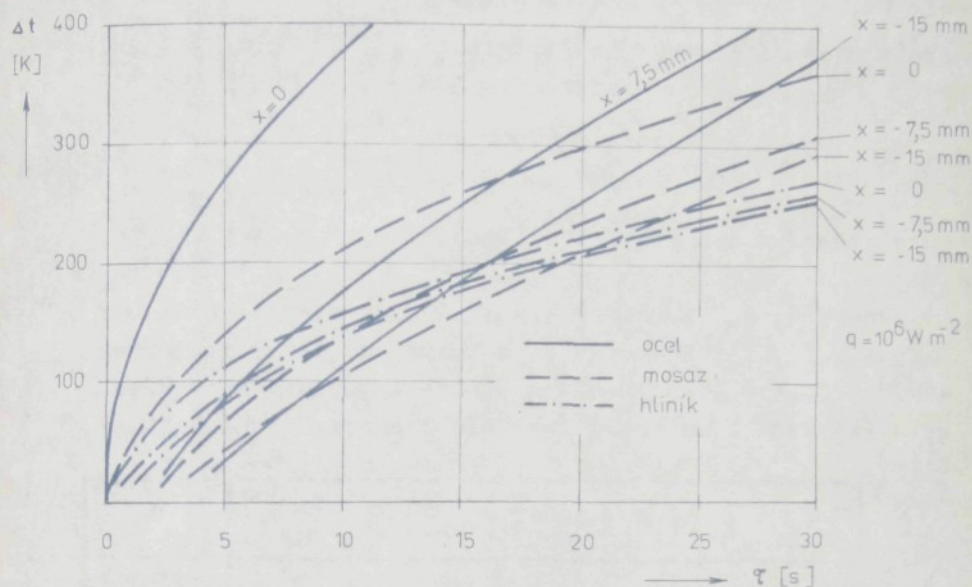
$$P_1 = V \cdot H, \quad (3.19)$$

užitečným výkonem (rov. 3.1)

$$P_2 = \eta P_1,$$



Obr. 3.13. Průběh změny teploty ocelové, mosazné a hliníkové tmelky v závislosti na výkonu hořáku.



Obr. 3.14. Změna teploty čela tmelky v závislosti na vzdálenosti místa ohřevu ($-x$) (viz. obr. 3.2)

přestupem tepla

$$P_2 = \alpha F_1 \Delta t_1, \quad (3.20)$$

akumulovaným výkonem (rov. 3.3)

$$P_a = \eta P_1 - P_3 - P_4$$

a tepelným tokem

$$q = \frac{P_2}{F_2} = \frac{\eta P_1}{F_2} \quad (3.21)$$

- kde $V / \text{m}^3 \text{s}^{-1} /$ - objemový průtok plynu
 $H / \text{J m}^{-3} /$ - výhřevnost plynu
 $\alpha / \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1} /$ - součinitel přestupu tepla mezi plamenem a tmelkou
 $F_1 / \text{m}^2 /$ - teplosměnná plocha
 $F_2 / \text{m}^2 /$ - průřez tmelky
 $\Delta t_1 / \text{K} /$ - rozdíl teplot plamene a tmelky

Z uvedených vztahů je v / tab. 3.8 / zpracována závislost tepelného toku q , výkonu hořáku a průměru tmelky. Ve výkonu hořáku je podle (obr. 4.3.) zahrnuta účinnost přestupu tepla mezi plamenem a tmelkou.

	Výkon hořáku / W /				
	50	100	200	300	400
ϕ tmelky / mm /	$q \cdot 10^{-5} \text{ W m}^{-2}$				
6	9,7	17,6	30,4	39,2	48,1
10	4,33	8,15	14,0	18,3	21,4
16	1,84	3,63	6,97	9,85	11,9
25	0,87	1,73	3,42	4,89	6,11

Tab. 3.8. Tepelný tok $q / \text{W m}^{-2} /$ v závislosti na ϕ tmelky a výkonu hořáku

3.2. Závěr teoretické části

Cílem teoretické části bylo určit základní fyzikální zákonitosti ohřevu tmelky trubkovým plynovým hořákem a specifikovat vliv rozhodujících proměnných veličin. Výsledek je shrnut do bodů, které jsou ve své podstatě výchozími údaji pro experimentální část práce a lze formulovat následující závěry :

1. Změna teploty čela tmelky je určována

- a) počátečním rozložením teploty tmelky
- b) výkonem hořáku
- c) dobou ohřevu
- d) účinností přestupu tepla mezi plamenem a tmelkou
- e) materiálem tmelky
- f) místem ohřevu tmelky

P o č á t e č n í r o z l o ž e n í t e p l o t y bylo pro zjednodušení a zkrácení výpočtů považováno za konstantní v celém průřezu tmelky. To ve skutečnosti odpovídá pouze fázi, kdy jsou ohřívány tmelky po broušení a leštění. Teoretický výpočet opakovaného ohřevu a ochlazování, tak jak probíhá v provozu by byl neúnosně časově náročný a nepřinesl by žádné další poznatky. Zvýšená pozornost však byla této problematice věnována v experimentální části práce.

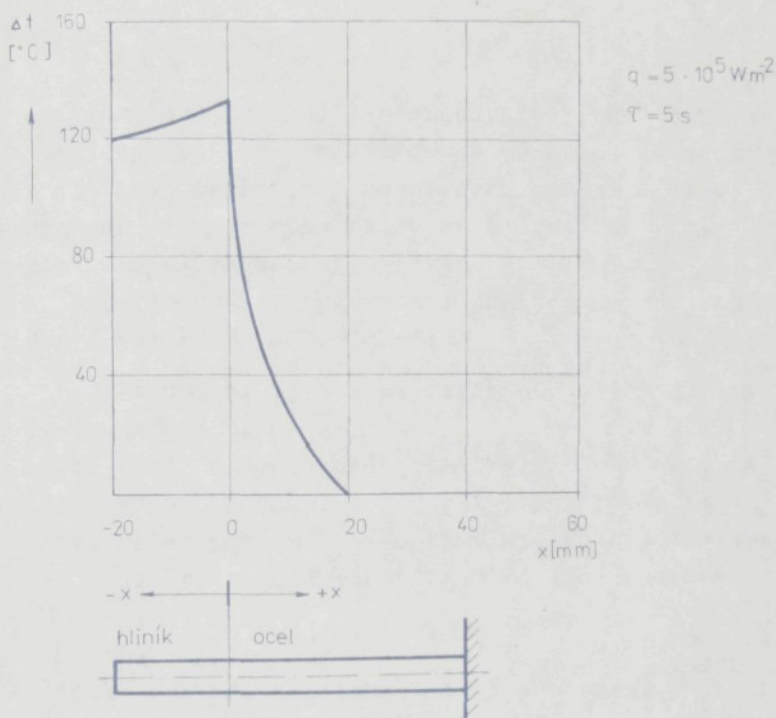
V ý k o n h o ř á k u , d o b a o h ř e v u a m í s t o o h ř e v u t m e l k y spolu úzce souvisí. Čím vyšší je výkon, tím kratší je doba ohřevu.

Důsledky z toho plynoucí nejsou zcela jednoznačné, bez specifikace dalších proměnných (materiál tmelky, vzdálenost ohřevu od čela tmelky). Při krátkém intenzivním ohřevu jsou tmelky všeobecně méně prohřátý směrem k aparátu, což je žádoucí, ale může dojít k místnímu přehřátí ($x \rightarrow 0$, obr. 3.2) u tmelky malého průměru, nebo z méně tepelně vodivého materiálu.

Účinnost přestupu tepla mezi plamenem a tmelkou byla v této kapitole pouze formulována, v experimentální části práce jsou vyhodnoceny vlivy působící na vyšší účinnosti.

Materiál tmelky má vedle intenzity ohřevu rozhodující vliv na vytváření teplotních polí v průřezu tmelky. Požadavky na tepelně fyzikální hodnoty tmelky jsou rozdílné podle místa tmelky. V místě funkční části t.j. mezi čelem tmelky a místem ohřevu je žádoucí materiál s vysokou hodnotou součinitele teplotní vodivosti $\frac{\alpha}{m^2 s^{-1}}$; v místě mezi ukotvením v aparátu a místem ohřevu je žádoucí materiál s nízkou hodnotou součinitele teplotní vodivosti. Při respektování pouze teplotních poměrů se jeví jako nejvýhodnější kombinace dvou materiálů podle (obr. 3.15), kde je tmelka tvořena kombinací hliníku a oceli. Vedle požadavku na účelné zvládnutí teplotních poměrů jsou neméně důležité otázky pevnosti tmelky, kluzného uložení v tělese aparátu, trvanlivosti tmelky ve vztahu k otěru při čištění, možnosti rekonstrukce stávajících aparátů, technologie výroby tmelek, chování tmelky při broušení a leštění a v neposlední řadě otázky spojené s tradicí daného výrobního odvětví. Novou tmelku je třeba navrhnout s respektováním všech předchozích hledisek. V (kap. 4.) - Experimentální měření je kromě určení teplotních poměrů na tmelkách tradiční konstrukce proveden návrh a ověření tmelek kombinovaných z různých kontrukčních materiálů. Rovněž experimen-

tální část práce je zaměřena zejména na teplotní problémy, i když předchozí výčet dalších požadavků na účelnou tmelku byl přiměřeně respektován.



Obr. 3.15. Průběh změny teploty tmelky složené ze dvou materiálů - hliník + ocel.

4. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.

Praktické ověření teoretických výpočtů a předpokladů je logickým pokračováním vědecko výzkumné činnosti. Má ověřit platnost teoreticky odvozených zákonitostí dějů a na vybraných prvcích konkretizovat teoretické výsledky jako základ pro návrh technologického zařízení.

Experimentální výzkum byl zaměřen na následující problémy a fyzikální závislosti:

- a) Stanovení optimální vzájemné polohy tmelky a hořáku.
- b) Ohřev a ochlazování tmelky v závislosti na výkonu hořáku, velikosti a materiálu tmelky.
- c) Orientační měření optimální teploty tmelky při rozhodujících fázích tmelicí operace.

4.1. Optimální poloha tmelky a hořáku.

Při použití pojmu "Optimalizace" je nutno přesně specifikovat proměnné veličiny, ke kterým je optimalizace vztahována. Při určení geometrického vztahu tmelky a hořáku je touto rozhodující veličinou účinnost přestupu tepla mezi plamenem a tmelkou, která je definována vztahem (rov. 3.1).

Z matematického hlediska lze účinnost definovat jako závislou proměnnou veličinu na více nezávisle proměnných veličinách. Mezi rozhodující nezávisle proměnné veličiny při sledování přestupu tepla patří výkon hořáku, vzdálenost hořáku od tmelky, vzájemná poloha osy tmelky a osy plamene a průměr tmelky.

4.1.1. Experimentální zařízení.

Pro sledování funkční závislosti nezávisle a závisle proměnných veličin bylo sestaveno zařízení podle (obr.4.1.), které umožňuje nastavení proměnných veličin v potřebném rozsahu.

Účinnost přestupu tepla je vyhodnocována za použití vztahu pro výkon hořáku (rov. 3.19.)

$$P_1 = V \cdot H ,$$

předaný výkon tmelce, měřený ze vztahu

$$P_2 = m \cdot c \cdot \Delta t , \quad (4.1)$$

kde je $m / \text{kg s}^{-1} /$ - průtočné množství vody

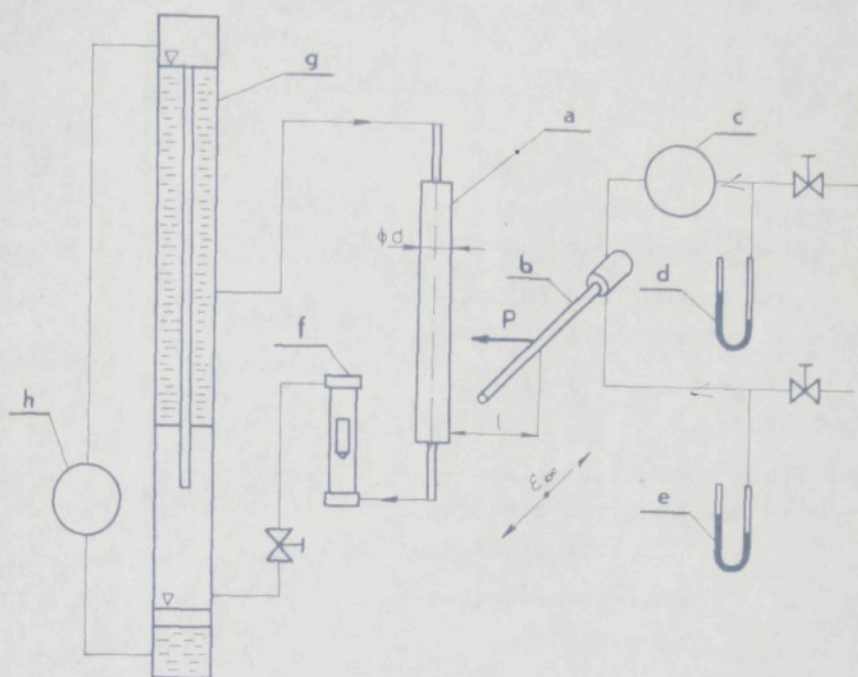
$c / \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1} /$ - měrné teplo vody

$\Delta t / \text{K} /$ - oteplení vody

Podle definice účinnosti platí

$$\eta = \frac{P_2 - P_z}{P_1} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta t}{V \cdot H} \quad (4.2)$$

Uvedená účinnost přestupu tepla mezi plamenem a tmelkou je z formálního hlediska nepřesná, neboť se částečně uplatňuje vedení tepla stěnou tmelky (vodou protékající trubka) a součinitel přestupu tepla mezi tmelkou a vodou.



Obr. 4.1. Schema zařízení pro měření účinnosti přestupu tepla

- a - tmelka
- b - trubkový plynový hořák
- c - laboratorní plynoměr
- d - manometr pro měření přetlaku plynu
- é - manometr pro měření přetlaku vzduchu
- f - rotametr pro měření průtoku vody
- g - zásobník vody s konstantní výškou hladiny
- h - vodní čerpadlo

Pro správnost měření je potřeba identifikovat možnou skutečnou chybu porovnáním vztahu pro prostup tepla,

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} S \Delta t \tau \quad (4.3)$$

kde α_1 / W m⁻² K⁻¹ / - součinitel přestupu tepla mezi plamenem a povrchem tmelky

s / m / - tloušťka teplosměnné trubky představující tmelku

λ / W m⁻¹ K⁻¹ / - součinitel tepelné vodivosti tmelky

α_2 / W m⁻² K⁻¹ / - součinitel přestupu tepla mezi vnitřním povrchem tmelky a protékající vodou

S / m² / - teplosměnná plocha

Δt / K / - rozdíl teploty plamene a vody

τ / s / - doba ohřevu

a vztahu pro přestup tepla

$$Q = \alpha_1 S \Delta t \tau \quad (4.4)$$

Za použití průměrných hodnot vedení a přestupu tepla

$$\alpha_1 = 10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha_2 = 1000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\lambda = 225 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

a konkrétních hodnot experimentu

$$s = \max. 1 \text{ mm}$$

dostaneme poměrnou chybu vyplývající z metody měření

$$\varepsilon = \frac{\alpha_1}{\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{8}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}} = \frac{10}{\frac{1}{10} + \frac{10^{-3}}{225} + \frac{1}{1000}} =$$

$$= 10 (0,1 + 0,00004 + 0,001) = 1,0104$$

t.j. 1%, což je chyba, která je ve vztahu k praktickému využití výsledku experimentu přijatelná.

4.1.2. Volba a rozsah proměnných veličin.

Závislost účinnosti přestupu tepla na vzdálenosti hořáku od tmelky, výkonu hořáku, vzájemné poloze osy tmelky a osy plamene a průměru tmelky determinuje volbu proměnných veličin.

Rozsah proměnných veličin je podřízen běžným provozním podmínkám. Pouze u průměru tmelek byly voleny hodnoty $\phi d \approx 6$ mm až do velikosti $\phi d = 30$ mm vzhledem k záměru výrobního podniku rozšířit výrobu velkých kamenů. Pojem výkon hořáku je výkon vztažený na jednu ohřívanou tmelku. V rámci experimentálního měření byl sledován rovněž vliv průměru trysky, ale nebyl zjištěn podstatnější vliv na účinnost přestupu.

4.1.3. Naměřené výsledky.

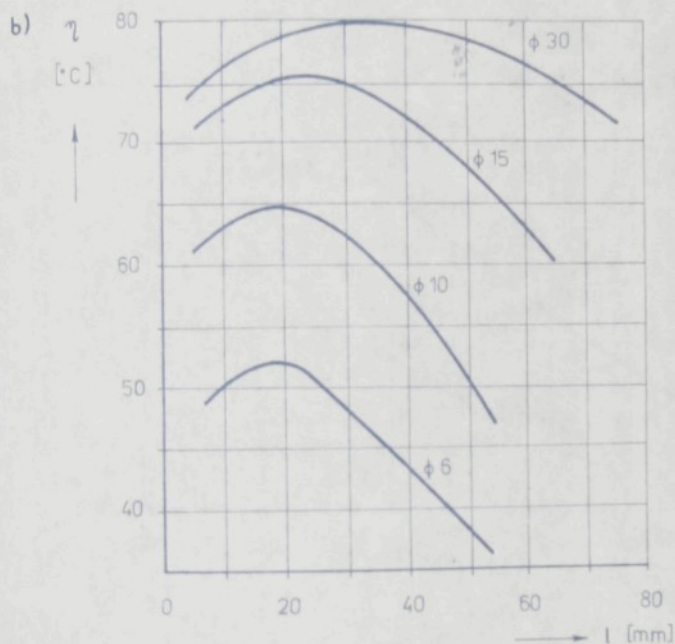
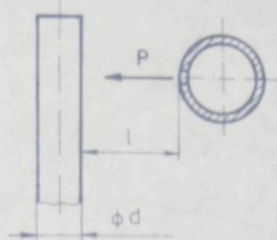
V diagramech jsou graficky znázorněny příslušné funkční závislosti. Jednotlivé křivky je třeba chápat jako nejpravděpodobnější hodnotu v rámci určitého spektra

hodnot, které byly získány opakovaným měřením s výslednou přesností absolutních hodnot cca $\pm 5\%$. Pro měření byla použita běžná laboratorní měřidla, jejichž podrobné údaje jsou uvedeny v příslušných protokolech z měření uložených na VŠST - KEZ.

Z naměřených a graficky zpracovaných výsledků je možno pro přestup tepla mezi plamenem a tmelkou formulovat následující závěry :

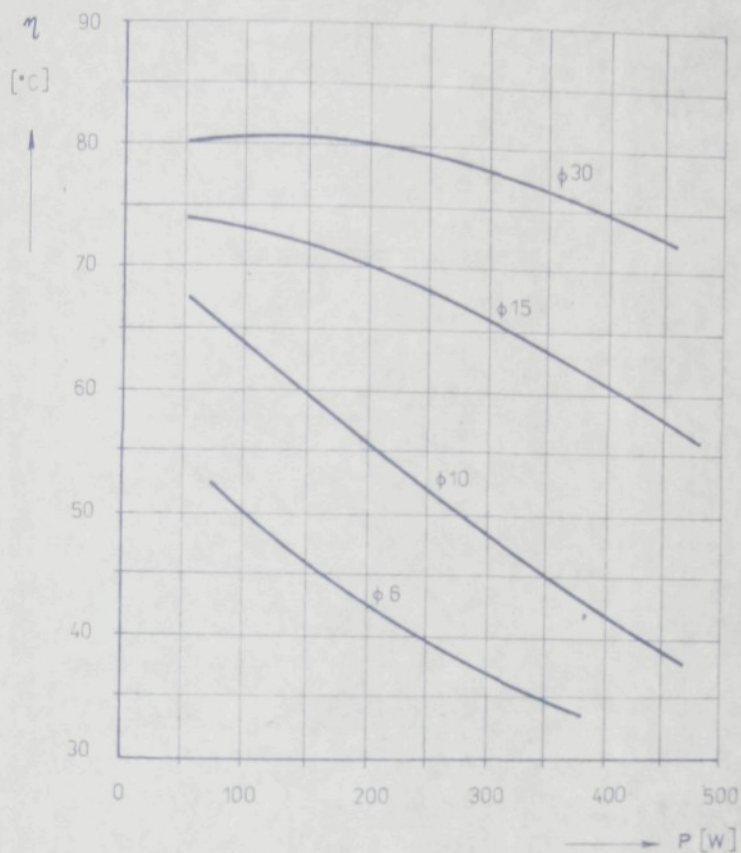
- 1) S rostoucím průměrem tmelky se účinnost přestupu tepla zvyšuje.
- 2) Existuje maximum účinnosti přestupu tepla jako funkce vzdálenosti hořáku.
- 3) S rostoucím průměrem tmelky se maximum účinnosti zvyšuje a stává se plošší.
- 4) S rostoucím výkonem hořáku účinnost přestupu tepla klesá.
- 5) Nejvyšší účinnost přestupu tepla je při uspořádání, kdy osa tmelky a osa plamene tvoří různoběžky na sebe kolmé; tvoří-li mimoběžky, klesá účinnost přestupu tepla; tvoří-li různoběžky s $\psi > 0$, existuje ploché maximum pro $\psi = 0 + 20^\circ$.

a)



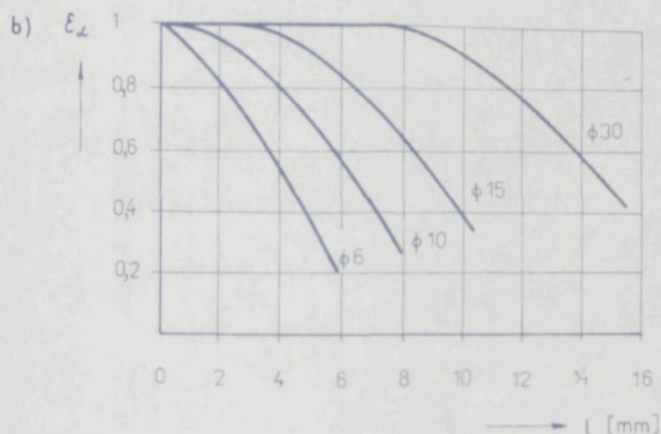
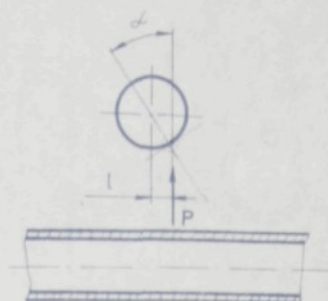
Obr. 4.2. Závislost účinnosti přestupu tepla na vzdálenosti ústí trysky hořáku od povrchu tmelky

- a) geometrické uspořádání
b) změřená závislost



Obr. 4.3. Závislost účinnosti přestupu tepla na výkonu hořáku a průměru tmelky

a)

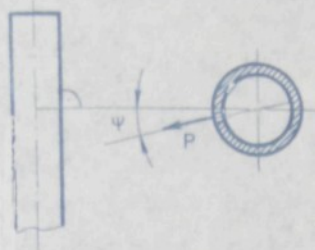
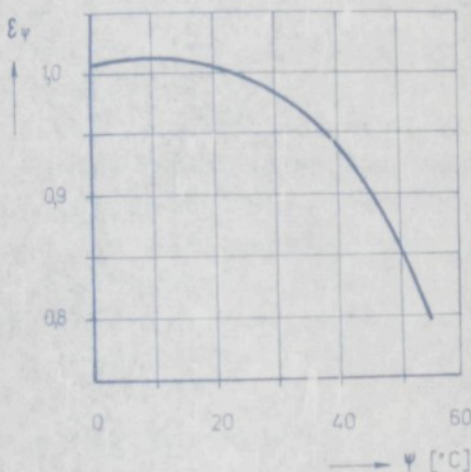


$$\varepsilon_d = \frac{\eta_d}{\eta_{d=0^\circ}}$$

Obr. 4.4. Závislost účinnosti přestupu tepla na vyosení plamene

- a) geometrické uspořádání (půdorys) - osa tmelky je svislá, osa plamene horizontální
b) změřená závislost

a)

b) ε_ψ 

$$\varepsilon_\psi = \frac{\eta_\psi}{\eta_{\psi=0}}$$

Obr. 4.5. Závislost účinnosti přestupu tepla mezi plamenem a tmelkou vlivem natožení hořákové trubky

- a) geometrické uspořádání
b) změřená závislost

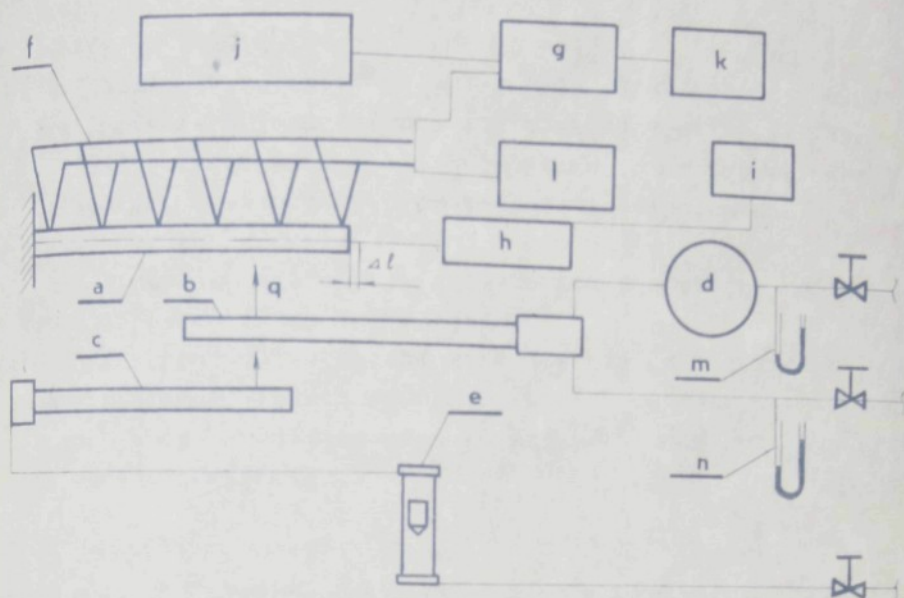
4.2. Ohřev a ochlazování tmelky.

Dodržení vhodné teploty tmelky v jednotlivých fázích tmelících operací je podmiňujícím faktorem technologického děje. Průběh teplotních polí je závislý na výkonu hořáku, velikosti tmelky, materiálu a konstrukci tmelky. Běžným a nejjednodušším případem je tmelka ve tvaru válcové, mosazné nebo ocelové tyčinky. U větších velikostí broušených kamenů bývá tmelka opatřena mosazným nástavcem.

Pro efektivní tmelicí stroj je nutno předem znát změnu teploty tmelky v závislosti na dříve uvedených proměnných veličinách. Teoretické řešení bylo provedeno pro vybrané konstrukční materiály a jednoduchou válcovou tmelku tvořenou jedním, nebo dvěma materiály. V experimentální části má být problém změny teploty nejen prakticky dokumentován ve vztahu k teoretickému řešení, ale jsou navrženy a proměřeny nové, netradiční konstrukce.

4.2.1. Experimentální zařízení.

K měření teploty tmelky bylo v laboratoři sestaveno zařízení, které ve své podstatě je ve smyslu vztahu hořáku a tmelky modelem skutečného provozního zařízení. Umožňuje nastavení všech proměnných veličin v požadovaném rozsahu, odpovídajícím běžným provozním podmínkám. Pro měření změny teploty bylo použito termočlánků Fe - Ko (Degussa) s termoelektrickým napětím podle DIN 43710 se studeným spojem 0°C. K registraci byl použit osciloskop pomalých dějů TESLA OPD 600 s fotografickým záznamem paprsku. Vzhledem k délce měření jednotlivých tmelek byla použita externí časová základna. Cejchování osciloskopu je řešeno pomocí odporových dekád (fy. Tettex) v potenciometrickém zapojení.



Obr. 4.6. Schema zařízení k měření změny teploty tmelky, délkové dilatace tmelky a délkové dilatace aparátu

- a - tmelka
- b - plynový trubkový hořák
- c - přívod chladicího vzduchu
- d - laboratorní plynoměr
- e - rotametr k měření průtoku chladicího vzduchu
- f - termočlánková čidla Fe-Ko
- g - osciloskop k registraci změny teploty tmelky
- h - indukční vysílač podélné deformace
- i - lineární zapisovač podélné deformace
- j - zdroj napětí pro cejchování osciloskopu
- k - externí časová základna osciloskopu
- l - paralelně napojený kompensátor k měření teploty
- m - manometr k měření přetlaku plynu
- n - manometr k měření přetlaku vzduchu

Současně s teplotou tmelky bylo měřeno její podélné prodloužení. K tomu byl použit indukční vysílač ZPA typ č. 99427 a převodník s liniovým jednostopým zapisovačem. Cejchování vysílače bylo prováděno tisícinovým ručičkovým indikátorem.

K měření spotřeby plynu bylo použito stejné zařízení jako v předešlé kapitole.

K určení vlivu nucené konvekce při ochlazování byl použit tlakový vzduch procházející šterbinou $0,5 \times 10$ mm, rovnoběžnou s podélnou osou tmelky. Průtočné množství bylo měřeno rotametrem.

4.2.2. Volba a rozsah proměnných veličin.

K proměnným veličinám teplotních závislostí sledovaným v této kapitole patří:

- a) výkon hořáku
- b) průměr tmelky
- c) materiál tmelky
- d) konstrukce tmelky

V ý k o n h o ř á k u je proměnnou veličinou, která je seřizována při skutečném technologickém ději podle zkušenosti seřizovače. Je proto v experimentální části volen rozsah 80 - 400 W na jednu tmelku. Rovněž podle závěrů předchozí kapitoly by tento rozsah neměl být překročen, neboť při podstatnějším zvýšení výkonu klesá neúměrně účinnost přestupu tepla mezi plamenem a tmelkou, při snížení výkonu se prodlužuje technologická operace.

P r ů m ě r t m e l k y je proměnnou veličinou jen ve vztahu k řešení teplotních procesů. V rámci technologického děje je průměr tmelky určen vyráběným sortimentem

kamenů. Konstruktor, ani seřizovač nemá v podstatě na tuto proměnnou veličinu žádný vliv. Proměřovaný rozsah průměrů byl zvolen podle praktické potřeby 6 - 30 mm.

M a t e r i á l t m e l k y je proměnnou veličinou jak ve vztahu k řešení teplotních procesů, tak ve vztahu ke konstruktérovi. Ten má možnost, volbou účelného materiálu tmelky, podstatně ovlivnit budoucí technologický proces. V této práci je hledisko volby materiálu podřízeno nejen problematice teplotních polí, ale i snaze snížit účelně spotřebu barevných kovů. Z toho důvodu je největší pozornost při výběru materiálu věnována oceli. Ve zpracování výsledků je provedeno porovnání jednotlivých materiálů a konstrukčních řešení s tradičním uspořádáním. V (tab. 4.1) jsou uvedeny proměřované typy oceli.

ocel	λ / W m ⁻¹ K ⁻¹ /	ocel	λ / W m ⁻¹ K ⁻¹ /
11 109	38	14 220	40
11 373	65	15 260	32
11 600	50	19 133	32
12 050	36	19 191	30
12 060	34	19 437	22
13 240	25	19 810	18
		19 824	15

Tab. 4.1. Tabulka ocelí používaných při experimentálním měření

V teoretické části práce byl prokázán vliv součinitele teplotní vodivosti a na změnu teplotních polí. Vzhledem k funkční závislosti $a = f(\lambda, c, \varphi)$ je důležitou hodnotou rovněž součinitel tepelné vodivosti λ , který je silně ovlivněn složením oceli. Z toho důvodu

je uváděn v tabulce (tab. 4.1). Pro potřebu konstruktérů je uhlíkových ocelí možno počítat λ v závislosti na chemickém složení podle vztahu

$$\lambda = \frac{419}{5,74 + 2,43 C + 5,09 Si + 2,46 Mn} \quad (4.5)$$

kde C, Si, Mn je procentuelní množství přísad. Vzorec platí pro uhlíkové oceli s obsahem uhlíku nižším než 0,4 % a platí pro teplotu 0°C. S rostoucí teplotou λ klesá přibližně lineárně a při teplotě 200°C je o 5 % nižší.

Při obsahu uhlíku $C > 0,4\%$ je doporučován / 26 / vztah

$$\lambda = \frac{419}{4,4 + 8,7 C + 3,67 Si + 1,9 Mn} \quad (4.6)$$

platící za jinek stejných podmínek jako vztah předešlý.

Podle / 36 / je doporučován výpočet tepelné vodivosti uhlíkových a některých legovaných ocelí podle vztahu vzniklých zevšeobecněním velkého počtu experimentálních výsledků. Uváděný vzorec má pro uhlíkové oceli tvar :

$$\lambda = 1,163 (a - b \Sigma + c \Sigma^2) / W m^{-1} K^{-1} / \quad (4.7)$$

$$\text{kde } a = 66 - 5,74 \cdot 10^{-2} t$$

$$b = 29,4 - 8,5 \cdot 10^{-2} t + 0,7 \cdot 10^{-4} t^2$$

$$c = 8,0 - 3,4 \cdot 10^{-2} t + 0,36 \cdot 10^{-4} t^2$$

Σ je součet všech příměsí v oceli v hmotnostních % a platí pro rozmezí

Σ od 0,1 do 2,0
teplota od 0 do 500°C.

Zvýšená pozornost v experimentální části je věnována manganokřemíkové oceli třídy 13, která má nízkou tepelnou vodivost a v porovnání s vysoce legovanými nástrojovými ocelmi třídy 19 je levná.

K o n s t r u k c e t m e l k y je proměnná veličina, která byla dosud sledována hlavně z hlediska pevnostního ve vztahu k technologické operaci broušení a leštění. V oboru strojně broušených kamenů zatím neexistuje ucelená práce, která by jednoznačně formulovala požadavky na "pružnost a pevnost" tmelky, tuhost aparátu a klopky. Z tohoto důvodu neexistuje ani jednotná, ucelená koncepce rozvoje a výzkum pouze vylepšuje známá zařízení. Z tohoto důvodu nelze určit kritéria, podle kterých by nové zařízení bylo hodnoceno a kvalita systému tmelka, aparát, klopka, brus nebo leštička, je hodnocena výhradně provozními zkouškami. V předkládané práci je konstrukce tmelky sledována výhradně z hlediska teplotních procesů a hledisko pevnosti je úměrně respektováno. Z teoretického rozboru teplotních polí je možno formulovat následující požadavky na efektivní konstrukci tmelky :

- a) maximální účinnost přestupu tepla mezi plamenem a povrchem tmelky
- b) minimální množství tepla potřebné k ohřevu pracovního konce tmelky
- c) minimální vedení tepla tmelkou do aparátu
- d) minimální hmotnost tmelky

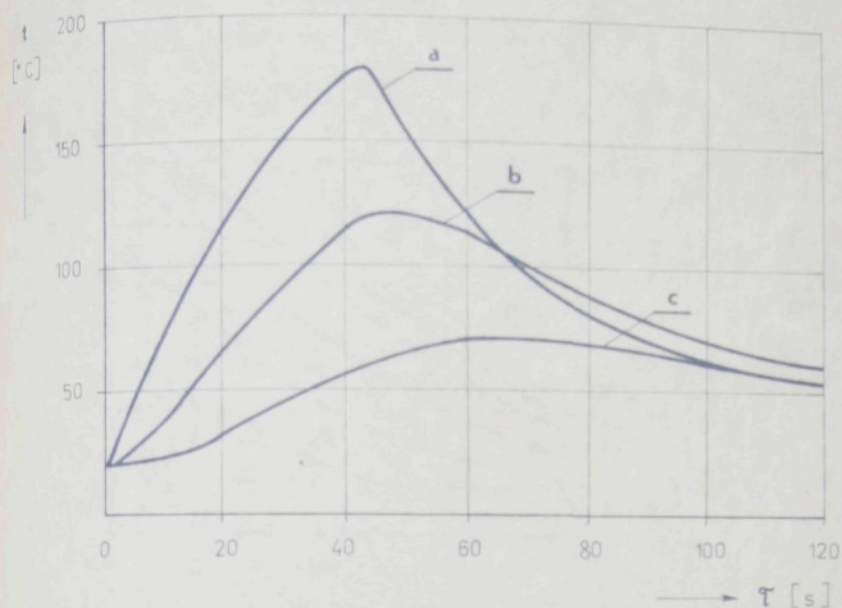
Pro porovnání jsou v práci zjišťovány teplotní závislosti tradiční konstrukce tmelek a teplotní závislosti nově navrhovaného konstrukčního řešení, na které bylo v roce 1978 rozhodnutím Úřadu pro vynálezy a objevy v Praze uděleno autorské osvědčení č. 190,186, pod názvem "Tmelka pro broušení skleněných kalenů" / 37 /.

4.2.3. Naměřené výsledky.

Výsledky experimentálního měření mají jednak prokázat platnost teoretických výpočtů a předpokladů, jednak prokázat použitelnost nově navržených řešení. S ohledem na tyto skutečnosti bylo provedeno vyhodnocení pouze několika typických případů, další naměřené hodnoty jsou předkládané pouze jako fotografický záznam teplotních změn tmelek v závislosti na dříve uvedených proměnných veličinách. Tepelné vlastnosti nově navržených prvků jsou uvedeny v kapitole "Návrh na realizaci výsledků".

Při ohřevu tmelek byly použity hodnoty z kapitoly "Optimální poloha tmelky a hořáku" (kap. 4.1). Ohřev byl prováděn kolmo na podélnou osu tmelky ve vzdálenosti 15 mm od čela tmelky. Počet plamenů (trysek) na jednu tmelku byl podle velikosti tmelky volen 1 - 3. Snímač teploty umožňoval registraci teploty ve vzdálenostech od čela tmelky buď 0, 20, 40, 60 mm nebo 0, 10, 20, 30, 40, mm. Teplota pracovního konce tmelky byla sledována paralelně připojeným kompensátorem (fy. Tettex).

V následujících obrázcích jsou vybrané výsledky měření zpracované dvěma způsoby. Na obr. 4.7, 4.9, 4.11, 4.13, 4.15 je uvedena změna teploty v závislosti na čase a několika místech tmelky, na obr. 4.8, 4.10, 4.12, 4.14 jsou křivky teplot zakresleny v závislosti na podélné ose tmelky a vybraných časových okamžicích. Teplotní grafy jsou v několika případech doplněny o podélné prodloužení tmelky.



Obr. 4.7. Změna teploty mosazné tmelky

a - teplota čela tmelky

b - teplota ve vzdálenosti 30 mm od čela

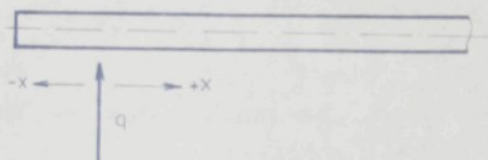
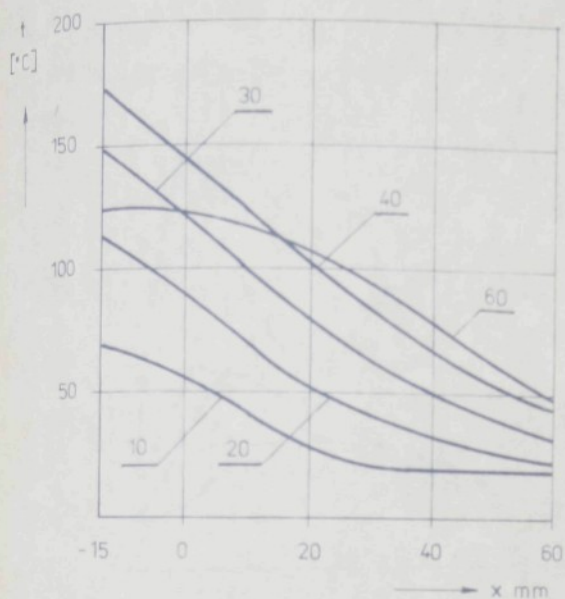
c - teplota ve vzdálenosti 60 mm od čela

materiál : mosaz 423223.31

výkon hořáku : 80 W

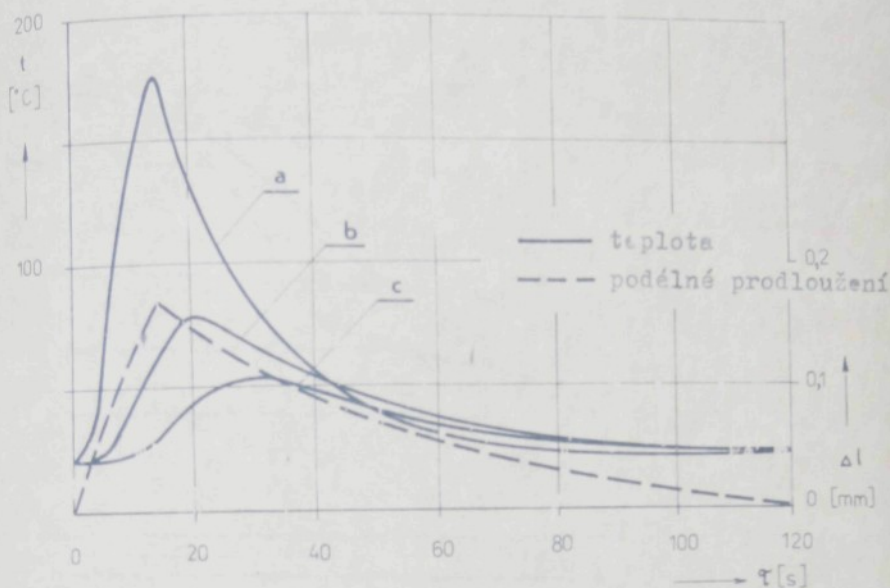
Ø tmelky : 6 mm

chlazení : přirozená konvekce



Obr. 4.8. Průběh teploty mosazné tmelky v čase 10, 20, 30, 40, 60 s od počátku ohřevu

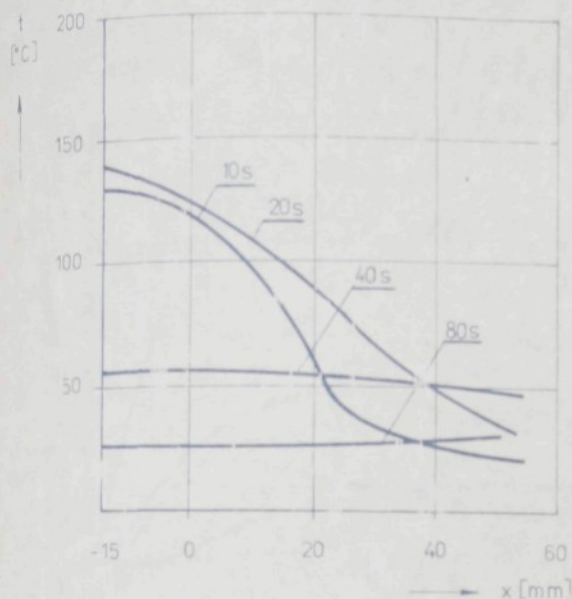
materiál : mosaz 423223.31
 výkon hořáku : 80 W
 $\varnothing$ tmelky : 6 mm
 chlazení : přirozená konvekce
 doba ohřevu : 43 s



Obr. 4.9. Změna teploty a podélné prodloužení mosazné tmelky

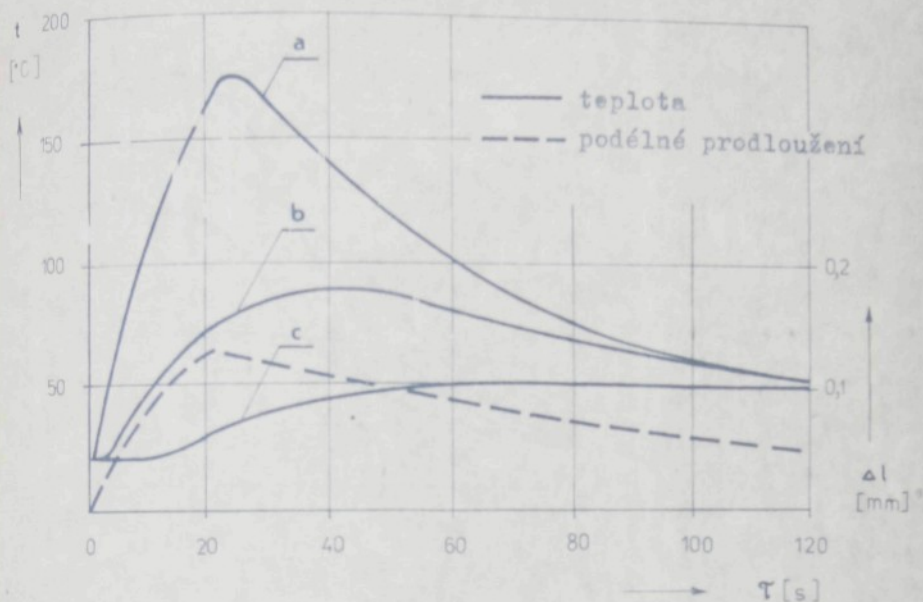
- a - teplota čela tmelky
- b - teplota ve vzdálenosti 40 mm od čela
- c - teplota ve vzdálenosti 60 mm od čela

materiál : mosaz 423223.31
 výkon hořáku : 180 W
 $\varnothing$ tmelky : 6 mm
 chlazení : nucená konvekce $0,11 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$



Obr. 4.10. Průběh teploty mosazné tmelky v čase 10, 20, 40, 80 s od počátku ohřevu

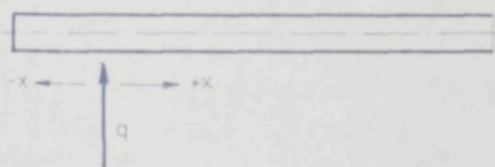
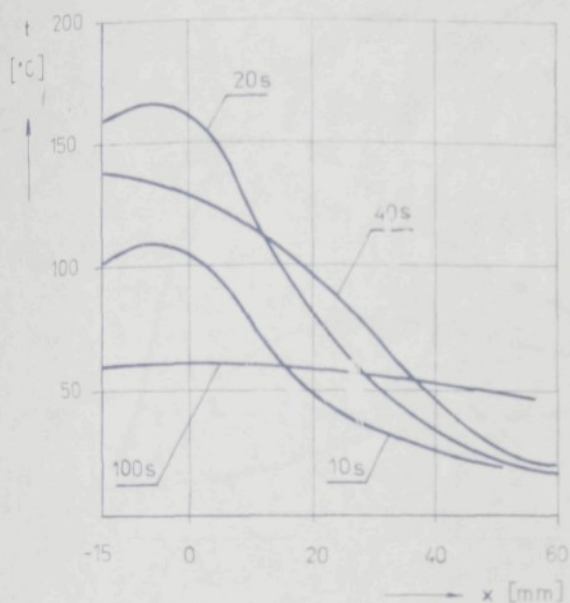
materiál : mosaz 423223.31
 výkon hořáku : 180 W
 $\varnothing$ tmelky : 6 mm
 chlazení : nucená konvekce
 doba ohřevu : 17 s



Obr. 4.11. Změna teploty ocelové tmelky

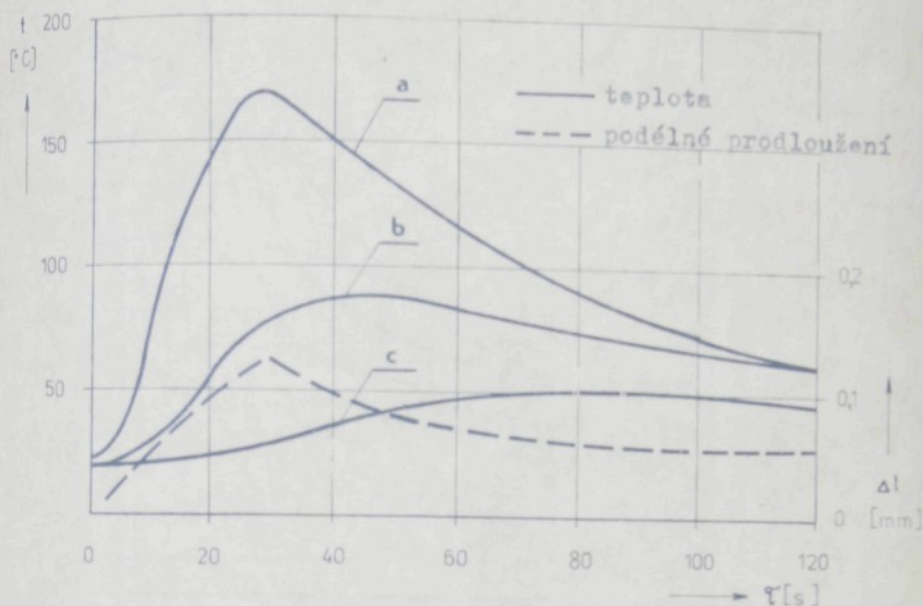
- a - teplota čela tmelky
- b - teplota ve vzdálenosti 40 mm od čela
- c - teplota ve vzdálenosti 60 mm od čela

materiál : ocel 11 109
 výkon hořáku : 150 W
 $\varnothing$ tmelky : 6 mm
 chlazení : přirozená konvekce



Obr. 4.12. Průběh teploty ocelové tmelky v čase 10, 20, 40, 100 s od počátku ohřevu

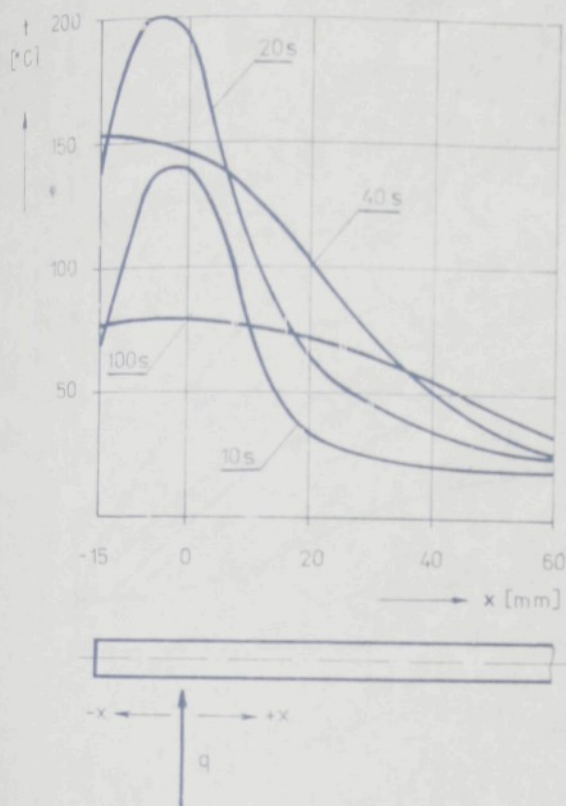
materiál : ocel 11 109
 výkon hořáku : 150 W
 $\varnothing$ tmelky : 6 mm
 chlazení : přirozená konvekce



Obr. 4.13. Změna teploty a podélné prodloužení ocelové tmelky

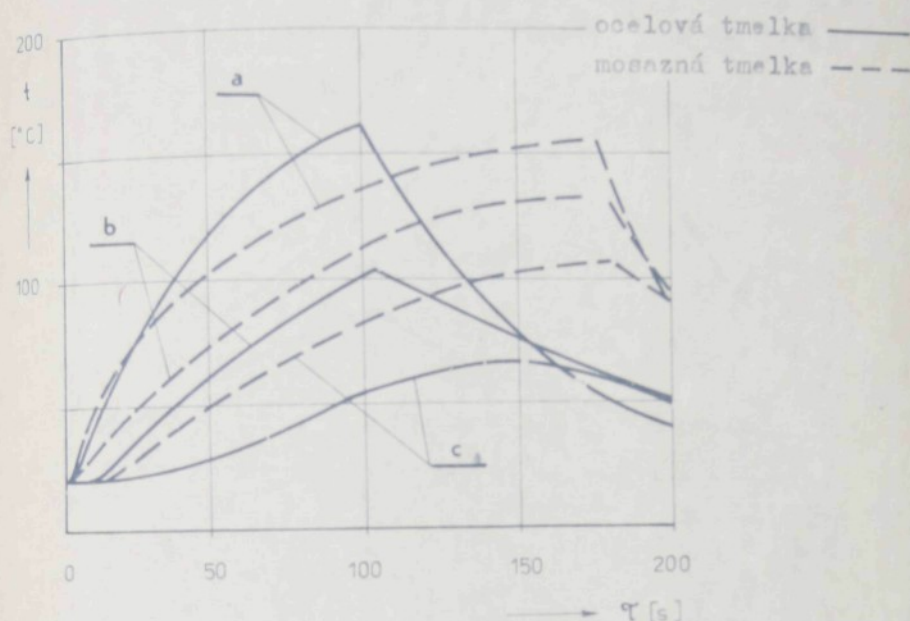
- a - teplota čela tmelky
- b - teplota ve vzdálenosti 40 mm od čela
- c - teplota ve vzdálenosti 60 mm od čela

materiál : ocel 19 133
 výkon hořáku : 150 W
 Ø tmelky : 6 mm
 chlazení : přirozená konvekce



Obr. 4.14. Průběh teploty ocelové tmelky v čase 10, 20, 40, 100 s od počátku ohřevu

materiál : ocel 19 133
 výkon hořáku : 150 W
 $\varnothing$ tmelky : 6 mm
 chlazení : přirozená konvekce



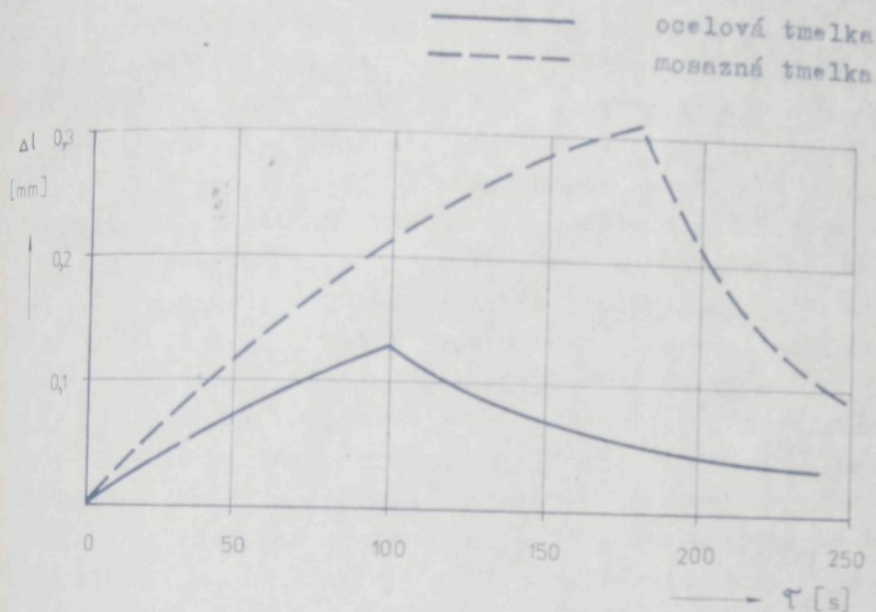
Obr. 4.15. Změna teploty mosazné a ocelové tmelky

- a - teplota čela tmelky
- b - teplota ve vzdálenosti 40 mm od čela
- c - teplota ve vzdálenosti 60 mm od čela

materiál : ocel 13 240
 mosaz 42 3223.31

výkon hořáku : 90 W

Ø tmelky : 10 mm



Obr. 4.16. Podélné prodloužení tmelky

materiál : ocel 13 240
mosaz 42 3223.31

výkon hořáku : 90 W

Ø tmelky : 10 mm

Ohřev na teplotu 150 °C

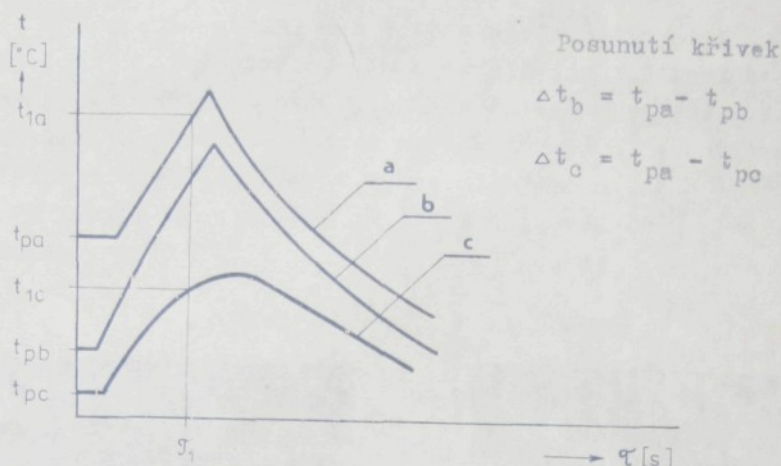
Na obr. 4.18. - 4.19. je fotografický záznam stopy osciloskopu, znázorňující časovou závislost teploty v různých místech tmelky. Pro lepší přehlednost jsou jednotlivé křivky vzájemně svisle posunuty, pouze křivka představující teplotu čela tmelky odpovídá stupnici teplot. Odečet skutečné teploty měřeného místa se provádí podle fotografických záznamů následovně : Křivka a (její počáteční a konečná teplota je v záznamech na první křivce shora) představuje skutečnou teplotu odpovídající stupnici teplot. Křivky ostatní jsou posunuty směrem dolů o hodnotu Δt , která je pro různé křivky různá a zjistí se jako rozdíl počáteční teploty t_{pa} (viz obr. 4.17.) uváděné v legendě ke každému obrázku (počáteční teplota je ve skutečnosti vždy u jednoho záznamu stejná) a teploty počátku t_p odečtené na fotografickém záznamu. Tyto křivky představují změnu teploty tmelky ve vzdálenostech měřených od čela tmelky a uváděných v legendě ke každému záznamu pod označením " měřené místo ". Příslušnou hodnotu Δt pak připočteme k teplotě odečtené v daném časovém okamžiku.

Příklad : V čase t_1 (viz. obr. 4.17.) odpovídá teplota čela tmelky přímo hodnotě t_{1a} na stupnici teplot, teplota ve vzdálenosti 40 mm od čela tmelky odpovídá křivce a a její hodnota je

$$t_1 = \Delta t_c + t_{1c}$$

$$\text{kde } \Delta t_c = t_{pa} - t_{pc}$$

a t_{pa}, t_{pc}, t_{1c} jsou teploty odečtené ze stupnice teplot.



Obr. 4.17: Schema pro určení teploty tmelek podle fotografických záznamů osciloskopu

t_{pa} - počáteční teplota čela tmelky

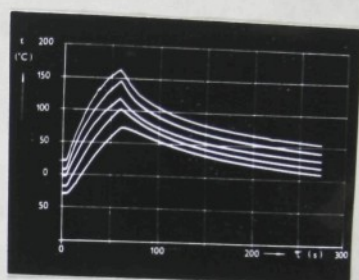
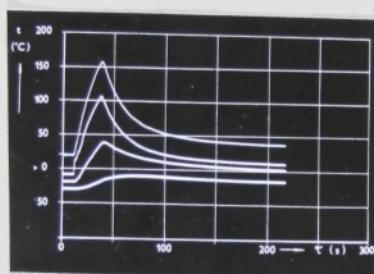
t_{pb} - počáteční teplota ve vzdálenosti 20 mm od čela tmelky

t_{pc} - počáteční teplota ve vzdálenosti 40 mm od čela tmelky

křivky a, b, c odpovídají měřenému místu 0, 20, 40 mm od čela tmelky

Skutečné děje, tak jak probíhají v automatizovaných linkách se skládají z několika po sobě jdoucích ohřevů. Teplotní poměry odpovídající takovéto technologii jsou znázorněny na následujících snímcích paprsku osciloskopu. Rozhodující pro posouzení efektivnosti ohřevu je rychlý nárůst teploty s vynaložením co nejmenšího množství energie, co nejnížší změna teploty tmelky v místě ukotvení do aparátu a co nejrychlejší ochlazení po ukončení operací.

Experimentální měření prokázalo platnost teoretických úvah a výpočtů. Navíc umožnilo identifikaci tepelných dějů při opakovaném ohřevu tmelek. Uvedené průběhy teplot jsou pouze výběrem z řady měření a jednotlivé grafy nejsou zvlášť komentovány, ale jako celek byly použity při návrhu a uplatnění tmelek kombinovaných z více konstrukčních materiálů.



Ø 10 mm.

150 W

přirozená konvekce

měřené místo 0, 20, 40, 60

Ø 16 mm

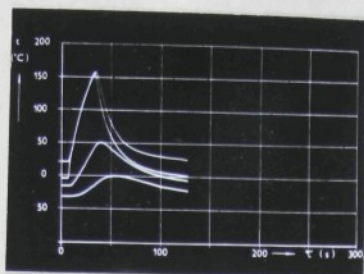
290 W

přirozená konvekce

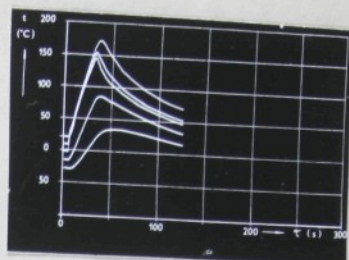
0, 10, 20, 30, 40 mm

Obr. 4.18. Změna teploty mosazné tmelky.

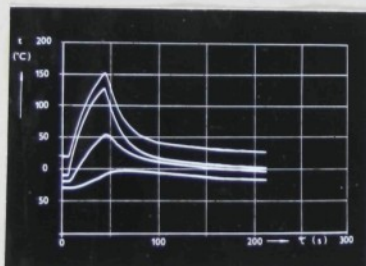
Počáteční teplota tmelky $t_{pa} = 20^{\circ}\text{C}$.



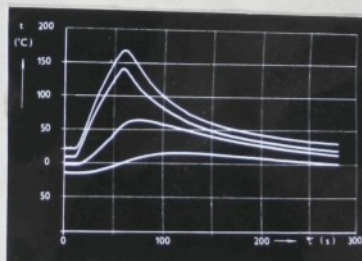
ocel 11 109
 $\varnothing$ 6 mm
 160 W
 nucená konvekce
 0, 20, 40, 60 mm



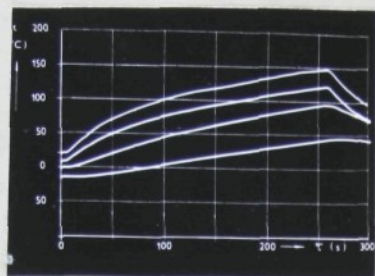
ocel 19 133
 $\varnothing$ 6 mm
 96 W
 přirozená konvekce
 0, 10, 20, 30, 40 mm



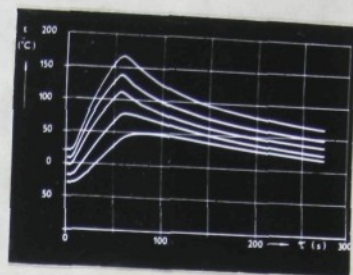
ocel 19 133
 $\varnothing$ 6 mm
 100 W
 nucená konvekce
 0, 10, 20, 30, 40 mm



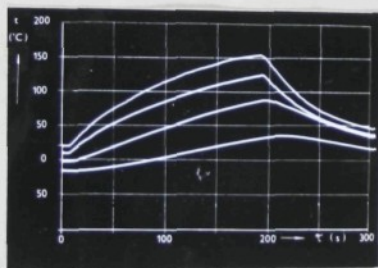
ocel 11 373
 $\varnothing$ 16 mm
 320 W
 nucená konvekce
 0, 20, 40, 60 mm



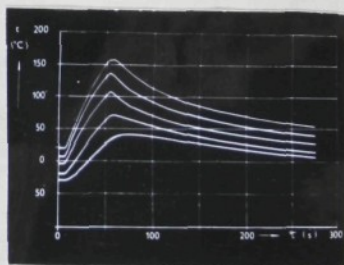
ocel 11 600
 $\varnothing$ 16 mm
 87 W
 nucená konvekce



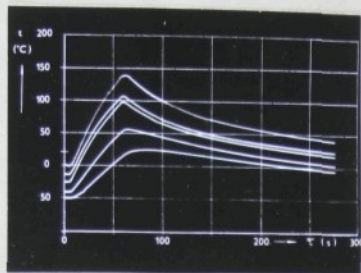
ocel 11 600
 $\varnothing$ 16 mm
 277 W
 přirozená konvekce



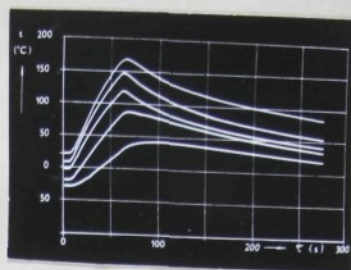
ocel 12 060
 $\varnothing$ 16 mm
 87 W
 nucená konvekce



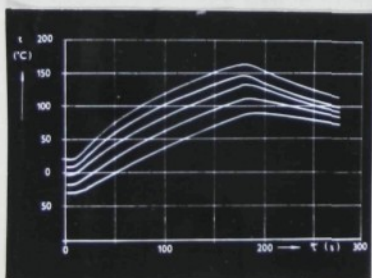
ocel 12 133
 $\varnothing$ 16 mm
 290 W
 přirozená konvekce



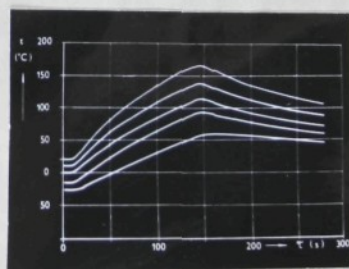
ocel 14 220
 $\varnothing$ 16 mm
 290 W
 přirozená konvekce



ocel 19 810
 $\varnothing$ 16 mm
 280 W
 přirozená konvekce

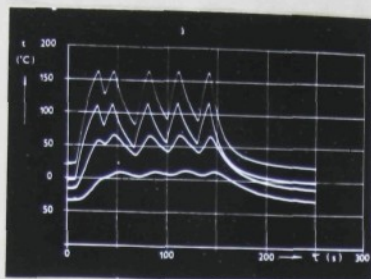


ocel 19 437
 $\varnothing$ 30 mm
 410 W
 přirozená konvekce

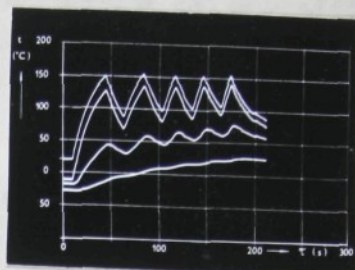


ocel 15 260
 $\varnothing$ 30 mm
 410 W
 přirozená konvekce

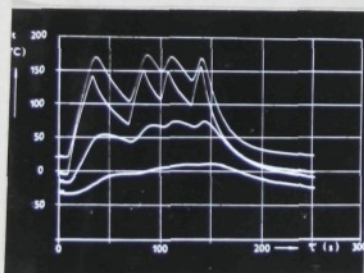
Obr. 4. 19. Změna teploty ocelové tmelky.
 Počáteční teplota tmelky $t_{ps} = 20^{\circ}\text{C}$.



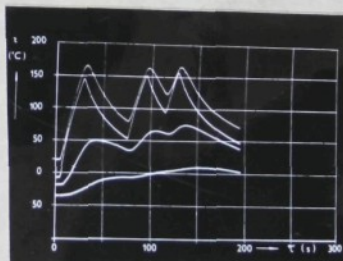
mosaz 42 32 23.31
 $\varnothing$ 6 mm
 170 W
 nucená konvekce
 po posledním ohřevu



mosaz 42 32 23.31
 $\varnothing$ 10 mm
 150 W
 přirozená konvekce



ocel 11 109
 $\varnothing$ 6 mm
 167 W
 nucená konvekce
 po posledním ohřevu



ocel 19 133
 $\varnothing$ 6 mm
 160 W
 nucená konvekce
 po posledním ohřevu

Obr. 4. 20. Změna teploty tmelky při několika-
 násobném ohřevu.

Počáteční teplota tmelky $t_{pa} = 20^{\circ}\text{C}$.

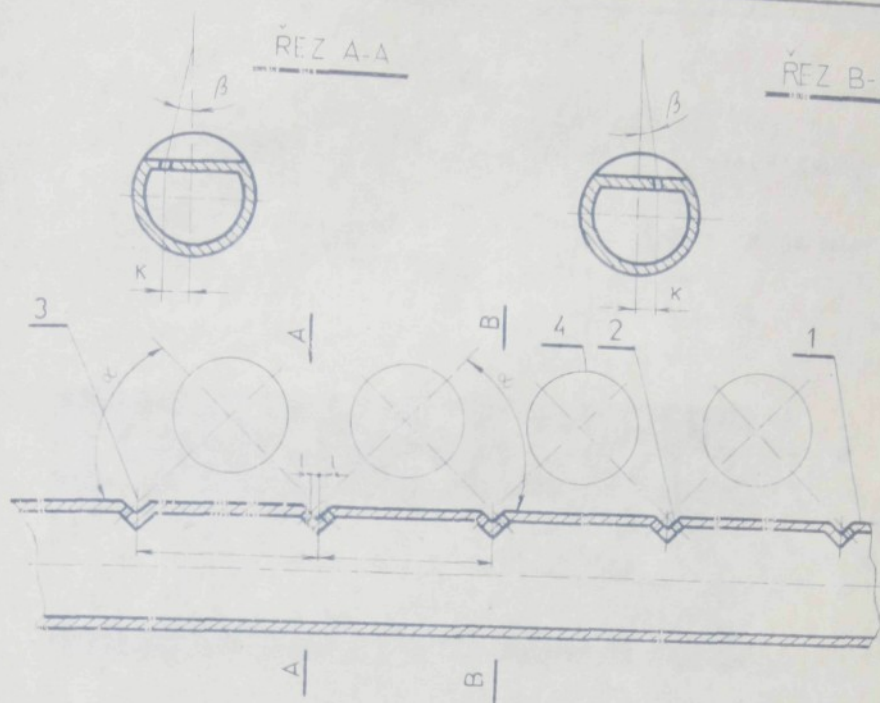
4.3. Návrh na realizaci výsledků.

V souladu s požadavkem modernizace výroby a racionalizace spotřeby energie byla během výzkumné činnosti využita řada dílčích výsledků a navrženy některé konstrukční prvky efektivního tmelicího stroje. K rozhodujícím prvkům technologických operací v oboru strojně broušených kamenů patří hořák a tmelka.

4.3.1. Plynový trubkový hořák

Syntézou poznatků z technologického provozu, teoretického rozboru a experimentálního měření optimalizace geometrického vztahu hořáku a tmelky byla navržena konstrukce hořákové ^{trubky} tmelky podle obr.4.21., spočívající v omezení počtu plamenů (trysek) na dva pro každou tmelku a uspořádání ohřevu s ohledem na maximální účinnost přestupu tepla mezi plamenem a tmelkou. Otvory (trysky) v hořákové trubce jsou vrtány pod α , přičemž $0 < \alpha < 90^\circ$, pod β , $\beta \geq 0^\circ$ a vzdálenosti l a r jsou voleny tak, aby byly splněny podmínky optimálního ohřevu. Drážka 3 není ve všech případech nutná, slouží hlavně pro snadné vyvrtávání otvorů a tečná rovina k povrchu drážky by měla být kolmá na směr hoření plamenů. Vzdálenosti k otvorů v rovině kolmé na hořákovou trubku slouží k tomu, aby se plyn pouze vzájemně zapálil, ale plamen nebyl vedlejším plamenem deformován.

Plynový trubkový hořák podle uvedené konstrukce byl jak laboratorně, tak provozně vyzkoušen a je dále v provozu rozšiřován. Řešení bylo v roce 1980 přihlášeno k udělení autorského osvědčení.



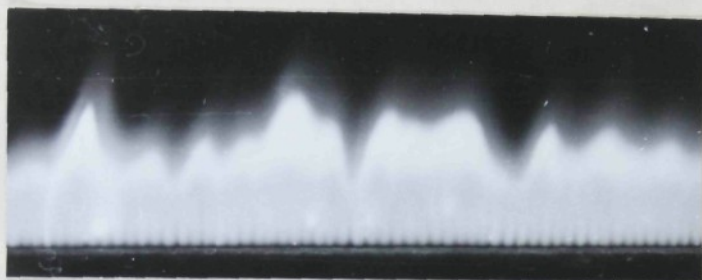
Obr. 4. 21. Plynový trubkový hořák nové konstrukce.

Při provozním zkoušení byly prokázány tyto výhody :

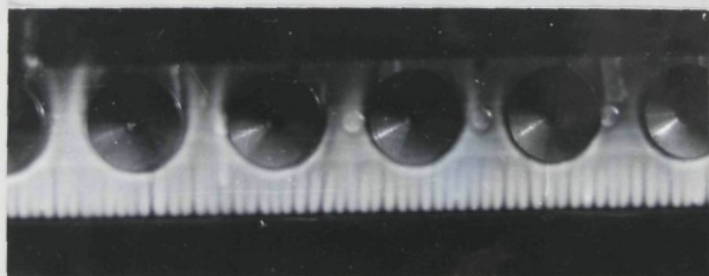
- rychlost vzplanutí hořáku v celé šíři je prakticky neměřitelná, což přispělo ke zrovnoměnění ohřevu
- hořák je seřiditelný v širokém rozsahu výkonů a směšovacích poměrů svítiplynu a primárního spalovacího vzduchu,
- účinnost využití tepla se zvýšila nejméně na dvojnásobek vlivem odstranění neúčinných plamenů,

které u tradičního provedení slouží pouze ke vzájemnému zapálení v celé šíři hořákové trubky.

Na dalších obrázcích je zachycen tvar plamene plynového hořáku, realizovaného pro ohřev tmelek při tmelení velkých lustrových ověsů LH 40 na aparátech ABD 2 - U 1. Pro porovnání je uveden tvar plamene tradičního hořáku.



a)
2500 W

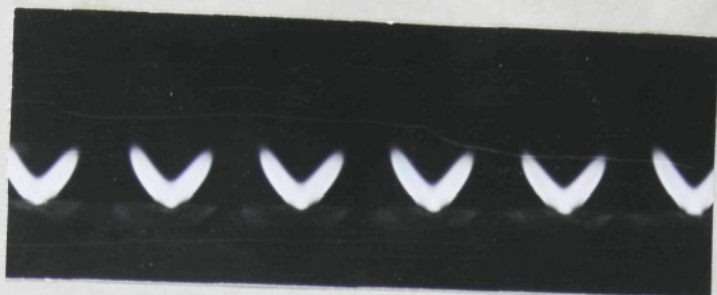


b)
1400 W

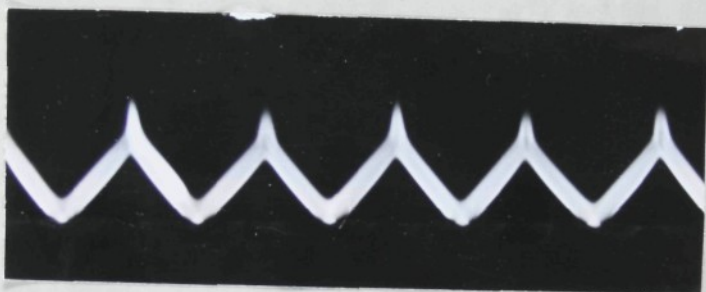
Obr. 4. 22. Tvar plamene tradičního trubkového plynového hořáku ; výkon je uveden pro celý hořák (100 trysek) pro ohřev 19-ti tmelek $\varnothing$ 38 mm

a - tvar plamene bez primárního vzduchu

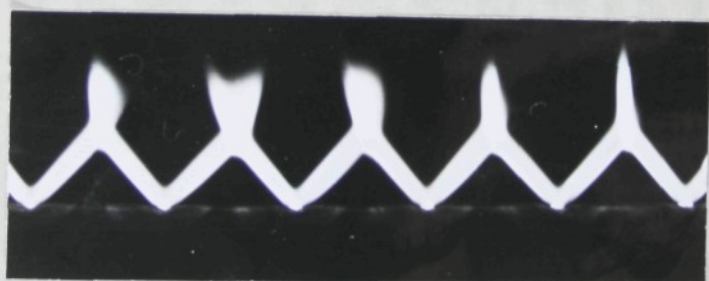
b - ohřev tmelek



a)
260 W



b)
540 W



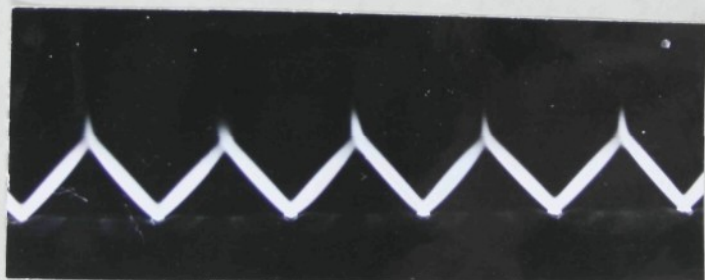
c)
740 W



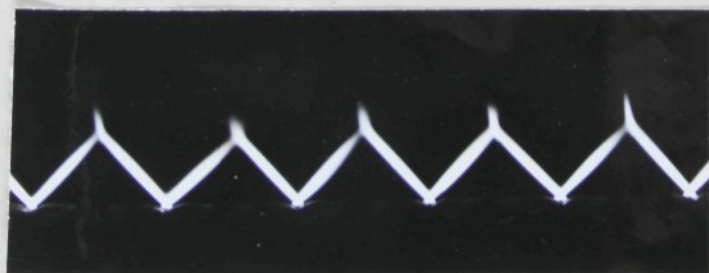
d)
250 W



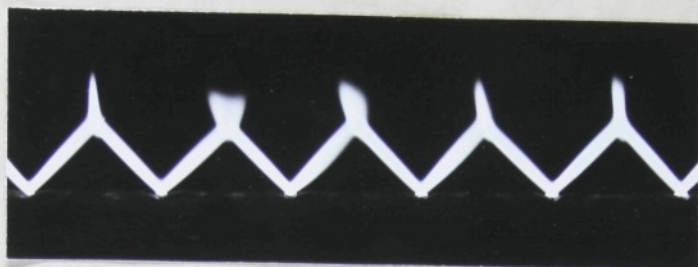
e)
370 W



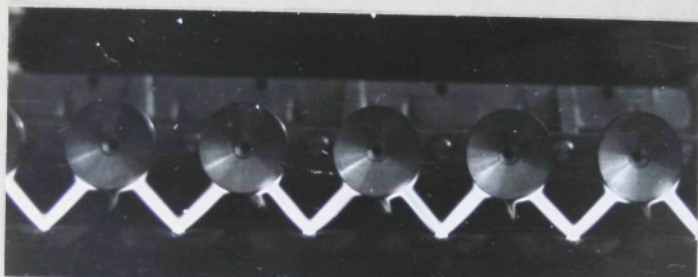
f)
400 W



g)
500 W



h)
625 W



i)
400 W

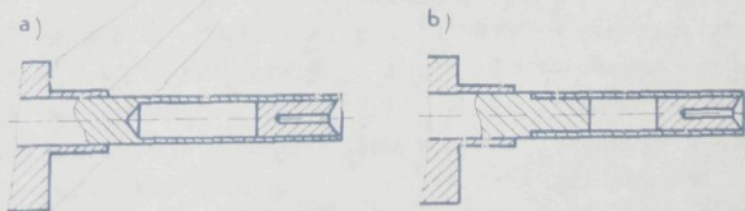
Obr. 4. 23. Tvar plamene nově navrženého plynového trubkového hořáku; výkon je uveden pro celý hořák (18 trysek) pro ohřev 19-ti tmelek $\varnothing$ 38 mm.

- a, b, c, - tvar plamene bez primárního vzduchu
d, e, f, g, h, - tvar plamene s primárním vzduchem
i - ohřev tmelek

4.3.2. Kombinovaná tmelka

Shrnutí teoretických výpočtů a experimentálního měření dává podklady pro návrh účelné, efektivní tmelky, která by splňovala nejen požadavky mechanické pevnosti, ale zároveň požadavky tepelně technické. Ze závěru teoretické části vyplynul požadavek na kombinaci dvou materiálů. Pro sdílení tepla mezi plamenem a tělem tmelky dobrý vodič s vysokou hodnotou součinitele tepelné vodivosti a pro sdílení tepla mezi plamenem a ukotvením tmelky v aparátu materiál s nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti.

Již v minulosti existovala snaha tento požadavek realizovat / 21 /. Problém však nebyl dostatečně teoreticky zpracován a vlastní konstrukční řešení nesplňovalo požadavek pevnosti. Po kratších provozních zkouškách bylo posléze od daného řešení upuštěno. Vedle nezvládnutí konstrukce tmelky zde ještě působily vlivy tradice oboru a v tehdejší době existující dostatek levné energie.

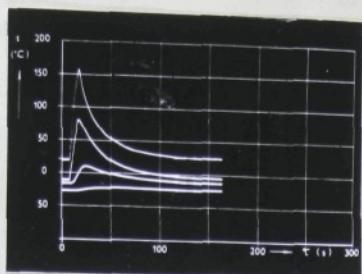


Obr. 4.24. Kombinovaná tmelka

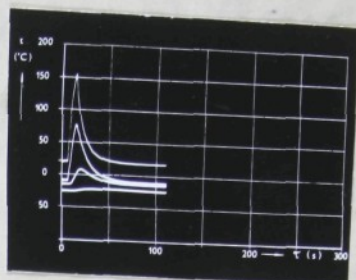
- a - nová tmelka
- b - nový nástavec umožňující rekonstrukci tradičního aparátu

Na obr. 4. 24. je proveden návrh nové konstrukce vycházející z požadavků na tepelné technické vlastnosti s respektováním mechanické pevnosti. Konstrukční řešení využívá vysoké tepelné vodivosti hliníku, případně slitin hliníku a relativně nízké tepelné vodivosti oceli. Doporučována je manganokřemíková ocel řady 13, umožňující zušlechťování. Zušlechťením dojde jednak ke zvýšení pevnosti, jednak ke snížení součinitele tepelné vodivosti. Pro snížení odvodu tepla do aparátu je těleso tmelky zeslabeno podélným otvorem, sahajícím téměř k ukotvení. Obr. 4.24 a představuje konstrukci nové kombinované tmelky, obr. 4.24 b představuje nástavec použitelný pro libovolný tradiční aparát jak s ocelovými, tak mosaznými tmelkami.

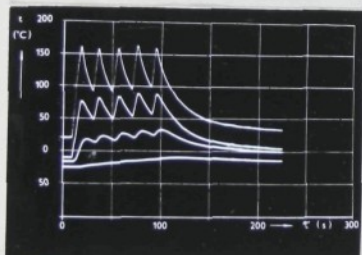
Pro experimentální měření teplotních poměrů byly konstrukčně zpracovány tmelky o průměrech 6, 10, 16 mm a pro porovnání proměřeny s tmelkami mosaznými. Vedle jednorázového ohřevu je uplatněn i ohřev několikanásobný. Měření teploty v různých místech tmelky bylo doplněno o měření teploty aparátu. K tomu bylo použito modelové zařízení představující hliníkový aparát. Použitelnost výsledků získaných na modelovaném aparátu byla ověřena porovnávacím měřením na aparátu SS 30 čísl. o výkresu AAV4-Tl-6078-000, který je osazen 78 mosaznými tmelkami $\varnothing$ 6 mm. K vyhodnocení fotografického záznamu je nutno použít stejnou metodiku jako v předchozí kapitole (4.2.3.) Na všech záznamech představuje křivka položená nejvýše teplotu čela tmelky, odpovídající teplotní stupnici. Další dvě křivky představují záznam teploty ve vzdálenosti 20 a 40 mm od čela tmelky a křivka nejnižší představuje teplotu aparátu.



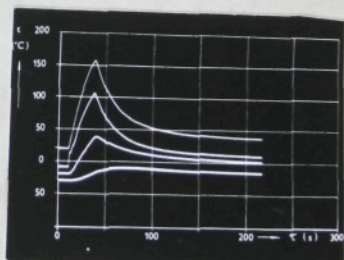
a) $\varnothing$ 6 mm
150 W
přirozená konvekce



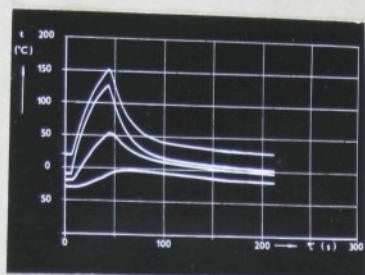
b) $\varnothing$ 6 mm
150 W
nucená konvekce



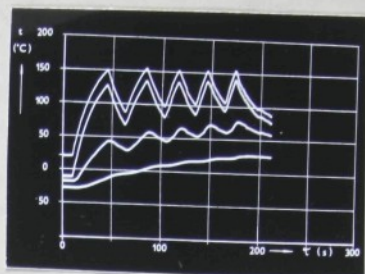
c) $\varnothing$ 6 mm
150 W
přirozená konvekce



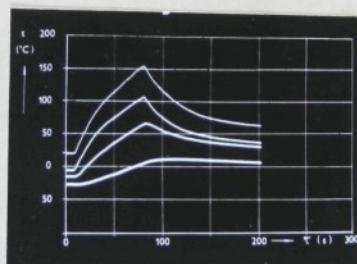
d) $\varnothing$ 10 mm
160 W
přirozená konvekce



e) $\varnothing 10 \text{ mm}$
 170 W
 nucená konvekce

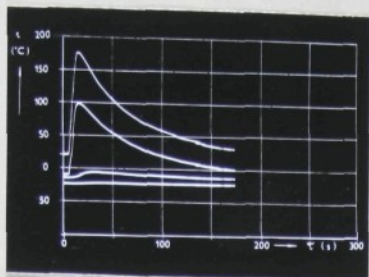


f) $\varnothing 10 \text{ mm}$
 150 W
 přirozená konvekce

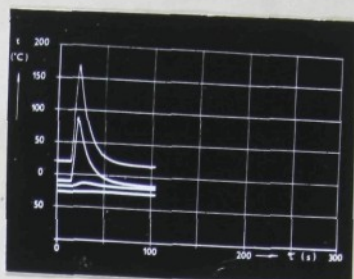


g) $\varnothing 16 \text{ mm}$
 160 W
 přirozená konvekce

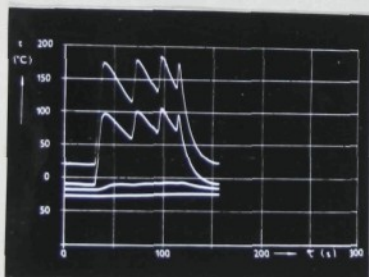
Obr. 4.25. Změna teploty mosazné tmelky.
 Teplota počátku $t_{pa} = 20^\circ\text{C}$



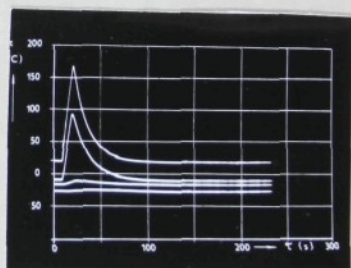
a) Ø 6 mm
150 W
přirozená konvekce



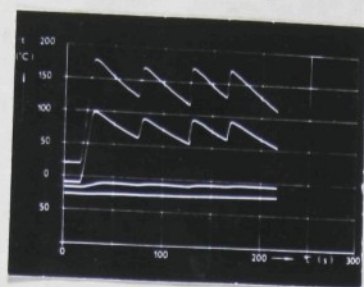
b) Ø 6 mm
150 W
nucená konvekce



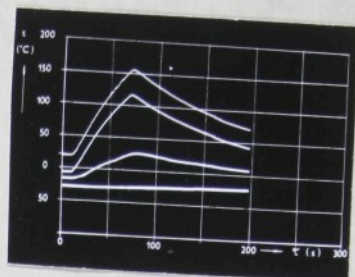
c) Ø 6 mm
150 W
nucená konvekce
po posledním ohřevu



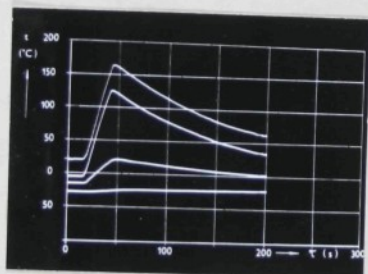
d) Ø 10 mm
150 W
nucená konvekce



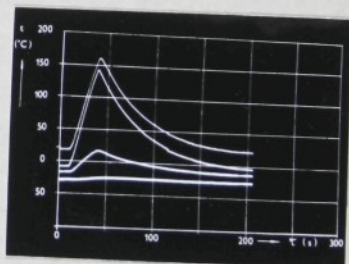
e) $\varnothing 10 \text{ mm}$
150 W
přirozená konvekce



f) $\varnothing 16 \text{ mm}$
100 W
přirozená konvekce



g) $\varnothing 16 \text{ mm}$
170 W
přirozená konvekce



h) $\varnothing 16 \text{ mm}$
175 W
nucená konvekce

Obr. 4. 26. Změna teploty nově navrhované
kombinované tmelky; $t_{pa} = 20^\circ\text{C}$

Z předložených teplotních závislostí jednoznačně vyplývá, že při běžných tmelicích operacích se bude aparát osazený mosaznými tmelkami intenzivněji ohřívat, což je nežádoucí. Realizace nové konstrukce by měla zlepšit technologii tmelení v následujících směrech:

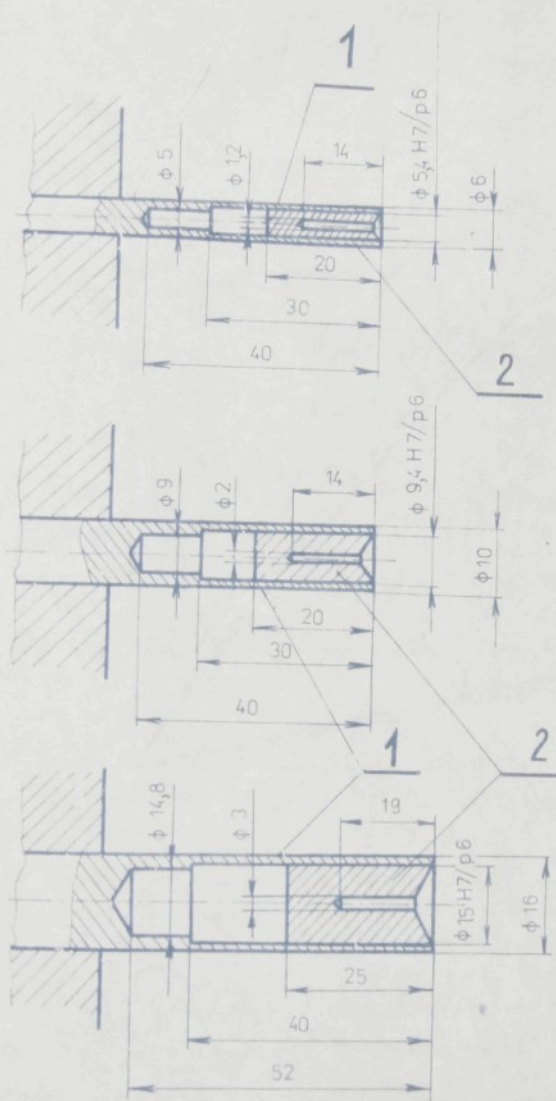
- a) aparát bude méně tepelně namáhán, lze předpokládat vyšší životnost,
- b) náhrada mosazných tmelek ocelovými podle návrhu přinese úsporu barevných kovů a energie,
- c) zvýší se životnost vlastních tmelek,
- d) zkrátí se technologické časy ohřevu,
- e) zpřesní se výroba vlivem menší deformace aparátu při přetmelení,
- f) použití kombinované tmelky usnadní automatizaci tmelicích operací.

Vedle teplotních vlastností nové konstrukce tmelek je nutno hodnotit rovněž mechanické vlastnosti. Protože požadavek na tuhost tmelky není zatím objektivně vyjádřen, je provedeno porovnání nové konstrukce s tradiční mosaznou tmelkou.

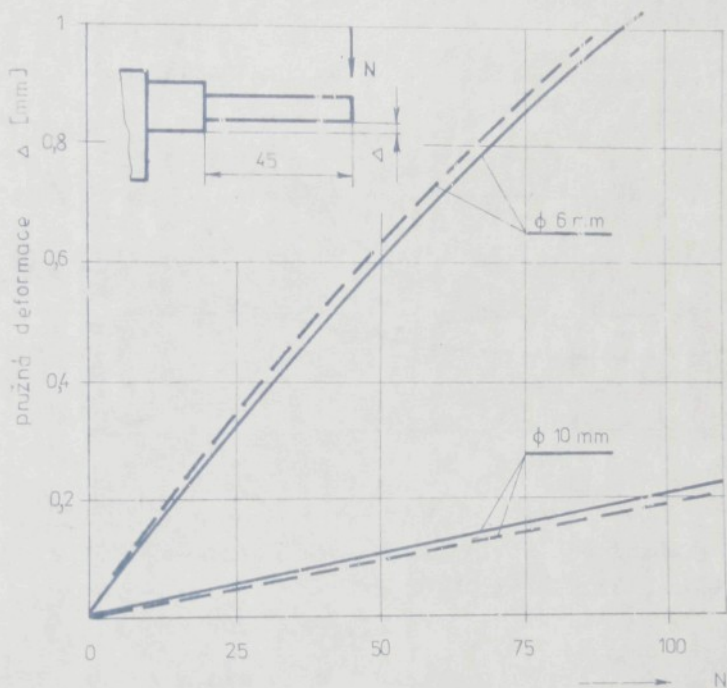
Na obr. 4.27. je rozměrově znázorněn uvedený nový konstrukční návrh tmelky, na obr. 4.28. deformace tmelky při ohybovém namáhání. Navržené řešení v podstatě svojí tuhostí odpovídá mosazné tmelce. Dává však možnost zvýšení tuhosti zušlechtěním s nižšími popouštěcími teplotami, zmenšením vnitřního průměru tmelky, nebo zkrácením odlehčovacího otvoru.

V souvislosti s měřením teplot tmelek nového konstrukčního řešení byl proměřen aparát SS 30 č. výkr. AAV4 - 1 - 6078 - 000, který byl vyvinut v klp. Preciosa a má být výhledově používán při automatizaci tmelicích operací.

- 1- tmelka- ocel 13 240 kaleno z teploty 850°C do oleje
popouštěcí teplota 530 °C
- 2- Al slitina 424357



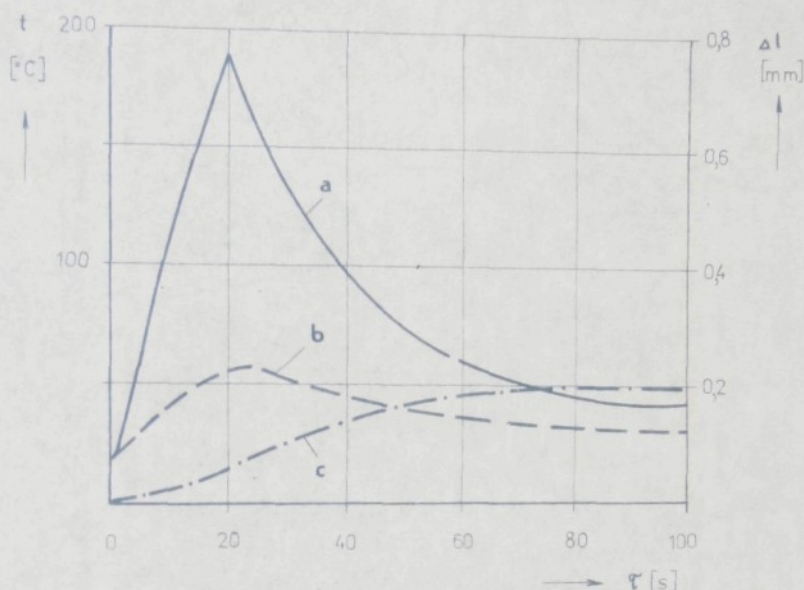
Obr. 4 .27. Konstrukční návrh kombinované ocelové tmelky



Obr. 4. 28. Deformace kombinované a mosazné tmelky

———— kombinovaná tmelka
 - - - - - mosazná tmelka

Aparát je osazen 78 mosaznými tmelkami $\varnothing 6$ mm, těleso aparátu je vyrobeno z hliníkové slitiny ČSN 42 4357, šroub z oceli 11 120.0.



Obr. 4. 29. Změna teploty mosazné tmelky v aparátu SS 30 a délkové prodloužení aparátu

a - teplota čela tmelky

b - teplota tmelky v místě ukotvení v aparátu

c - délkové prodloužení Δl aparátu

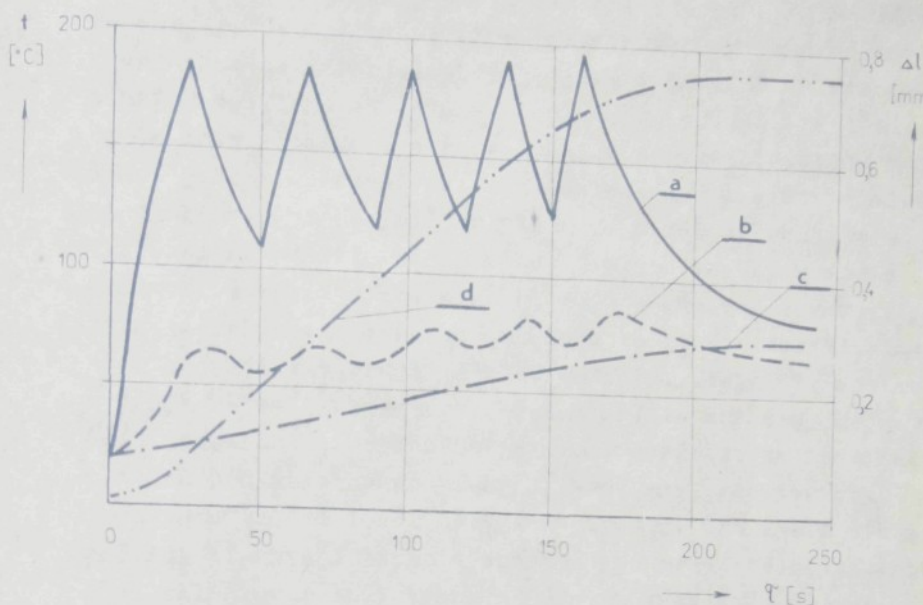
materiál : mosaz 42 32 23.11

$\varnothing$ tmelky : 6 mm

doba ohřevu : 20 s

výkon hořáku : $100 \times 78 = 7\,800$ W

chlazení : přirozená konvekce



Obr. 4. 30. Změna teploty mosazné tmelky
a aparátu SS 30 při opakovaném
ohřevu a délkové prodloužení Δl
aparátu

- a - teplota čela tmelky
- b - teplota tmelky v místě ukotvení v aparátu
- c - teplota aparátu
- d - délkové prodloužení aparátu

materiál tmelky : mosaz 42 3223.11

$\varnothing$ tmelky : 6 mm

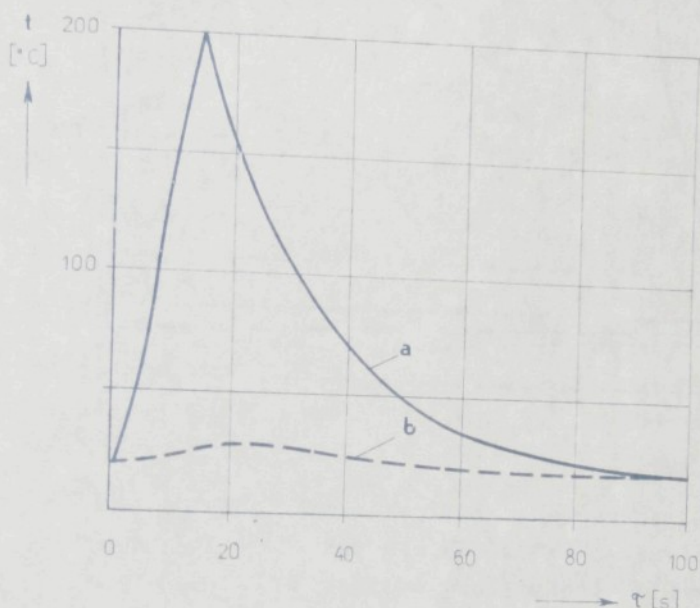
výkon hořáku : $100 \times 78 = 7\,800$ W

doba ohřevu : $30 + 15 + 12 + 11 + 10$ s

ochlazení : přirozená konvekce

Na obr. 4.29 je jednorázový ohřev uvedeného aparátu na obr. 4.30. opakovaný ohřev realizovaný v poměrně krátkých časových intervalech tak, jak je prováděn u automatických tmelicích strojů. Z teplotního průběhu vyplývá, že teplota kališku tmelky se mění v podstatě stejnou rychlostí jak při ohřevu, tak při ochlazování a každý následující ohřev mezi danými teplotami se mírně zkracuje v závislosti na prohřívání aparátu. Teplota tmelky v místě ukotvení v aparátu zřetelně sleduje změnu teploty kališku. Toto je způsobeno vysokou tepelnou vodivostí mosazi. Lze však konstatovat trvalý nárůst teploty. Stejně trvale se zvyšuje během opakovaného ohřevu teplota aparátu. Hodnotu 80°C nelze podle uvedeného záznamu považovat za hodnotu platnou pro všechny podmínky ohřevu, ale jako teplotu proměnnou v závislosti na výkonu hořáku. Čím vyšší výkon hořáku, tím nižší teplota aparátu při srovnatelných teplotách kališku tmelky. Výkon hořáku má však své omezení ve vztahu k účinnosti přestupu tepla mezi plamenem a tmelkou (viz kap. 4.1.3.). Důsledkem zvýšení teploty aparátu bude jeho podélná dilatace, která při teplotě 80°C dosahuje hodnoty 0,75 mm. Vzhledem k tomu, že při přetmelení dochází k "setkání" aparátu ohřátého a studeného bude vysoká teplotní dilatace nepříznivě působit na přesnost přetmelení. Dalším negativním jevem bude natáčení okrajových tmelek vlivem rozdílné dilatace hliníkového tělesa aparátu a ocelového šroubu, který má jednak poloviční součinitel teplotní roztažnosti, jednak výrazně nižší teplotu. Vcelku lze nový aparát osazený mosaznými tmelkami hodnotit z hlediska tepelných poměrů jako zcela nevyhovující pro automatické tmelicí operace. V^{ruční} tmelicí operace lze předpokládat minimalizaci ohřívacích časů způsobenou aktivní " zpětnou - kontrolou" zapracované obsluhy, čímž dojde i k nižším teplotám a deformacím aparátu. U auto-

matického tmelicího stroje je však třeba zajistit určitou míru jistoty děje (viz kap. 3.1.2.) za cenu prodloužení ohřívacích časů. Z toho důvodu nelze nový aparát doporučit pro další realizaci.



Obr. 4. 31. Změna teploty kombinované tmelky v aparátu SS 30 - měřeno na modelu

a - teplota čela tmelky

b - teplota tmelky v místě ukotvení v aparátu

materiál tmelky : ocel 13 240

hliník 42 4357

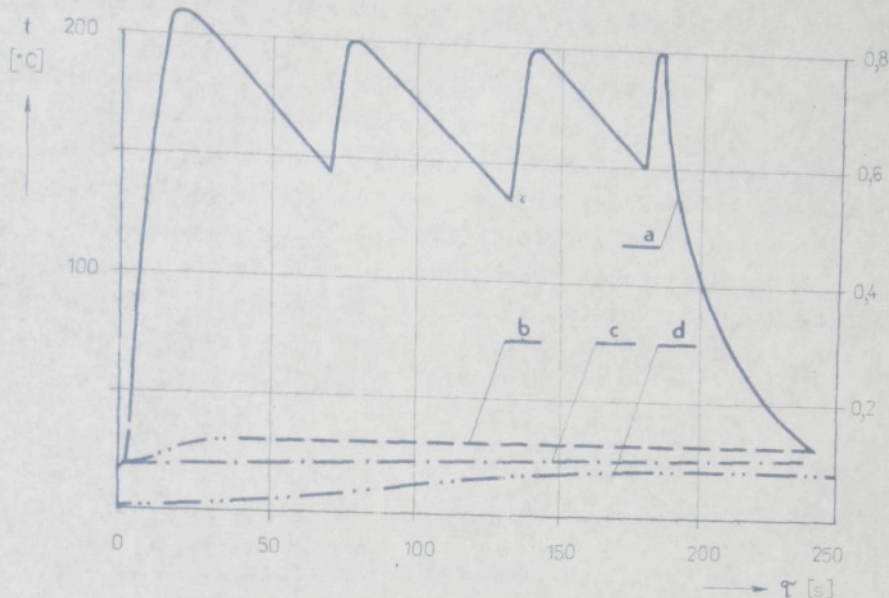
Ø tmelky : 6 mm

doba ohřevu : 14 s

výkon hořáku : $100 \times 78 = 7\,800\text{ W}$

chlazení : nucená konvekce

dodané teplo : $109 \times 10^3\text{ J}$



Obr. 4. 32. Změna teploty kombinované tmelky
a aparátu SS 30 při opakovaném ohřevu
a délkové prodloužení Δl aparátu
- měřeno na modelu -

- a - teplota čela tmelky
- b - teplota tmelky v místě ukotvení v aparátu
- c - teplota aparátu
- d - délkové prodloužení aparátu

materiál tmelky : ocel 13 240

hliník 42 4357

$\varnothing$ tmelky : 6 mm

výkon hořáku : $100 \times 78 = 7\,800 \text{ W}$

doba ohřevu : $18 + 6 + 6 + 4 \text{ s}$

chlazení : nucená konvekce po posledním ohřevu

dodané teplo : $(140,4 + 46,8 + 46,8 + 31,2) \cdot 10^3 =$
 $= 265,2 \cdot 10^3 \text{ J}$

Na obr. 4.31 a 4.32 jsou znázorněny teplotní závislosti u aparátu stejné konstrukce, osazeného nově konstruovanou kombinovanou tmelkou. Je zde patrný rychlý vzestup teploty čela (kalíšku) tmelky, pomalé ochlazování kalíšku při ukončení meziobřevu a rychlý pokles teploty při nuceném ochlazování. Významné zlepšení se projevuje jak u teploty tmelky v ukotvení, tak vlastní teploty aparátu a tomu odpovídající délková dilatace. Lze konstatovat pouze 10 % deformaci v porovnání k mosazným tmelkám. Je možno předpokládat, že aparát osazený novými kombinovanými tmelkami by výrazně přispěl k možnosti úspěšné automatizace tmelicích operací.

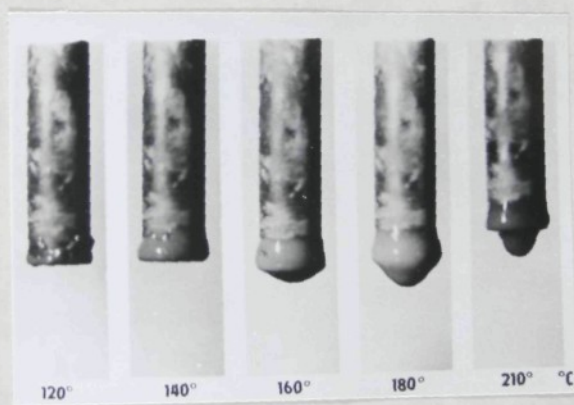
4.4. Optimální teplota tmelky při rozhodujících fázích tmelicího procesu.

Znalost optimální teploty tmelky při jednotlivých fázích technologické operace je rozhodující podmínkou pro efektivní tmelicí stroj. Aby výzkum prováděný v předcházejících kapitolách měl k dispozici reálné údaje o technologických teplotách, bylo provedeno několik informativních měření k jejich získání. Poněvadž to nebylo cílem práce, neboť tyto hodnoty měly být v zadání úkolu, neměla by tato kapitola být považována za ucelený obraz objektivní skutečnosti v celém rozsahu vyráběného sortimentu, ale pouze jako metodologický návod k dalšímu výzkumu.

4.4.1 Nabírání tmelu .

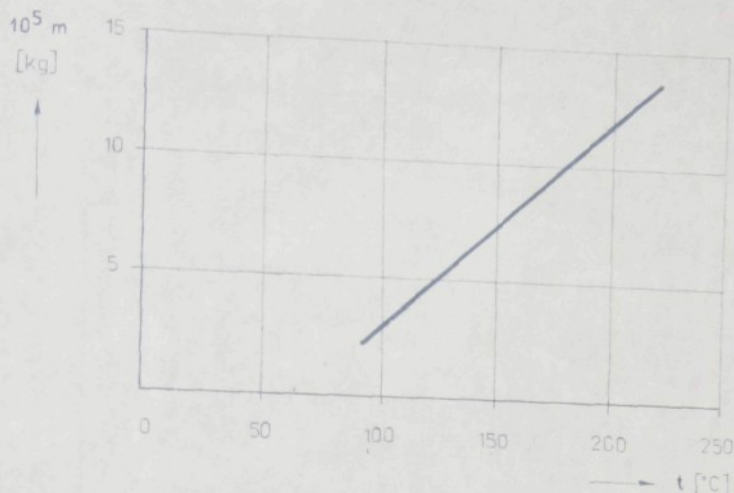
Lze předpokládat, že teplota kalíšku tmelky bude

mít přímý vliv na množství naⁿneseného tmelu. Měřením byla tato závislost prokázána. Při ponoření obrátých tmelek tmelu dochází ke složité výměně tepla mezi tmelkou a prvkovým tmelem, který se postupně natavuje, při-čemž dochází k rychlejšímu poklesu teploty tmelky. Pro kvalitu natmelení není sice nutno dosáhnout co nejpřesnější teploty, ale opakované nanášení většího množství tmelu než je technologická potřeba, vede k neekonomickému plýtvání tmelem a k potřebě intenzivnějšího čištění tmelek. Naměřené výsledky jsou uvedeny na obr.4.33 a obr. 4.34.



Obr. 4. 33. Pohled na tmelku po sebrání tmelu za různých teplot

Ø tmelky : 8 mm
 tmel : 23 % šelak, 32 % kalafuna,
 45 % plevaná křída



Obr. 4. 34. Hmotnost tmelu na tmelce v závislosti na teplotě tmelky při nabírání tmelu

Ø tmelky : 8 mm

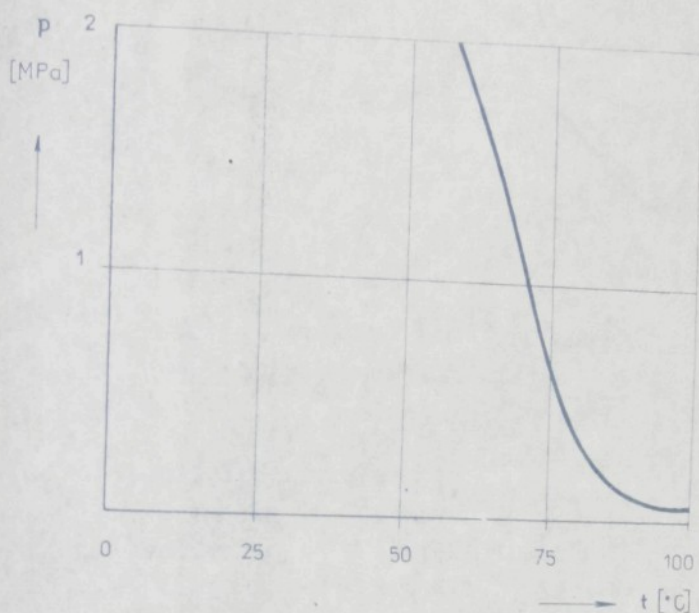
tmel : 23 % šelak, 32 % kalefuna,
45 % plavená křída

4.1.2. Nabírání suroviny a domačkování.

Požadavek na dodržení optimální teploty je dán samotnou technologickou funkcí, kde možný teplotní interval je ze strany dolní teploty určen dostatečnou plasticitou a lepivostí tmelu, z horní teploty takovou konsistencí tmelu, při které pevnost přitmelení je větší než tíha suroviny.

Při domačkování je surovina ustavena do požadovaného uspořádání ve vztahu k tmelce. Aby toto ustavení bylo v rámci technologické operace trvalé, musí teplota kalíšku tmelky t.j. i teplota tmelu být nižší než teplota, při které může dojít k posuvu (plavání) suroviny. Rozhodující

pro určení uvedené teploty je závislost pevnosti přitmelení na teplotě, tak jak je uvedena na obr. 4.35 a 4.36.



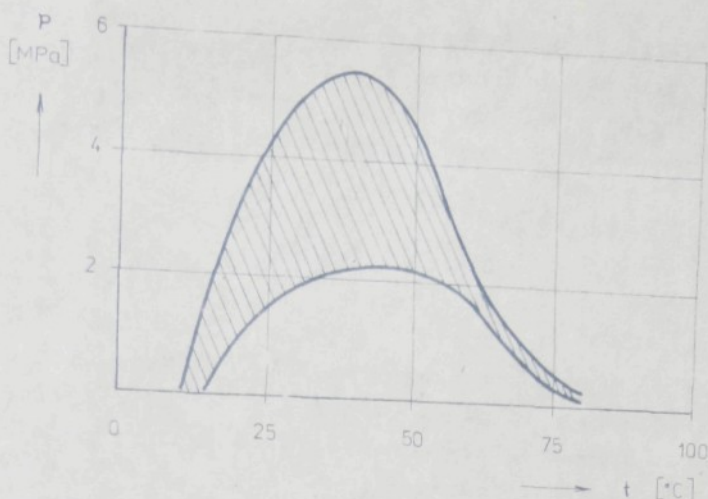
Obr. 4. 35. Pevnost přitmelení v závislosti na teplotě tmelky

ocelová tmelka

Ø tmelky : 8 mm

surovina : perle 8

tmel : 23 % šelsk, 32 % kalafuna,
45 % plavená křída



Obr. 4. 36. Pevnost přitmelení v závislosti na teplotě tmelky

hliníková tmelka

Ø tmelky : 20 mm

surovina : hlavička LH 40

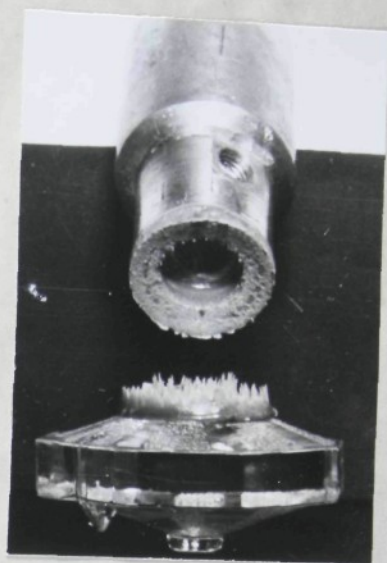
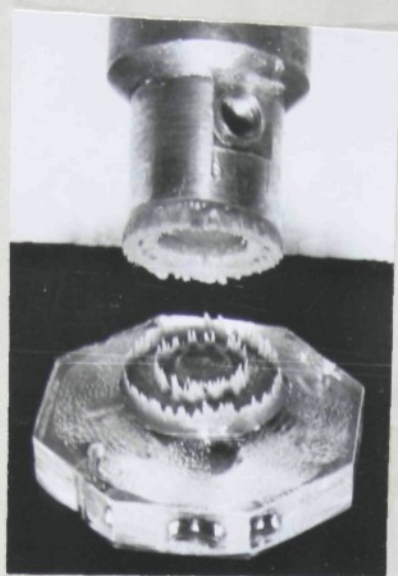
tmel : 23 % šelak, 32 % kalafuna,
45 % plavená křída

Z orientačního měření vyplývá, že při teplotě tmelky menší než 60°C je surovina, nebo vybroušený kámen dostatečně pevně k tmelce přichycen a v žádné poloze tmelky není nebezpečí odpadnutí nebo posunutí kamenů. Na obr. 4. 36. je navíc teplotní závislost pevnosti přitmelení a teploty tmelky sledována k podstatně nižším teplotám. Dochází zde v rozmezí teplot 25 - 50°C k výraznému zvýšení pevnosti přitmelení, ale s poměrně velkým rozptylem, který nebyl v rámci této práce dále analysován. Významný je však pokles pevnosti přitmelení při teplotách pod 25°C, blížeící se strmu k nulové hodnotě mezi 10 - 15°C. Rovněž tento jev není dále v práci analysován a lze se domnívat, že je to způsobeno změnou fyzikálních vlastností tmelu, nebo rozdílnou

tepelnou roztažností hliníkové tmelky a skla. Reálnější je druhá možnost, neboť vliv snížení teploty na pevnost přitmelení bagety 5/2,5 ; navety 8/4 a navety 15/7 na mosazných tmelkách nebyl při kontrolním měření pozorován.

4.4.3. Přetmelení a odtmelení

Optimální teploty při přetmelování jsou ve své podstatě závislé na zákonitostech popsaných v předešlé kapitole a teoreticky v kapitole 3.1.1. Pro tmel uváděného složení, jsou důležité teploty v rozsahu 60 - 80°C. V tomto intervalu teplot se rychle mění pevnost přitmelení. Je tudíž žádoucí, aby v okamžiku oddálení aparátů při přetmelování byla teplota tmelky předávající kámen větší než 80°C a teplota tmelky přebírající kámen nižší než 60°C. Jak je z grafu závislosti teploty tmelky a pevnosti přitmelení patrné, lze tento interval výrazně zúžit ze cenu zvýšené kontroly technologického děje. Toto však lze doporučit pouze u ručního přetmelování, nikoliv u automatických strojů. Existuje zde nebezpečí, že sice spad do stroje bude i při zúženém intervalu teplot malý, avšak může docházet k nepřesnému přetmelení, s tím i k nepřesně vybroušeným kamenům. Čím více se bude interval teplot zužovat, tím častěji bude docházet k oboustranně plastickému upevnění kamenů, což je nežádoucí. Chování tmelu mezi teplotami 70-80°C je zachyceno na obr. 4.37, kde je zřetelně znatelné jakési "povytažování kamene" poměrně značnou silou (20 - 100 N). Při přetmelení povytažený kámen může být v další fázi bezpečně vybroušen, ovšem jeho geometrie bude vadná. Měření pevnosti přitmelení bylo prováděno klidně působící silou, jejíž směr a působíště byly totožné s podélnou osou tmelky.



Obr. 4. 37. Pohled na tmelku a kámen po odtržení při teplotě 75°C .

Optimální teplotu při odtmelení je možno určit z pře-
dešlého odstavce. Interval možných teplot je zdola ohrani-
čen teplotou minimálně 80°C při mechanickém snímání obou-
stranně vybroššeného kamene, případně vyšší než 100°C u
kamenů, které mají odpadnout vlastní tíhou. Pro automati-
zovaný provoz není tato varianta doporučována pro malou
míru jistoty, že kámen vlastní tíhou skutečně odpadne.
Shora není interval teplot omezen, nemělo by však dochá-
zet k přepalování tmelu.

4.4.4. Poloha tmelek při ohřevu, zviditelnění pla-
mene hořáku, tvar povrchu tmelky, vliv času
na pevnost přitmelení

Vedle orientačních hodnot optimální teploty tmelky

se autor zabýval několika dalšími často diskutovanými problémy. Mezi ně patří poloha tmelek při ohřevu. Z příložených záznamů (obr. 4.38 a 4.39), pořízených zviditelněním proudění při ohřevu plamenem, je zřejmé, že svislá poloha tmelek, kde aparát je nad tmelkou, je zcela nevýhodná, neboť dochází vlivem přirozené konvekce k jeho nežádoucímu ohřevu. To platí jak pro odtmelení, tak zvláště pro přetmelení.



Obr. 4.38. Ohřev horní tmelky při svislém přetmelení



Obr. 4.39. Ohřev dolní tmelky při svislém přetmelení

Na obr. 4.40. je dokumentována výhodnost vodorovné polohy tmelek při ohřevu, kdy aparát je zcela mimo dosah plamene i přirozené cirkulace ohřátého vzduchu.

Při konstrukci stroje je nutno, aby si konstruktér uvědomil, že dosah "plamene", i když lidskému oku neviditelného, je při běžných výkonech 20 - 40 cm, jak ukazují obr. 4.41, 4.42, 4.43.



Obr. 4.40. Ohřev tmelky při
vodorovném pře-
tmelování



Obr. 4.41. Tvar plamene za trys-
skou, měřítko 1 : 1



Obr. 4.42. Tvar plamene
10 - 20 cm od
trysky



Obr. 4.43. Konec "neviditelného"
plamene ve vzdálenos-
ti 20-40 cm od trysky

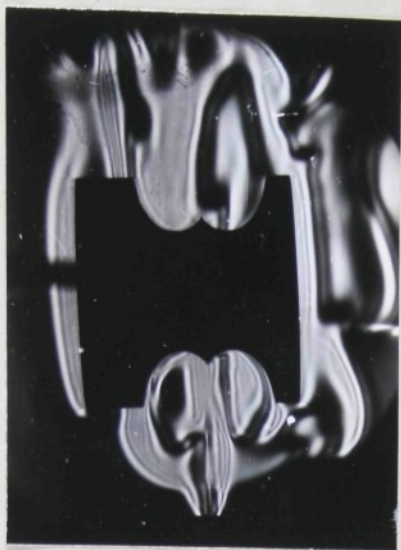
Při měření účinnosti přestupu tepla byl jako proměnná veličina uvažován tvar povrchu tmelky. Byla kalorimetricky proměřena řada variant a pořízeny záznamy obtékání kapaliny (obr. 4.44 - 4.48). Na obrázcích, které představují zviditelnění isothermických ploch t.zv. teplotních polí je zřejmé, že hladký kruhový povrch tmelky je pro přestup tepla mezi plamenem a tmelkou nejvýhodnější, neboť uspořádané, husté isothermy představují maximální gradient teploty, a tím i maximální přestup tepla.



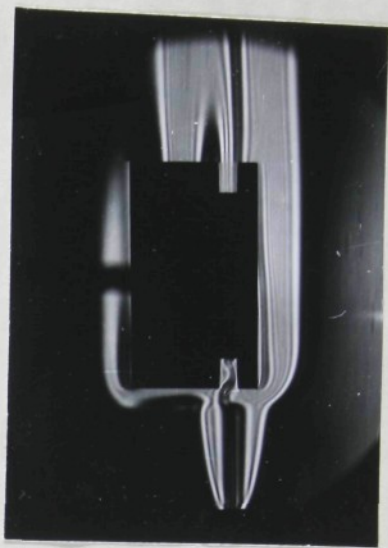
Obr. 4.44. Obtékání kruhové
hladké tmelky
měř. 1 : 1



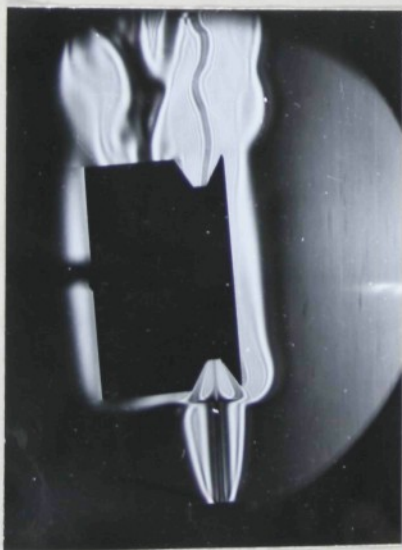
Obr. 4.45. Obtékání tmelky
s mělkou drážkou
měř. 1 : 1



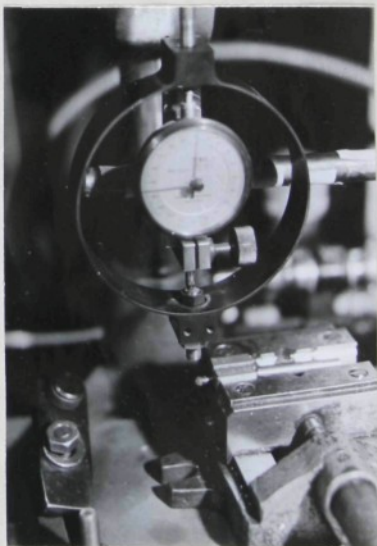
Obr. 4.46. Obtékání tmelky
s hlubokou dráž-
kou, měř. 1 : 1



Obr. 4.47. Obtékání tmelky
s úzkou rovnoběžnou
drážkou, měř. 1 : 1



Obr. 4.48. Obtékání tmelky
s rozšířenou dráž-
kou, měř. 1 : 1



Obr. 4.49. Měření pevnosti
přitmelení

V rámci výzkumné činnosti byl dále sledován vliv času na pevnost přitmelení. Po dohodě s pracovníky závodu 05 Liberec, byly vytypovány a přeměřeny pevnosti sortimentu Bageta 5/2,5; Naveta 8/4 a Naveta 15/7 bezprostředně po natmelení, po osmi hodinách, po třech dnech a po sedmi dnech. Ani v jednom případě nebyla zjištěna časová závislost pevnosti přitmelení. Měření bylo prováděno vylamováním kamenů klidně působící silou ve směru kolmém na podélnou osu tmelky (viz obr. 4.49.).

~~Obr. 4.49. Měření pevnost přitmelení~~

5. DOPORUČENÍ K DALŠÍMU VÝZKUMU.

Během zpracování výzkumné práce vyvstaly před řešitelem problémy, kterým by podle názoru autora měla být věnována další pozornost. Ukázalo se, že řada technologických parametrů, včetně jejich vlivu na tmelicí operace, je zatím nedostatečně identifikována a objektivně vyjádřena v SI soustavě.

Autor doporučuje dále sledovat následující okruh problémů :

- a) možnost aplikace hořáku se samočinně regulovatelným příkonem v závislosti na čase
- b) rozšíření informativních měření prováděných v této práci na celý sortiment výrobků
- c) analyzovat vliv zrnitosti tmelu na tmelicí operace a tomu podřídít zdrobňování tmelu
- d) věnovat zvýšenou pozornost možnosti nabírání již roz-taveného tmelu
- e) věnovat zvýšenou pozornost tmelům s výrazně nižším bodem tání a jejich zkoušení v provozu provádět zásadně až po zjištění všech technologických parametrů a tomu podřídít provozní zkoušku
- f) novou konstrukci kombinované tmelky neaplikovat pouze na stávající systém aparátů; konstruovat aparáty s podstatně zesíleným vedením tmelky, zvláště pro sortiment

větších kamenů. V souvislosti s tím autor doporučuje považovat rekonstrukci aparátů na větší sortiment pouhým osazením větších nástavců za jev přechodný a nežádoucí

- g) analyzovat další případné vlivy na polohu tmelek při tmelících operacích, přičemž věnovat zvýšenou pozornost vodorovné poloze tmelek vzhledem k výhodnosti této polohy při ohřevu
- h) věnovat zvýšenou pozornost nejen řízení ohřevu tmelky, ale i řízení ochlazování pomocí stlačeného vzduchu, vzhledem k vazbě těchto dějů při přetmelování
- i) pro zkrácení kroku tmelicího stroje sledovat možnost rozdělení ohřevu do dvou, či více kroků stroje, případně splikovat předehřívání tmelky na vstupu do tmelicího stroje
- j) na základě křivek ohřevu a chladnutí stanovit ve vztahu k teplotě tání tmelu pro jednotlivé průměry tmelek optimální délku časového kroku tmelicího stroje ΔT .

LITERATURA

- 1/ Balaškin, B.C. : Osnovy technologii mašinostrojeniji
" Mašinostrojenje " 1969
- 2/ Muminov, N.A. : Metody kibernetiki v issledonii
obrabotki metallov rezaniem.
Taškent 1975
- 3/ Dinkelbech, W. : Analýza senzitivity a parametrické
programovanie.
Bratislava: Alfa 1973
- 4/ Tsien, H.S. : Technická kybernetika.
Praha: SNTL 1960
- 5/ Šalemon, M. : Matematika pro regulaci a automa-
tisaci. Praha : SNTL 1957
- 6/ Strejc, V., Šalemon, M., Kotek, Z., Balda, M. :
Základy teorie samočinné regulace.
Praha: SNPL 1958
- 7/ Technologické procesy v strojárstve, ich identifi-
kácia a automatizácia (Sborník zväzok 1)
Strojní fakulta VŠT Košice 1975
- 8/ Dráb, V. : Technologie I (skriptum)
Liberec:VŠST 1979
- 9/ Konference o teorii strojů a mechanismů (Sborník
prací) Liberec : Elitex 1976
- 10/ Pitra, Z. : Projektování ASŘ výroby
(Programní učební texty)
Liberec: VŠST 1978

- 11/ Šorin, S.N. : Sdílení tepla. Bratislava 1968
- 12/ Michejev, M.A. : Základy sdílení tepla. Praha 1952
- 13/ Gröber, H. : Wärmeübertragung. Berlín 1961
- 14/ Kalčík, J., Sýkora, K. : Technická termomechanika. Praha 1973
- 15/ Šindelář, V. : Měření teploty. Praha 1955
- 16/ Manson, S. : Temperaturnyje naprjazhenija. Moskva 1974
- 17/ Hujer, I., Koňářík, Patočka, J. : Elektrotmelnička II. - aplikace ohřevu tmelek. (Úvodní studie výzkumného úkolu) Jablonec n.N. : VÚSAB 1977
- 18/ Koucký, J., Rakouš, V., Valapka, J. : Tmely (Závěrečná zpráva) Jablonec n.N. : Preciosa k.p. 1974
- 19/ Tomeš, M. : Stanovení nejvýhodnějšího strojního zařízení pro automatickou výrobu tvarových kamenů. (Úvodní studie) Jablonec n.N. : Preciosa k.p.
- 20/ Patočka, J. : Nestacionární sdílení tepla při tmelení a přetmelování. Liberec : VŠST 1979
- 21/ Dušil, J. : Aparáty. (Závěrečná zpráva úkolu) Jablonec n.N. : VÚSAB 1972
- 22/ Kasrlay, G., Eger, D. : Teploprovednost tverdyh tel. Moskva : Nauka 1964
- 23/ Bird, B.R., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N. : Přenosové jevy. Praha : Academia 1968

- 24/ Vargraftik, H.B. : Spravočník po teplofizičeskím
svojstvám gazov i židkostěj.
Moskva : Nauka 1972
- 25/ Steidl, H., Neužil, L., Fořt, I., Vlček, J. :
Úvod do prodění tekutin a sdílení
tepla. Praha : Academia 1975
- 26/ Kremer, R., Obroučka, K. : Ohřev kovů.
Praha : SNTL 1974
- 27/ Schill, F. : Chlazení skla.
Praha : SNTL 1955
- 28/ Walla, V. : Slitinové konstrukční oceli.
Praha : Práce 1954
- 29/ Jareš, V. : Metalografie ocele.
Praha : Academia 1960
- 30/ Vjaznikov, I.F. : Legirovannaja stal.
Moskva : Metallurgizdat 1963
- 31/ Jareš, V. : Ocel. Praha : SNTL 1962
- 32/ Brázda, B. : Návrh konstrukčních úprav brousi-
cího stroje BK pro výrobu velkých
lustrových ověsů. (Diplomová prá-
ce) Liberec : VŠST 1979
- 33/ Hercík, V. : Přesnost válcových strojů - 2.
(Závěrečná zpráva podnikového
vývojového úkolu)
Jablonec n.N. : Preciosa k.p. 1978
- 34/ Ivancov, G.P. : Nagrev metalla. Moskva-Sverdlovsk:
Metallurgizdat 1948
- 35/ Bechar, U. : Der Gassbrenner. Berlin :
VEB Verlag Technik 1957

- 36/ Kazancev, E.J. : Promyšlennye peči.
Moskva : Metallurgija 1964
- 37/ Pat. ČSSR 190 186. Ing. J. Patočka, Tmelka pro
broušení skleněných kmenů.

V 148/1
+ příloha

R - 231/82 31.V. 82

VŠST Liberec

U 148/2

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

Katedra energetických zařízení

REV
17. října 1982

E F E K T I V N O S T T M E L I C Í H O
P R O C E S U

Doplňk ke kandidátské disertační práci

Vedoucí katedry : Prof. Ing. J. Šintůk, CSc

Školitel : Prof. Ing. J. Mayer

Zpracoval : Ing. Josef Patočka

J. Patočka

Květen 1982

O B S A H

Úvod	3
a) Formální podklady pro vypracování doplňku kandidátské disertační práce	
b) Upřesnění a vyjasnění požadavků oponentů na obsah doplňku ke kandidátské disertační práci	
c) Přiřazení doplňku k vlastní kandidátské disertační práci	
1. Seznam použitých označení v kandidátské disertační práci a v doplňku	5
2. Přehled o současném stavu řešené pro- blematiky	8
3. Cíl disertace	10
4. Teoretické řešení	12
4.1 Popis fyzikálních vztahů	13
4.1.1 Výpočet součinitele přestupu tepla	19
4.2 Ohřev tmelky	24
5. Závěr	30
Doplňek k literatuře	
Seznam oprav ke kandidátské disertační práci	

Ú V O D

- a) Formální podklady pro vypracování doplňku kandidátské disertační práce

Kandidátská disertační práce "Efektivnost tmelícího procesu" byla zakončena a předána v dubnu 1981 komisi pro obhajoby v oboru 39 - 02 - 9. Rozhodnutím této komise ze dne 15. 9. 1981 bylo autorovi uloženo vypracovat doplněk ve smyslu připomínek Prof. Ing. Dr. Vladimíra Enenkla, DrSc a dalších oponentů s termínem předložení do 31. 12. 1981. Na žádost autora kandidátské disertační práce byl termín předložení doplňku prodloužen do konce května 1982. Důvodem k podání žádosti o prodloužení termínu o odevzdání dodatku kandidátské práce byly nové úkoly vyplývající autorovi, jako spolužadatelé o udělení autorského osvědčení, z prací na vývoji a realizaci poměrového měření tepla v bytové oblasti. Tento úkol je realizací vládního usnesení č. 292 z prosince 1980, podle kterého mají být od roku 1983 osazována poměrovými měřiči tepla všechna topná tělesa nově odevzdávaných bytů a od roku 1987 veškerá tělesa v ústředně vytápěných bytech.

- b) Upřesnění a vyjasnění požadavků oponentů na obsah doplňku ke kandidátské disertační práci

Na základě doporučení odborné komise autor kandidátské disertační práce vypracoval doplněk k některým bodům své práce. Zvláště byla náplň doplňku konzultována s oponentem Prof. Ing. Dr. Enenklem, DrSc, který měl k práci nejzávaž-

nější připomínky v oblasti používání technických termínů a v oblasti teoretického popisu dané problematiky. Oponentem bylo doporučeno důsledné dodržování normou stanovených technických názvů s příslušnými rozměry, jednoznačné stanovení cíle řešení, přesné teoretické popsání dějů a faktorů, které tyto děje ovlivňují, včetně určení hraničních podmínek, zvláště těch, které tmelící operace limitují ve vztahu ke stabilitě technologického procesu a kvalitě výrobků.

c) Přiřazení doplňku k vlastní kandidátské disertační práci

Doplňek ke kandidátské disertační práci není samostatným materiálem, ale je zpracován tak, aby byl součástí vlastní kandidátské práce. Rovněž jednotlivé kapitoly doplňují původní práci buď o zdůvodnění některých postupů řešení, nebo prohlubují původní zpracování hlavně teoretické části. V doplňku je nově použito nebo upřesněno vyjádření některých pojmů z oboru mechaniky tekutin a termomechaniky, termokinetiky a matematiky, tak, jak bylo doporučeno oponentem Prof. Ing. Dr. Enenklem, DrSc. Součástí doplňku je list oprav a závěr celé kandidátské práce.

1. SEZNAM POUŽITÝCH OZNAČENÍ V KANDIDÁTSKÉ
DISERTAČNÍ PRÁCI A V DOPLŇKU KE KANDIDÁTSKÉ
DISERTAČNÍ PRÁCI

A_D	/ m /	rozměr dynamického nastavení děje
A_S	/ m /	stav statického nastavení děje
A_u	/ m /	nastavení děje
A	/ m /	výsledek děje
F	/ Kčs /	hodnotová forma fondů
F	/ m ² /	teplosměnná plocha
F	/ m ² /	průřez
H	/ J m ⁻³ /	výhřevnost plynu
N_A	/ Kčs /	náklady na automatizovanou výrobu
N_R	/ Kčs /	náklady na ruční výrobu
P	/ W /	výkon, tok energie
P		přínos automatizace
Q	/ Kčs s ⁻¹ / / s ⁻¹ /	velikost produkce
Q'	/ Kčs s ⁻¹ /	teoretická kapacita výrobního zařízení
R	/ m /	poloměr
S	/ m ² /	plocha
T	/ K /	absolutní teplota
V	/ m ³ s ⁻¹ /	objemový průtok plynu
Z	/ s /	mažetví práce
a	/ m ² s ⁻¹ /	součinitel tepelné vodivosti
b	/ m /	charakteristický rozměr
c	/ J kg ⁻¹ K ⁻¹ /	měrná tepelná kapacita
k	/ kg m ⁻² /	součinitel tvaru tělesa
ϕd	/ m /	průměr
f	/ J m ⁻² s ^{-0,5} K ⁻¹ /	součinitel tepelné setrvačnosti
l	/ m /	délka, charakteristický rozměr
m	/ kg /	hmotnost
p	/ Pa /	tlak
r	/ m /	poloměr
s	/ m /	tloušťka stěny

s		stupeň využití teoretické kapacity
q	/ W m ⁻² /	měrný tepelný tok
t	/ °C /	teplota
t _p	/ °C /	teplota tání tmelu
u		účinnost fondů
u ₁ , u ₂ , ... u _k		množina řídicích povelů
v	/ Kčs /	fondová vybavenost
w	/ Kčs s ⁻¹ / / s ⁻¹ / / Ns s ⁻¹ /	produktivita práce
x, y, z	/ m /	pravoúhlé souřadnice
x ₁ , x ₂ , ... x _n		množina vstupních proměnných veličin
y		výsledek děje
D	/ m /	odchylka dynamického nastavení děje
'D	/ m /	kompensace odchylky dynamického nastavení děje
l	/ m /	podélné prodloužení
s	/ m /	odchylka statického nastavení děje
t	/ K /	teplotní rozdíl
α	/ ° /	úhel
α	/ W m ⁻² K ⁻¹ /	součinitel přestupu tepla
β	/ ° /	úhel
β	/ K ⁻¹ /	izobarický součinitel objemové roztažnosti
ε _α , ε _ψ		poměrná změna účinnosti
φ	/ ° /	úhel
η		účinnost
λ	/ W m ⁻¹ K ⁻¹ /	součinitel tepelné vodivosti
ρ	/ kg m ⁻³ /	měrná hustota
τ	/ s /	čas
Δτ	/ s /	krok tmelicího stroje
γ	/ m ² s ⁻¹ /	kinematická viskozita

$$Fo = \frac{a \tau}{x^2} \quad \text{Fourierovo číslo}$$

$$Gr = \frac{\beta d^3 \Delta t}{\gamma^2} \quad \text{Grashofovo číslo}$$

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$$

Nusseltovo číslo

$$Bi = \frac{\alpha b}{\lambda}$$

Biotovo číslo

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

Prandtlovo číslo

2. PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Strojní výroba broušených bižuterních kamenů má v našem státě mnohaletou tradici. Její ekonomický přínos pro národní hospodářství byl vždy významný. V současné době je tento obor hodnocen jako velmi perspektivní, zvláště s ohledem na surovinovou základnu a možnost výhodného vývozu na kapitalistické trhy. V období intenzivního budování a rozvoje strojírenství, byly průmyslu bižuterie věnovány relativně malé prostředky jak v oblasti investic, tak v oblasti vědecko-technického rozvoje. Zřejmě k tomu přispělo i historicky vzniklé lokální soustředění výrobních podniků do některých okresů severočeského kraje, bez vazby na vědecko-výzkumnou základnu. Tím se tento průmysl rozvíjel hlavně na bázi empirických poznatků. V současné době se většina fyzicky náročných operací provádí ručně. Zvláště tmelicí operace sloužící k pevnému uchycení skleněného polotovaru na čelo kovové válcové tyčinky, sloužící jako držák při broušení a leštění. Zvýšení produkce strojně broušených bižuterních kamenů se neobejde bez mechanizace a automatizace. V posledních letech byla provedena řada pokusů vyvinout automatizovaný tmelicí stroj, který by nahradil lidskou práci. Při této snaze se objevila tendence pouze nahradit lidské ruce napodobením jejich úkonů, bez přihlídnutí k tomu, že pracovník při ruční práci se jednotlivé úkony učí, získává praktické zkušenosti a technologický děj současně ovlivňuje směrem k žádanému výsledku. Vytváří tak těžko napodobitelnou syntézu. Každá snaha o napodobení ruční práce pomocí automatu bude úspěšná jenom teh-

dy, když není požadována "zpětná vazba" mezi průběhem technologického děje a jeho řízením. Povaha tmelicích operací však v každém případě vyžaduje kontrolu děje buď trvalou, tak jak ji provádí pracovník při ručním tmelení a přetmelování, nebo občasnou, jak ji provádí seřizovač u strojů poloautomatických a automatických. Dosavadní konstrukční řešení tmelicích strojů je poplatno tomu, že konstruktéři nemají k dispozici základní údaje o fyzikálních dějích, které probíhají v jednotlivých fázích technologického procesu. Neexistuje ucelená koncepce, která by usměrňovala vědecko-výzkumnou činnost v daném oboru k získání kvalitativních i kvantitativních vazeb mezi jednotlivými proměnnými vstupními veličinami. Neexistuje literatura, která by rozhodující proměnné veličiny na př. teplotu tmelky v jednotlivých fázích tmelení určovala ve vztahu k složení jednotlivých tmelů. V ČSSR se touto problematikou nikdo komplexně nezabýval. Pokud jsou prováděny výzkumy v rámci jednotlivých útvarů a podniků koncernového podniku PRECIOSA, jsou ve velké většině poplatny historicky vzniklému empirickému přístupu a postrádají objektivní výsledky použitelné při vývoji a konstrukci nového tmelicího stroje. Mimo ČSSR vyrábí ve větším rozsahu stroje broušené kameny firma Svarovský v Rakousku. Rakouský výrobce podle sdělení pracovníků koncernového podniku Preciosa zásadně žádné výsledky činnosti v tomto oboru neuvádí a nepublikuje.

Nejslabším článkem vědecko-výzkumné činnosti v oblasti tmelicích operací jsou problémy termokinetiky se všemi potřebnými vazbami jak na fyzikální vlastnosti aplikovaných materiálů, tak na vlastní průběhy fyzikálních a chemických procesů. Jedině teoretické zvládnutí podstaty všech dějů a vlivů, které tyto děje determinují, a jejich experimentální ověření dá podklady pro určení koncepce vývoje oboru a podklady pro vývoj a konstrukci spolehlivého tmelicího stroje, schopného ekonomicky nahradit ruční práci jak po stránce kvality, tak kvantity produkce. Přes nedostatek konkrétní

literatury ve vlastním oboru, je možno při vědecko-výzkumné práci aplikovat obecnější zákonitosti z termokinetiky, termodynamiky a nauky o proudění. V práci použitá literatura je uvedena v závěru. Řada údajů čerpaných z literatury není zvlášť komentována a zdůvodňována, ale jsou provedeny příslušné odkazy.

3. CÍL DISERTACE

Vývoj nových strojů a automatů v oboru výroby skleněné bižuterie je nutnou podmínkou pro snížení podílu namáhavé lidské práce a zvýšení produktivity práce. Je však podmíněn dokonalou teoretickou i praktickou znalostí všech fyzikálních i chemických dějů, které se v průběhu tmelicích operací uskutečňují a znalostí vlivu proměnných veličin na výsledek technologického procesu. Dosavadní poznatky vycházejí z empiricky stanovených podmínek tmelení, které jsou na různých provozovnaích zpravidla známé seřizovačům a technologům, postrádají však objektivní rozměrové vyjádření v SI soustavě. Cílem práce je přispět k poznání fyzikálních vztahů a závislostí, které v oboru tmelicích operací nejsou dostatečně zpracovány a o nichž lze předpokládat, že mají konkrétní objektivní charakter. Tento záměr je rozsáhlý, neboť spojuje v sobě problémy z několika vědních disciplín. Vedle zákonů termokinetiky, jejichž aplikace na sledovaný problém má dát základ pro vývoj kvalitativně nových konstrukčních prvků, bude nutno úměrně použít i zákonitostí z oboru nauky o materiálu, pružnosti a pevnosti, proudění plynů a dalších.

Záměr autora bude převážně soustředěn na operaci

přetmelení, která svojí problematikou zahrnuje všechny prvky tmelicího děje a navíc se jeví při automatizaci nejproblematičtější, neboť určuje rychlost stroje a kvalitu výrobků. Vzhledem k uvedené šíři bude v práci sice proveden výzkum celé řady fyzikálních závislostí, ale budou provedena maximální zjednodušení, která však nevnesou do výsledků práce kvalitativní chybu.

Hlavním cílem kandidátské disertační práce je :

- a) určení rozhodujících proměnných veličin tmelicích operací
- b) teoretický rozbor operace přetmelení
- c) rozbor vlivu materiálu a konstrukce tmelky na kvalitu výrobků
- d) optimalizace ohřevu tmelky
- e) návrh nových konstrukčních prvků

4. TEORETICKÉ ŘEŠENÍ

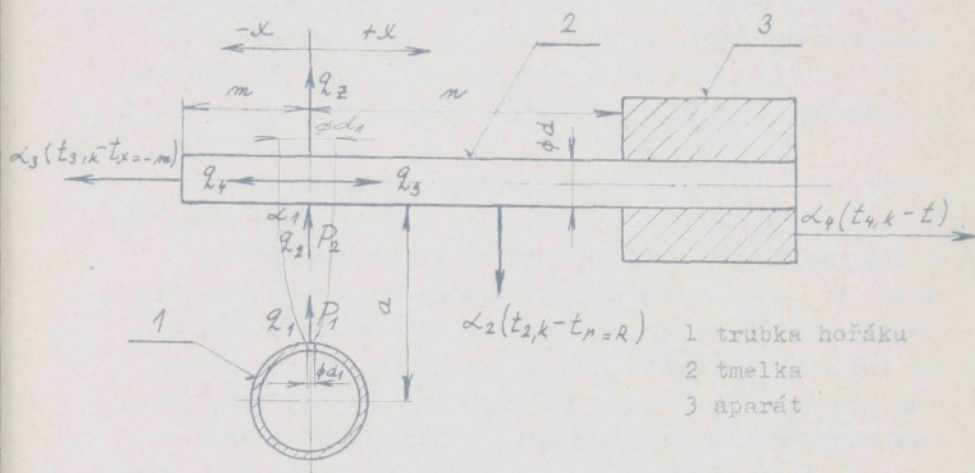
Tmelicí operace předatavují řadu problémů zahrnujících různé vědní disciplíny. Nejdůležitější z nich je sdílení tepla, které se rozhodující mírou podílí na realizaci technologického děje. Optimální teplota jednotlivých funkčních částí předurčuje spolehlivost, stabilitu a přesnost výroby. V teoretické části je proveden rozbor vlivu jednotlivých proměnných veličin, vyplývajících z matematického popisu dějů. Teoretický výzkum tmelicích operací nebyl z hlediska sdílení tepla dosud prováděn. Veškeré snahy o zvládnutí této problematiky byly založeny na dlouholetých empirických poznatcích jednotlivých pracovníků oboru. Z tohoto důvodu nemohl autor pro číselný výpočet použít tak důležité údaje, jako je výše teploty tmelky v jednotlivých fázích tmelicích operací, součinitel přestupu tepla mezi plamenem a tmelkou a řadu dalších. Protože se teoretický výpočet bez těchto údajů nedá uskutečnit, byl autor nucen s větší či menší přesností si řadu veličin teoreticky odvodit, nebo prakticky proměřit. Teoretický výpočet může být zatížen vlivem nepřesných vstupních dat značnou chybou, která se sice projevuje na kvantitativních výsledcích děje, ale neovlivňuje možnost formulovat správné kvalitativní závěry. V práci bylo nutno přijmout řadu zjednodušení, zvláště u problému nestacionárního sdílení tepla, aby teoretické řešení bylo vůbec možné. Zjednodušení, která jsou v práci prováděna, nejsou v celém rozsahu zdůvodňována, ale jsou prováděna odkazy buď na vlastní výzkumné práce nebo na literaturu. Řada zjednodušení např. z oboru termokinetiky je autorem považována za běžně známá a nejsou zvláště zdůvodňována.

4.1. Popis fyzikálních vztahů

Na obr. 4.1. je znázorněno geometrické uspořádání tmelky, včetně zakotvení do aparátu, a hořáku. Ve vztahu k funkci tmelky je rozhodujícím faktorem teplota čela tmelky, t.zv. kalíšku, ve kterém je přitmelena broušený kámen. Podružným faktorem jsou teplotní pole uvnitř tmelky a teplota v místě ukotvení tmelky do aparátu. Již v této fázi teoretického řešení je nezbytné přesně specifikovat výchozí stav a řešení podříditi cíli práce. S odkazem na vlastní výzkumné práce / 17, 20 / jsou za výchozí známé údaje považovány tyto: ohřev tmelek je prováděn plynovým trubkovým hořákem, skládajícím se ze směšovače svítiplynu a primárního vzduchu a hořákové tenkostěnné trubky kruhového nebo obdélníkového průřezu. Výtokové trysky jsou vrtány v řadě, kolmo na podélnou osu hořáku, s roztečí odpovídající zpravidla roztečí tmelek příslušného aparátu. U větších sortimentů broušených kamenů je na jednu rozteč výtokových trysek několik. Hořák se zapíná cyklicky ve sledu pracovních operací. Zapalování se provádí trvale hořícím plamenem. Seřizování výkonu hořáku i vzájemného poměru svítiplynu a vzduchu je ruční, podle vizuální kontroly obsluhy. Vrtání trysek - průměr 1 až 1,5 mm.

Z hlediska termodynamiky lze děj popsat jako tok energie mezi trubicí hořáku 1, tmelkou 2, aparátem 3 a okolním prostředím. Místo pojmu tok energie P / W je vhodnější pro sledovanou problematiku používat pojem měrný tepelný tok energie $q / W \text{ m}^{-2}$ /. Tento výraz je ve vztahu k různým průměrům tmelky obecnější.

Měrný tepelný tok energie q_1 vystupující z trubky hořáku se dělí na tok q_2 vstupující do tmelky a tok ztrátový q_z . Měrný tepelný tok q_2 , vstupující do tmelky je na počátku ohřevu využíván na zvýšení vnitřní energie tmelky, později i aparátu. Ohřev aparátu je nutno považovat za ne-



Obr. 4.1 Schema ohřevu tmelky

žádoucí. Měrný tepelný tok q_1 je funkcí toku energie P_1 , který závisí na množství protékajícího a spalovaného svítiplynu podle vztahu

$$P_1 = V \cdot H \quad (4.1)$$

kde P_1 / W / je tok energie

V / $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ / objemový průtok plynu

H / J m^{-3} / výhřevnost svítiplynu

Tok energie P_2 je menší než P_1 o ztráty P_z podle vztahu

$$\eta = \frac{P_1 - P_z}{P_1} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (4.2)$$

kde P_z / W / je ztrátový tok energie.

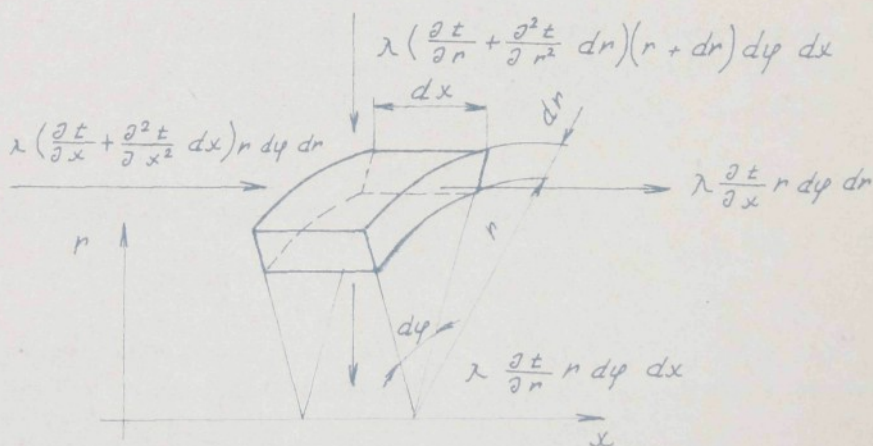
Teplovní pole v tmelce v okamžiku τ je popsáno obecně funkcí

$$t = t(x, y, z, \tau), \quad (4.3)$$

kteřá vyjadřuje třírozměrné nestacionární teplotní pole, které je charakterizováno teplotami v jednotlivých bodech x, y, z v závislosti na čase. Nestacionární třírozměrné teplotní pole je nejobecnější případ teplotního pole. Zvláštním případem jsou nestacionární pole dvourozměrná a jednorozměrná.

Z tepelné bilance sledovaného procesu je odvozena diferenciální rovnice teplotního pole:

a) element tmelky je spolu s příslušnými měrnými tepelnými toky uveden na obr. 4.2. Vzhledem k tomu, že tmelka je obtékáný válec a za předpokladu, že počáteční teploty i podmínky pro přestup tepla jsou souměrné podle osy tmelky, použijeme válcových souřadnic r a x . Element tělesa má tvar výseče dutého válce a osovými rovinami neprochází z důvodu souměrnosti žádné teplo.



Obr. 4.2 Element tmelky při použití válcových souřadnic

Z tepelné bilance elementu plyne

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r} r \, dy \, dx + \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} dr \right) (r+dr) \, dy \, dx -$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} r \, dy \, dr + \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx \right) r \, dy \, dr =$$

$$= c \varrho \frac{\partial t}{\partial \tau} r \, dy \, dr \, dx \quad (4.4)$$

V rovnici je λ / W m⁻¹K⁻¹ / součinitel tepelné vodivosti
tmelky.

c / J kg⁻¹K⁻¹ / měrná tepelná kapacita mate-
riálu tmelky

ϱ / kg m⁻³ / měrná hustota materiálu tmelky

Po vyrušení shodných členů na levé straně rovnice a dělení obou stran rovnice výrazem $\lambda \, r \, dy \, dr \, dx$ získáme diferenciální rovnici nestacionárního vedení tepla ve válcových souřadnicích.

$$\frac{\partial^2 t(r, x, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t(r, x, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 t(r, x, \tau)}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial t(r, x, \tau)}{\partial \tau} \quad (4.5)$$

Tuto diferenciální rovnici je nutno doplnit počáteční podmínkou; v tomto případě vycházíme ze stejné teploty v celém objemu tmelky, takže pro $\tau = 0$ je

$$t(r, x, 0) = t_0 = \text{konst.} \quad (4.6)$$

Dále je nutno doplnit rovnici okrajovými podmínkami, které charakterizují podmínky sdílení tepla na povrchu tělesa. Tyto podmínky se někdy v literatuře nazývají povrchové, nebo hraniční. Z charakteru rovnice plyne, že jde o dvourozměrné teplotní pole, je tudíž nutno určit okrajové podmínky ve dvou

směrech (viz obr. 4.2).

$$\left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$

V intervalu $x = \pm \frac{d_1}{2}$

$$\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=R} = \alpha_1 (t_{1,k} - t_{r=R})$$

V intervalu $-m < x < -\frac{d_1}{2}$

$$\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=R} = \alpha_2 (t_{2,k} - t_{r=R})$$

$$\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{x=-m} = \alpha_3 (t_{3,k} - t_{x=-m})$$

V intervalu $-\frac{d_1}{2} < x < m$

$$\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=R} = \alpha_2 (t_{2,k} - t_{r=R})$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{x=m} = \alpha_4 (t_{4,k} - t) \quad (4.7)$$

v rovnicích značí

α_1 / $W m^{-2} K^{-1}$ / celkový součinitel přestupu tepla mezi plamenem a tmelkou

α_2, α_3 / $W m^{-2} K^{-1}$ / součinitel přestupu tepla mezi tmelkou a okolním prostředím

$t_{1,k} - t_{r=R}$ / K / teplotní rozdíl mezi plamenem a válcovým povrchem tmelky

$t_{2,k} - t_{r=R}$ / K / teplotní rozdíl mezi okolním prostředím a válcovým povrchem tmelky

$t_{3,k} - t_{1,x=-m}$ / K / teplotní rozdíl mezi okolním prostředím a čelem tmelky

$t_{4,k} - t$ / K / teplotní rozdíl mezi okolním prostředím a teplotou aparátu

d_1 / m / ϕ plamene

Diferenciální rovnici nestacionárního vedení tepla lze

- Řešit trojím způsobem: a) analyticky
b) numericky
c) experimentálně

Výhodou analytického řešení je obecná platnost výsledků. Exaktní řešení však nelze provést pro složitější tvary tělesa, pro složitější okrajové podmínky a pro případy, kdy materiálové vlastnosti ohřívaného tělesa jsou závislé na teplotě. Řešení je možno provést, jestliže zanedbáme podřadnější vlivy, např. proměnlivost materiálových vlastností vyjádříme jejich střední hodnotou, zanedbáme tepelný tok v určitém směru proti převažujícímu tepelnému toku, složité těleso nahradíme jednodušším modelem / 39 /. Zjednodušení je možno provést na základě rozboru vlivu jednotlivých okrajových podmínek na výsledek děje. V teorii ohřevu kovů se tělesa dělí na tenká a tlustá se zřetelem k teplotnímu spádu ve sledovaném průřezu. U tenkých těles probíhá ohřev rovnoměrně v celém průřezu a teplotní spád je zanedbatelný. Rozhodující při výpočtech je vnější přestup tepla, charakterizovaný součinitelem přestupu tepla α a teplotním rozdílem mezi okolním prostředím a teplotou povrchu tělesa. U tlustých těles je určitý teplotní spád v průřezu tělesa. Při výpočtech je nutno respektovat nejen vnější, ale i vnitřní sdílení tepla. Teplotní spád není při ohřevu těles dán pouze tloušťkou ohřívaného tělesa, ale i tepelnou vodivostí a rychlostí ohřevu. Proto se těleso velkých rozměrů může chovat jako tenké a naopak. K rozlišení těles na tlustá a tenká se používá Biotova kritéria

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad , \quad (4.8)$$

kde $\alpha / \text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ / součinitel přestupu tepla
 l / m / charakteristický rozměr tělesa
 $\lambda / \text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ / součinitel tepelné vodivosti materiálu tělesa

Při $Bi \leq 0,25$ je těleso považováno za tenké
 $0,25 < Bi < 0,5$ je těleso v oblasti přechodné, v níž se tě-

lesa při přesných výpočtech považují za tlustá, při přibližných výpočtech za tenká

$Bi \geq 0,5$ je těleso považováno za tlusté.

Při teoretickém výpočtu ohřevu tmelek je pro výpočet Biotova kritéria nutno za charakteristický rozměr v průřezu kolmém na osu tmelky považovat poloměr tmelky, takže rovnice (4.8) bude mít tvar

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \frac{d}{2}, \quad (4.9)$$

kde $d / m /$ je průměr tmelky,

v průřezu podélném s osou tmelky má rovnice tvar

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} x, \quad (4.10)$$

kde $x / m /$ je vzdálenost od místa ohřevu tmelky

Součinitele přestupu tepla $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ v okrajových podmínkách (4.7) jsou určeny v další kapitole.

4.1.1 Výpočet součinitele přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla α , mezi plamenem a tmelkou je určen podle vztahu

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s \quad (4.11)$$

kde $\alpha_k / W m^{-2} K^{-1} /$ součinitel přestupu tepla konvekcí
 $\alpha_s / W m^{-2} K^{-1} /$ součinitel přestupu tepla sáláním

Rozdělení přestupu tepla na elementární jevy t.j. konvekcí a sálání je jen teoretické. Ve skutečnosti probíhají tyto jevy současně. V praktických příkladech není vždy ani možné, ani účelné rozdělení těchto složitých jevů na jevy

elementární. Výsledek současného působení několika jednotlivých elementárních způsobů sdílení tepla se obvykle vztahuje na jeden z nich, který považujeme za základní. V našem případě je základním jevem sdílení tepla konvekcí, proto způsob výpočtu je tomuto jevu podřízen. Součinitel přestupu tepla α_k je počítán ze vztahu uvedeného v / 12 /

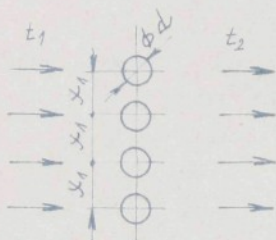
$$Nu = \frac{\alpha_k d}{\lambda} \quad (4.12)$$

odkud

$$\alpha_k = \frac{\lambda Nu}{d} \quad (4.13)$$

$$Nu = c \cdot \varepsilon_m \cdot Re^n \quad (4.14)$$

platného pro řadu trubek, nebo válců příčně obtékaných ohřívacím médiem podle obr. 4.3.



Obr. 4.3 Schema ohřevu tmelek v aparátu

Určovací rozměrem je průměr trubek, určovací teplotou je střední teplota proudu plynu

$$t_u = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (4.15)$$

Řadou experimentálních zkoušek byly různými autory určeny konstanty $n = 0,6$, $c = 1 + 0,1x_1 d^{-1} = 1,2$; $\varepsilon_m = 0,15$. Dosazením do rov. 4.14 dostaneme

$$Nu = 1,2 \cdot 0,15 \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (4.16)$$

a úpravou

$$\alpha_k = 0,18 \cdot \lambda \cdot d^{-0,4} \cdot w^{0,6} \cdot \nu^{-0,6} \quad (4.17)$$

kde α_k / W m ⁻² K ⁻¹ /	součinitel přestupu tepla
λ / W m ⁻¹ K ⁻¹ /	součinitel tepelné vodivosti obtékajícího plynu
d / m /	průměr tmelky
w / m s ⁻¹ /	rychlost obtékajícího plynu
ν / m ² s ⁻¹ /	kinematická viskozita

Určení rychlosti a stupeň turbulence obtékajícího plynu je pro sledovaný případ velmi obtížné, lze pouze dostatečně přesně určit její maximální hodnotu z výpočtu adiabatického průtoku tryskami hořákové trubky v závislosti na tlaku plynu hořákové trubce podle vztahu

$$w = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa-1} r T_1 / 1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad (4.18)$$

kde κ	izentropický exponent
r / J kg ⁻¹ K ⁻¹ /	plynová konstanta
T_1 / K /	teplota plynu v hořákové trubce
p_1 / Pa /	barometrický tlak
p_2 / Pa /	tlak plynu v hořákové trubce

Vyčíslením pro přetlak plynu před tryskou $p = 500$ Pa dostaneme hodnotu

$$w = \sqrt{2 \frac{1,33}{0,33} \cdot 312 \cdot 300 / 1 - \left(\frac{10^5}{1,005 \cdot 10^5} \right)^{\frac{0,248}{1,33}}} = 30,7 \text{ ms}^{-1}$$

kterou lze považovat pro dané podmínky maximální. Skutečné rychlosti jsou podle seřízení hořáku menší.

V tab. 4.1 je vyčíslena velikost součinitele přestupu tepla jako funkce rychlosti w a průměru tmelky d .

$d \cdot 10^3 / \text{m} /$	$w / \text{m} \cdot \text{s}^{-1} /$			
	5	10	15	20
6	42	64	82	97
10	35	52	67	79
16	29	43	55	66
25	24	36	46	55

Tab. 4.1 Součinitel přestupu tepla $\alpha_x / \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} /$ mezi plamenem a tmelkou

Sdílení tepla sáláním je podružným jevem. Vliv sálání je vyjádřen v součiniteli přestupu tepla sáláním, který lze vyjádřit podle / 12 / ze vztahu

$$q_s = \alpha_s (T_f - T_w) \quad (4.19)$$

kde $q_s / \text{W} \cdot \text{m}^{-2} /$ sálavý měrný tepelný tok

$\alpha_s / \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} /$ součinitel přestupu tepla sáláním

$T_f / \text{K} /$ teplota sálajícího plynu

$T_w / \text{K} /$ teplota tmelky,

do kterého se dosadí

$$q_s = \epsilon_w \cdot \epsilon_f \cdot c_o / \left(\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right) \quad (4.20)$$

kde ϵ_w poměrná pohltivost povrchu tmelky

ϵ_f poměrná pohltivost plamene

$c_o / \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} /$ součinitel sálání černého tělesa

$$\alpha_s = \frac{q_s}{(T_f - T_w)} = \epsilon_w \cdot \epsilon_f \cdot c_o \frac{\left(\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right)}{(T_f - T_w)}$$

$$\epsilon_w \cdot \epsilon_f \cdot c_o / \frac{1}{10^8} (T_f^3 + T_f^2 \cdot T_w + T_f \cdot T_w^2 + T_w^3) / ,$$

položíme-li

$$\frac{T_f + T_w}{2} = T_m \quad ?$$

pak

$$\alpha_s = 0,04 \cdot \varepsilon_w \cdot \varepsilon_f \cdot c_o \left(\frac{T_m}{100} \right)^3 =$$

$$= 0,04 \cdot 0,7 \cdot 0,03 \cdot 5,672 \cdot 192 = 0,91 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} /$$

Z výpočtu je zřejmé, že sálavá složka ohřevu je malá a z rovnice 4.11 vyplývá pro dosazení do rov. 4.9

$$\alpha_1 = \alpha_k \quad (4.21)$$

Součinitel přestupu tepla α_2 mezi neohřívaným povrchem tmelky a okolním prostředím lze určit ze vztahu

$$Nu = c (Gr \cdot Pr)^n, \quad (4.22)$$

platícího pro volnou konvekci do neomezeného prostoru. Konstanty c a n jsou funkcemi $(Gr \cdot Pr)$. Výpočet je proveden pro tmelku $\varnothing d = 10 \text{ mm}$.

$$t_{\text{urč}} = \frac{t_{2,k} + t_{r=R}}{2} = \frac{90 + 20}{2} = 55^\circ \text{C}$$

$$Gr = \frac{\beta d^3 g \Delta t}{\nu^2} = \frac{10^3 \cdot 10^{-9} \cdot 9,81 \cdot 70}{338 \cdot 19,2^2 \cdot 10^{-12}} = 5,51 \cdot 10^3$$

$$t = t_{2,k} - t_{r=R} = 90 - 20 = 70 \text{ K}$$

$$(Gr \cdot Pr) = 5,51 \cdot 10^3 \cdot 0,72 = 3967$$

Podle [12] jsou odpovídající konstanty $c = 0,54$; $n = 0,25$

Dosazením dostaneme

$$Nu = 0,54 \cdot 3967^{0,25} = 4,28$$

$$\text{odkud } \alpha_2 = \frac{Nu \lambda}{d} = \frac{4,28 \cdot 2,41 \cdot 10^{-2}}{10 \cdot 10^{-3}} = 10,3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla α_3 mezi čelem tmelky a okolním prostředím lze určit ze stejného vztahu jako α_2 do kterého se dosadí stejné hodnoty, takže $\alpha_3 = \alpha_2 = 10,3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

4.2 Ohřev tmelky

Vzhledem k okrajovým podmínkám je nutno z hlediska exaktního řešení diferenciální rovnice nestacionárního vedení tepla tmelku považovat za složitě těleso. Řešení je možné pouze zavedením zjednodušujících podmínek, nebo na jednodušším modelu. V obecné teorii ohřevu kovů je doporučováno zjednodušení okrajových podmínek podle Biotova kritéria (rov. 4.8, 4.9, 4.10). Vyčíslení Biotových čísel pro různé průměry tmelek, různé vzdálenosti x a použité materiály tmelek je v tab. 4.3.

	Materiál tmelky		
	ocel	mosaz	hliník
$\lambda / \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1} /$	25	64	210
$c / \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1} /$	460	540	880
$\rho / \text{kg m}^{-3} /$	$7,8 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^3$
$a / \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} /$	$6,96 \cdot 10^{-6}$	$13,94 \cdot 10^{-6}$	$88,38 \cdot 10^{-6}$

Tab. 4.2 Tepelně fyzikální vlastnosti použité pro výpočet Biotova čísla

Podle tab. 4.3 se jeví tmelky v průřezu kolmém na jejich osu jako tenké. Důsledkem toho je, že teplotní pole v tmelce budou v podstatě kolmé na podélnou osu tmelky, neboť teplotní spád je soustředěn na vnější straně tělesa a teplotní spád uvnitř tělesa je zanedbatelně malý. Obdobně lze prokázat, že v rozsahu technologických teplot, tj. do teploty čela tmelky $t_{x=-m} = 150^\circ\text{C}$ je měrný tepelný tok q_3 mnoho-

násobně větší, než merný tepelný tok ochlazovaným povrchem tmelky. Za tohoto předpokladu lze tepelný tok ochlazovaným povrchem tmelky zanedbat. Obě uvedení zjednodušení mění úlohu na jednorozměrné nestacionární vedení tepla, pro které můžeme válcovou tmelku nahradit jednodušším modelem, např. kombinací polohraničeného tělesa a neohraničené desky.

Charakteristický rozměr			Materiál	α / W m ⁻² K ⁻¹ /	
				10	100
Příčný průřez	Ø tmelky l / 10 ³ m /	6	ocel	0,0012	0,012
			mosaz	0,0004	0,004
			hliník	0,00014	0,0014
		10	ocel	0,002	0,02
			mosaz	0,0008	0,008
			hliník	0,00023	0,0023
		16	ocel	0,0032	0,032
			mosaz	0,0012	0,012
			hliník	0,00038	0,0038
		25	ocel	0,005	0,05
			mosaz	0,0019	0,019
			hliník	0,00059	0,0059
Podélný průřez	Vzdálenost x / 10 ³ m /	20	ocel	0,008	0,08
			mosaz	0,003	0,03
			hliník	0,0009	0,009
		40	ocel	0,016	0,16
			mosaz	0,006	0,06
			hliník	0,0019	0,019
		60	ocel	0,024	0,24
			mosaz	0,009	0,09
			hliník	0,0028	0,028
		80	ocel	0,032	0,32
			mosaz	0,0125	0,125
			hliník	0,0038	0,038

Tab. 4.3 Biotovo číslo tmelek

Polochraničené těleso nahrazuje tmelku v části $x > 0$ a neohraničená deska v části $-m < x < 0$. Řešení je v tomto případě možno uskutečnit pomocí těles jednoduchého tvaru. Okrajové podmínky je nutno doplnit podmínkou, udávající v místě myšleného styku obou těles t.j. $x = 0$, v každém okamžiku stejnou teplotu t.j.

$$t_{x=0,\tau} = t_{x=-0,\tau} \quad (4.23)$$

Počáteční a okrajové podmínky pro řešení diferenciální rovnice nestacionárního vedení tepla jsou v tomto případě tyto:

Počáteční podmínka pro obě tělesa:

$$t|_{\tau=0} = t_0 \quad (4.24)$$

Okrajová podmínka pro polochraničené těleso:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{3,s} \quad (4.25)$$

Okrajové podmínky pro neohraničenou desku :

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{4,s} \quad (4.26)$$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=-m} = \alpha_3 (t_{3,k} - t_{x=-m}) \quad (4.27)$$

kde t_0 / °C / počáteční teplota v čase $\tau = 0$
 $q_{3,s}$ / W m⁻² / střední měrný tepelný tok povrchem polochraničeného tělesa
 $q_{4,s}$ / W m⁻² / střední měrný tepelný tok povrchem neohraničené desky na straně ohřevu
 $\alpha_3 (t_{3,k} - t_{x=-m})$ / W m⁻² / tepelný tok povrchem neohraničené desky na ochlazované straně

Při stálé teplotě obtékajícího nebo okolního média se

mění teplota ohřívané stěny podle exponenciály, je doporučován střední tepelný tok z logaritmického průměru podle vztahu

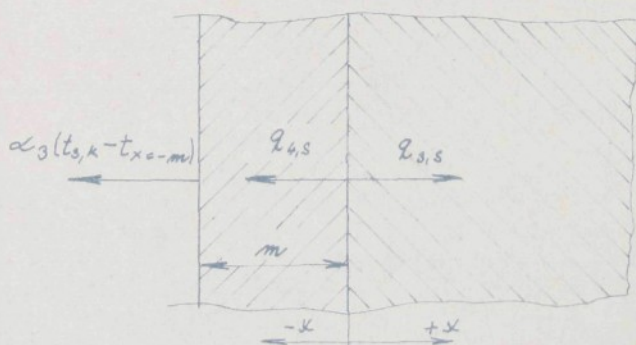
$$q_{3,s} = \frac{q_{3,1} - q_{3,2}}{\ln \frac{q_{3,1}}{q_{3,2}}}$$

$$\text{resp. } q_{4,s} = \frac{q_{4,1} - q_{4,2}}{\ln \frac{q_{4,1}}{q_{4,2}}} \quad (4.28)$$

kde $q_{3,1}$; $q_{4,1}$ jsou hodnoty měrného tepelného toku na začátku ohřevu / W m^{-2} /

$q_{3,2}$; $q_{4,2}$ jsou hodnoty měrného tepelného toku na konci ohřevu / W m^{-2} /

Schema řešené úlohy nahrazující tmelku je na obr. 4.4.



Obr. 4.4 Schema úlohy

Za použití bezrozměrných veličin $Po = \frac{a \tau}{x^2}$,

$$Fo = \frac{a \tau}{m^2}, \quad Bi = \frac{\alpha_3 m}{\lambda}, \quad \eta = \left| \frac{-x}{m} \right| \quad (4.29)$$

Je řešení diferenciální rovnice nestacionárního vedení tepla pro polohraničené těleso

$$t(x, \tau) = t_0 + \Theta_1 \frac{q_{3,s} x}{\lambda} \quad (4.30)$$

pro neohraničenou desku

$$t(x, \tau) = t_0 + \Theta_2 \frac{q_{4,s} m}{\lambda} \quad (4.31)$$

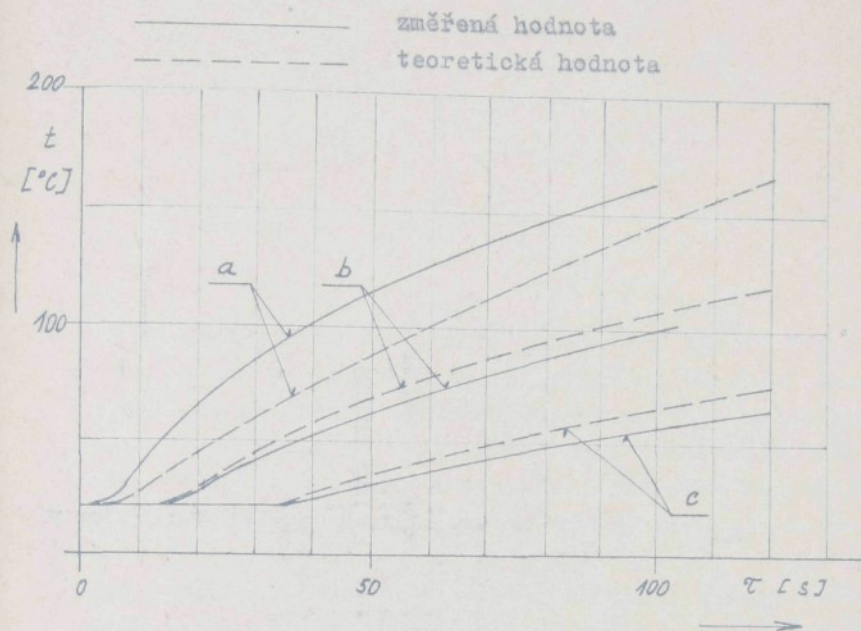
Číselné hodnoty řešení jsou uvedeny v tab. 4.4 a graficky uvedeny na obr. 4.5 a porovnány s experimentálně zjištěnými údaji.

Výchozí údaje pro teoretické řešení:

Průměr tmelky	10 mm
Materiál tmelky	ocel 13 240
Výkon hořáku	90 W
Doba ohřevu	5, 10, 20, 40, 60, 120, s
Teplota okolí	20°C

		doba ohřevu / s /					
		5	10	20	40	60	120
x = 15	Fo	0,154	0,309	0,619	1,24	1,86	3,71
	Θ_2	0	0,2	0,6	1,2	1,9	3,6
	t	20	28,4	45,2	70,4	99,8	171,2
x = 25	Fo	0,056	0,111	0,223	0,445	0,668	1,336
	Θ_1	0	0,008	0,04	0,14	0,25	0,4
	t	20	22	30	55	82,5	120
x = 45	Fo	0,017	0,034	0,069	0,137	0,206	0,412
	Θ_1	0	0	0	0,01	0,04	0,13
	t	20	20	20	24,5	38	78,5

Tab. 4.4 Teplota tmelky na čele a ve vzdálenosti $x = 25 ; 45$ mm (viz obr. 4.4)



Obr. 4.5 Změna teploty tmelky na čele $x = -15$ mm
 a ve vzdálenosti $x = 25$; 45 mm
 (viz. obr. 4. 4)

a - teplota čela tmelky

b - teplota tmelky ve vzdálenosti 25 mm

c - teplota tmelky ve vzdálenosti $x = 45$ mm

Z porovnání křivky ohřevu experimentálně změřené a teoreticky odvozené, vyplývá poměrně dobrá shoda teplot v místech odlehlejších od plamene, t.j. $x = 25$ a 45 mm. Ohřev čela je podle naměřených hodnot intenzivnější než vypočítaná hodnota z toho důvodu, že plamen nepůsobí pouze v místě $x = 0$, ale vlivem víření způsobeného tmelkou je ohřívána tmelka v širším pásmu.

5. ZÁVĚR

V předkládané disertační práci byly teoreticky a experimentálně analyzovány hlavní proměnné veličiny temelických operací se zvláštním zřetelem na operaci přetmelení. Ke splnění vytvořeného cíle se musel autor rozhodnout mezi v podstatě dvěma variantami výzkumné činnosti. Buď teoreticky a prakticky zvládnout užší okruh problémů, což by v rámci předpokládaného rozsahu práce umožnilo hlubší analýzu problému, nebo obsáhnout co nejširší okruh, tak aby práce mohla sloužit jako ucelený podklad jak konstruktérům, tak pracovníkům, kteří mají určovat koncepci rozvoje mechanizace a automatizace daného oboru. S ohledem na naléhavost řešit v relativně krátké době otázky spojené s rozvojem mechanizace a automatizace, se autor v souladu s cílem práce pokusil zpracovat co nejširší okruh problémů, které mohou pomoci při realizaci nových technologických postupů směřujících k automatizaci. Autor navázal na řadu poznatků jak provozních, tak výzkumných. Přes snahu obsáhnout a zpracovat co nejširší okruh problémů, nepovažuje autor práci za zcela vyčerpávající uvedenou problematiku, neboť každý krok při realizaci nových poznatků zpravidla sebou přinesl další požadavky a náměty na výzkum. Tam, kde nebylo možno provést ověřovací měření v dostatečné šíři, ani problematika není popsána v literatuře, jsou problémy zasluhující si dalšího podrobnějšího zpracování zahrnuty do zvláštní kapitoly, jako doporučení k dalšímu výzkumu.

Některé výsledky autorem buď teoreticky odvozené,

nebo experimentálně změřené bylo obtížné objektivně zhodnotit, protože neexistuje jednotné a ucelené kritérium pro kvalitu jednotlivých konstrukčních prvků. Například hodnocení pevnosti a tuhosti nově navržených tmelek bylo provedeno pouze porovnáním s charakteristickými pevnostními údaji mosazné tmelky. Stejným způsobem byly porovnány teplotní poměry na aparátu osazeném klasickými mosaznými tmelkami s aparátem osazeným nově navrženými kombinovanými tmelkami.

Plnění hlavních bodů uvedených jako cíl práce je uvedeno na stranách :

- a) určení rozhodujících proměnných veličin tmelicích operací je v kandidátské práci souhrnně uvedeno včetně předpokládaného vlivu veličin na výsledek děje na str. 23
- b) teoretický rozbor operace přetmelení je v kandidátské práci včetně závěrů uveden na str. 24 - 30
- c) rozbor vlivu materiálu a konstrukce tmelky na kvalitu výrobků je v kandidátské práci uveden na str. 30 - 59, 70 - 93; v doplňku ke kandidátské práci na str. 24-29
- d) optimalizace ohřevu tmelky je v kandidátské práci na str. 60 - 69
- e) návrh nových konstrukčních prvků je v kandidátské práci uveden na str. 94 - 125;
úřadem pro vynálezy a objevy bylo dne 8. 12. 1978 uděleno autorské osvědčení č. 190 186 na tmelku pro broušení skleněných kamenů a dne 25. 3. 1981 uděleno autorské osvědčení č. 208 087 na plynový trubkový hořák.

DOPLNĚK K LITERATUŘE

- / 38 / Dissocirujuščije gazy kak teponositeli
i rabočije tela energetičeskich ustanovok.
IJE AN BSSR, Minsk 1970
- / 39 / Klečková, M. : Nestacionární teplotní pole
a napjatost ve strojních částech.
Praha: SNTL 1979

LIST OPRAV KE KANDIDÁTSKÉ DISERTAČNÍ PRÁCI

		chybně	správně
str. 24	2. řádek zdola	zabývá urče- ním	zabývá určením
str. 35	rov. 3.11	poslední člen $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$	$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$
str. 36	rov. 3.14	poslední člen $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$	$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$
str. 36	rov. 3.15	poslední člen $\frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r}$	$\frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r}$
str. 58	6. řádek shora	obr. 3.2	obr. 3.13
str. 63	rov. 4.4	a vztahu pro přestup tepla $Q = \alpha_1 S \Delta t \tau$	a vztahu pro prostup tepla $Q = \alpha_1 S \Delta t \tau$
str. 66	obr. 4.2	$\eta / ^\circ\text{C} /$	$\eta / \% /$
str. 67	obr. 4.3	$\eta / ^\circ\text{C} /$	$\eta / \% /$
str. 69	obr. 4.5	$\psi / ^\circ\text{C} /$	$\psi / ^\circ /$
str. 95	obr. 4.21	chybí popis a kota rozteče	1 trubka hořáku 2 tryska hořáku 3 prolis označení rozteče r parametrů, včetně
str. 126	5. řádek shora		