Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Obor 23-07-8

zaměření
strojírenská metalurgie

katedra materiálů a strojírenské technologie

KONSTRUKCE VAKUOVÉ INDUKČNÍ PECE PRO STUDIUM DIFUZE

KMM - 008

Lisner Tomáš

Vedoucí diplomové práce: ing. Jiří Horyna CSc
VŠST Liberec

Konzultant: ing. Karel Ďaďourek CSc
Prago-union Liberec
ing. Daniela Fryaufová
VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh

počet stran: 52
počet tabulek: -
počet obrázků: 16
počet příloh: 13
počet výkresů: 19

DT:

12. června 1981

Vysoká škola: strojní a textilní v Liberci

Katedra: materiálů a strojírenské metalurgie

Fakulta: strojní

Školní rok: 1980 - 81

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro s. Tomáše L I S N E R A

obor strojírenská technologie

Protože jste splnil... požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic ministerstva školství o státních závěrečných zkouškách tento diplomový úkol:

Název tématu: Konstrukce vakuové indukční pece pro studium difuze.

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s řešením silitové vakuové pece pro studium difuzních dějů na KMM.
2. Navrhněte konstrukci vakuové indukční pece obdobných technických parametrů.
3. Podle možností zařízení realizujte a odzkoušejte.
4. Vyhodnoťte výsledek a doporučte další směr vývoje.

V 405/1981 S

Autorské právo se řídí směrnicemi MŠK pro státní záv. zkoušky č. j. 31 727/62-IV/4 ze dne 13. července 1962 Věstník MŠK XVIII, sešit 24 ze dne 31. 8. 1962, §19 aut. z. č. 115/53 Sb.

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

SEVT - 49 395 0 I/73

Grafia 22 3577 73

Rozsah grafických laboratorních prací:

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran

Seznam odborné literatury:

Firemní literatura fy Klöckner
DP VŠST KMM
Přenosil: Nitrocementace

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Horyna, CSc

Konsultanti: Ing. Daniela Fryaufová
Ing. Karel Dadourek, CSc (Prago-union)

Datum zahájení diplomové práce: 1.9.1980

Datum odevzdání diplomové práce: 12.6.1981

L. S.

Doc. Ing. Václav Chaloupecký, CSc
Vedoucí katedry

Doc. RNDr. Bohuslav Stříž, CSc
Děkan

V Liberci dne 1.9. 19 80

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

V Liberci dne 12. 6. 1981

L i s n e r Tomáš

Lisner Tomáš
.....

Obsah

I. Úvod 1

II. Obecná část 2

1. Teorie difuze 2

11. Mechanizmus difuze 2

12. Zákony difuze 3

2. Fyzikální podstata a princip indukčního ohřevu ... 6

21. Rozdělení indukčního ohřevu 6

22. Fyzikální podstata indukčního ohřevu 6

23. Vlastnosti dráhy indukovaných proudů 8

24. Činitel vazby induktoru 10

25. Způsoby indukčního ohřívání 12

26. Induktory 12

27. Použití indukčního zahřívání 13

28. Potřebná zařízení pro indukční ohřev 14

29. Výhody a nevýhody indukčního ohřevu 14

3. Výpočet indukčního ohřívání 15

31. Vztahy pro výpočet 15

4. Vlastnosti plynů při nízkých tlacích 18

5. Seznámení se stávajícím zařízením 19

6. Plyny používané při chemickotepelném zpracování ..21

7. Některé materiály používané ve vakuové technice ..21

III. Výpočtová část 23

1. Uvažované hodnoty 23

2. Vlastní výpočet induktoru 25

3. K výpočtu induktoru 33

IV. Vlastní návrh zařízení a jeho popis 34

1. Požadavky na zařízení 34

2. Návrh induktoru 35

3. Volba konstrukce 37

4. Popis zařízení a vysvětlení funkcí jeho částí 37

41. Vystředění vzorku malého průměru 41

5. Zdůvodnění použití materiálů 43

V. Čištění pece 44

VI. Způsob měření teploty vzorku 44

VII. Způsob měření tlaku v zařízení 45

VIII. Další zařízení potřebná pro provoz pece 45
IX. Praktické odzkoušení zařízení 47
1. Zkouška ohřevu 47
2. Zkouška těsnosti 49
X. Návrh regulace teploty 50
XI. Závěr 51
XII. Další směry vývoje 51

Seznam zkratek a symbolů

veličina	symbol	jednotky
měrný příkon	P_1	W/m^2
celkový příkon	P	W
teplota ohřevu	ϑ	°C
čas ohřevu	t	s
úhlový kmitočet	ω	$1/s$
teplotní spád	σ	°C/m
měrná hmotnost	δ	kg/m^3
měrný odpor	ρ	$\Omega mm^2/m$
měrné teplo	c	$W/m^2 °K$
tepelná vodivost	λ	$W/m°K$
hloubka vniku	d	m
permeabilita vakua	μ_0	H/m
poměrná permeabilita	μ_r	–
počet závitů cívky	N_1	–
počet závitů na vzorku	N_2	–
šířka proudové dráhy	s	m
délka proudové dráhy	l'_2	m
odpor dráhy indukovaných proudů	R_m	Ω
indukčnost dráhy indukovaných proudů	L_2	H

indukčnost cívky bez vzorku	L_1	H
vzájemná indukčnost	M	H
součinitel poměru D_1/l_1	α	–
vnitřní průměr cívky induktoru	D_1	m
činitel jakosti dráhy indukovaných proudů	Q_m	–
činitel vazby	$\varkappa$	–
přenesený odpor	r_m	Ω
proud procházející induktorem	I_1	A
napětí na svorkách	U_1	V
ztráty v induktoru	Z_1	W
vlastní odpor induktoru	R_1	Ω
účinnost	η	%
frekvence	f	Hz
součinitel závislosti vzáj. indukce na rozměrech	F	–
průměr vzorku	D_2	m
délka vzorku	l_2	m
indukčnost cívky s vlož. předmětem	L_i	H
délka překrytí induktoru se vzorkem	$\bar{l}_1$	m
průměr vodiče induktoru	d_1'	m

střední průměr cívky induktoru	D'_i	m
průřez povrchové vrstvy	q	m
celková délka přívodů	p	m

I. Úvod

Závěry XVI. sjezdu KSČ vytyčily úkoly a hlavní směry hospodářského rozvoje ČSSR na 7. pětiletku. Mimo jiné se v nich hovoří i o úkolech a požadavcích kladených na průmysl. Je zde nutno podniknout další kroky ke zvýšení efektivnosti a kvality práce, k lepšímu zhodnocování surovin a racionálnějšímu využívání paliv, energie a materiálů. Dále je třeba řešit vhodné záměny, zejména ve spotřebě dovážených materiálů. Pozornost je nutno věnovat lepšímu využití vysoce výkonných zařízení a zavádění nových progresívnějších technologií, které by zajišťovaly růst produktivity práce a růst výroby bez přírůstků pracovních sil. Toto všechno by nebylo možno zajistit bez spojení průmyslové výroby s výzkumem a bez zavádění poznatků v oblasti vědeckotechnického rozvoje do praxe. Specielně v oblasti technických věd jde o poskytování podkladů pro vývoj speciálních kovových i složených materiálů a pro nové technologie. Právě tohoto problému se týká studium difuzních jevů, k němuž by vakuová indukční pec, navržená v této práci měla sloužit. Je tedy třeba, aby navržené zařízení splňovalo všechny požadavky vyplývající z účelu, k němuž má být používáno a to jak po stránce funkční tak po stránce technologičnosti.

II. Obecná část

II.1. Teorie difuze

Difuzí nazýváme vzájemné přemístění elementárních částic, kterým jsou podmíněny veškeré reakce mezi dvěma látkami. Při difuzi v soustavách o různém chemickém složení je pochod veden snahou o vyrovnání koncentračních rozdílů. To se děje přemístěním atomů ve směru koncentračního spádu. Naopak je tomu pouze u tzv. negativní difuze, kde je působení koncentračního spádu překryto chemickou afinitou atomů, projevující se krystalizační či překrystalizační silou. /1/

II. 11. Mechanizmus difuze

Ve stavu plynném či kapalném mají elementární částice značnou volnost pohybu a tedy jejich přemisťování je snadné. Ve skupenství tuhém zaujímají atomy určitá místa prostorové mřížky a mohou je opustit pouze tehdy, je-li jejich energie tak velká, aby překonala vazebné síly. Difuzní mechanizmus je možno vysvětlit třemi způsoby.

Prvním způsobem je vzájemná záměna míst dvou atomů. Tento způsob se zdá být těžko uskutečnitelný pro potřebu příliš velkých sil.

V druhém případě jde o difuzi atomu do intersticiálních (meziuzlových) poloh základní mřížky. Zde je důležitý malý průměr difundujícího atomu. Tímto způsobem probíhá např. difuze uhlíku v železe.

Třetí typ mechanizmu difuze je důsledkem existence vakantních míst (neobsazené uzlové polohy krystalové mřížky). Tato teorie je vhodná pro vysvětlení difuze v substitučních slitinách a pro vysvětlení samodifuze. /1/

II. 12. Zákony difuze

Rychlost přemísťování atomů se vyjadřuje pomocí koeficientu difuze D.

$$dm = - S \cdot D \frac{dc}{dx} dt$$

dm ... množství látky difundující povrchem S

S ... povrch na němž dochází k difuzi

dc ... rozdíl koncentrací dvou míst

dx ... vzdálenost dvou míst

dt ... čas difuze

D ... koeficient difuze - závisí na teplotě a koncentraci,
má rozměr [cm^2/s] [cm^2/den]
má různou velikost za normální teploty 10^{-6} - 10^{-5} [cm^2/den]

Na rychlost difuze mají vliv vnější podmínky, stav a vlastnosti základního kovu a vztah mezi difundujícími látkami.
Z vnějších podmínek ovlivňuje difuzi nejvíce teplota, což zachycuje vztah pro změnu koeficientu difuze

$$D = A \cdot e^{-\frac{Q}{R.T}}$$

A ... konstanta závislá na složení

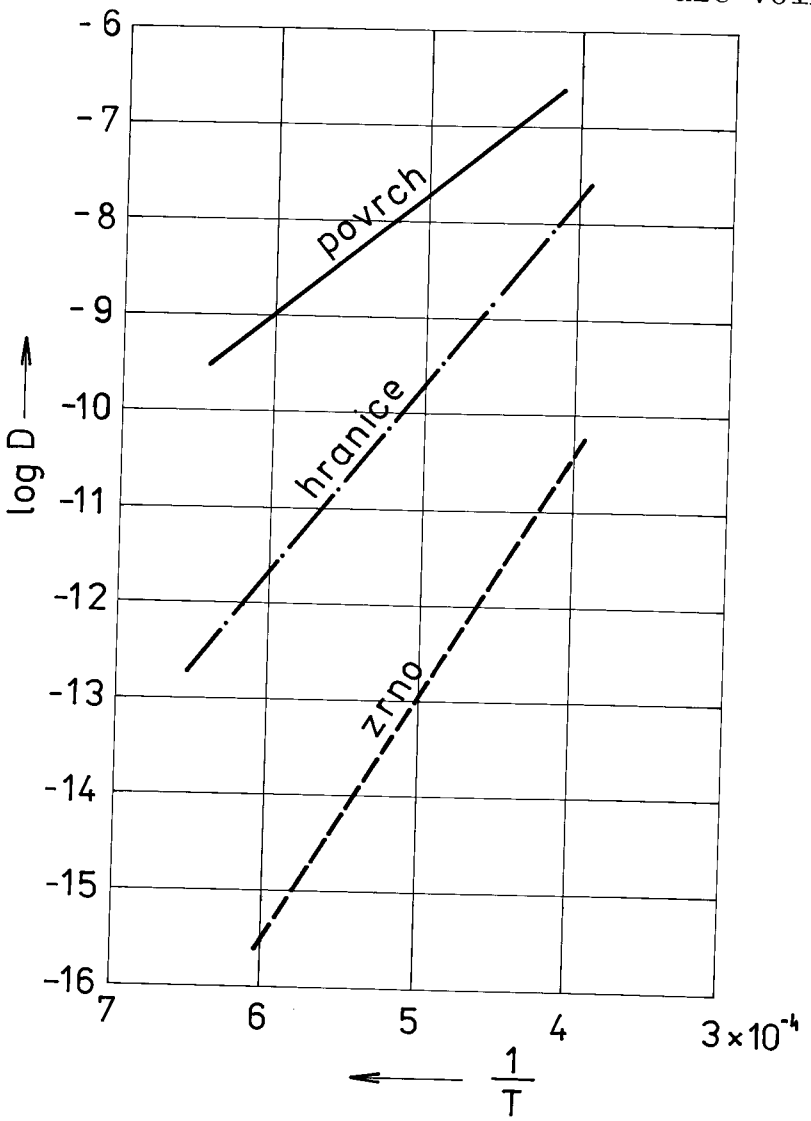
Q ... materiálová konstanta (míra aktivační energie, kterou je nutno dodat, aby atom mohl přejít z jedné polohy v mřížce do druhé)

T ... absolutní teplota

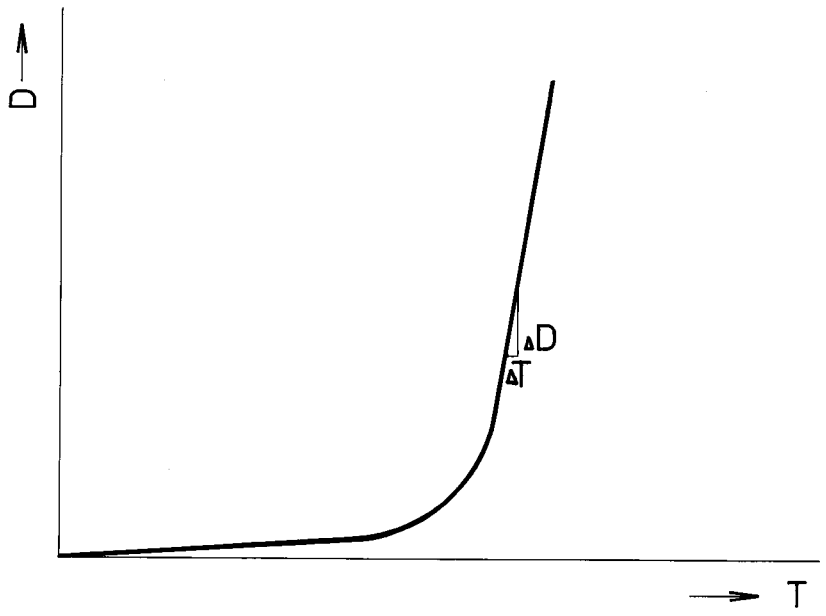
R ... plynová konstanta

Z tohoto vztahu vyplývá vyjádření změny log D v závislosti na $\frac{1}{T}$ (obr. 1) a závislost D na T, daná exponenciální křivkou (obr. 2) /1/

Z toho, že nedokonalosti ve stavbě krystalové mřížky jsou větší na povrchu a na hranicích zrn než ve vlastní mřížce, vyplývá, že difuze na povrchu a na hranicích zrn, bude postupovat rychleji, než vlastními zrny. Dochází tedy k dělení difuze na tzv. povrchovou a objemovou. Důkaz o tom přináší průběh difuze thoria wolframem, znázorněný na obr. 1, jako závislost hodnoty logaritmu koeficientu difuze D na převrácené hodnotě teploty. Koeficient difuze zrnem je 10^2 - 10^4 krát menší než koeficient difuze po hranicích zrn a ten je dále asi 10^2 krát menší než koeficient difuze volným povrchem. /1/



Obr. 1. Průběh difuze thoria ve wolframu. /1/



Obr. 2. Závislost koeficientu difuze D na teplotě T. /1/

Z průběhu křivky je vidět, že za vyšší teploty dojde malým zvýšení teploty k poměrně velkému zvětšení koeficientu difuze D.

Difuze se také zrychluje vlivem elektrického pole, neboť elektricky nabité ionty mění svoji polohu jeho působením.

Podmínka koncentračního spádu je splněna správným sycením povrchu kovového předmětu atomy difundující látky. Tyto atomy se uvolňují z vhodného prostředí (disociace). Sycení povrchu závisí tedy na disociaci obalové látky a na absorbci vznikajících atomů ve stavu zrodu povrchem kovu. Druh vznikající vrstvy je podmíněn rozsahem sycení povrchu, který závisí na vztahu mezi disociací a absorbcí. /1/

Z těchto poznatků, je vidět, že difuzi můžeme ze strany pece ovlivnit velikostí teploty a kvalitou atmosféry. Z toho tedy vyplývají požadavky na těsnost pece a na zajištění ohřevu na určitou požadovanou teplotu (kolem 1.000°C).

II. 2. Fyzikální podstata a princip indukčního ohřevu

II.21. Rozdělení indukčního ohřevu

Na indukční zahřívání způsobené vířivými a hysterezními ztrátami v střídavém magnetickém poli se užívá nejrůznějších kmitočtů. Podle nich se indukční ohřev dělí na:

a) nízkofrekvenční - ohřev proudy s kmitočtem do 500 Hz (nf)

b) středokrekvenční - ohřev proudy s kmitočtem 500 - 10.000 Hz (sf)

c) vysokofrekvenční - ohřev proudy s kmitočtem nad 10.000 Hz (vf)

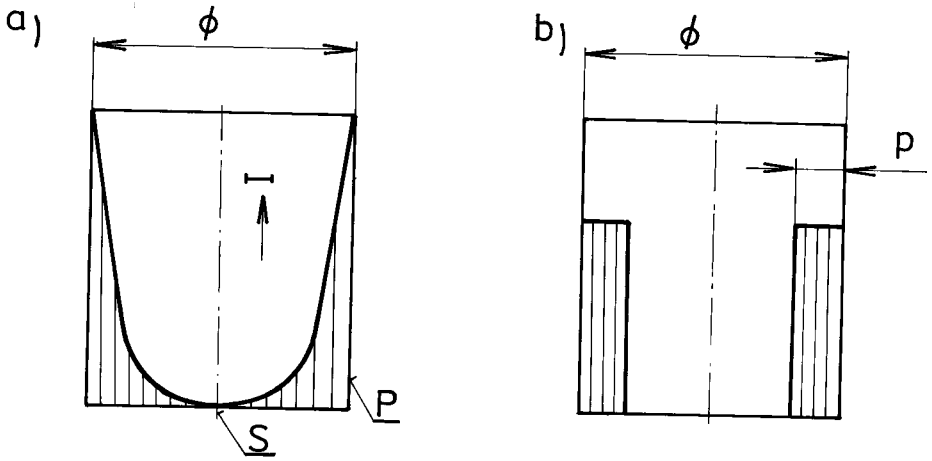
Ve vysokofrekvenčním poli se předměty ohřívají pouze na povrchu. V poli nízkofrekvenčním a středofrekvenčním se předměty zahřívají i do hloubky.
Indukčním ohříváním v užším slova smyslu rozumíme ohřívání v poli vysokofrekvenčním. /2/; /4/

II.22. Fyzikální podstata indukčního ohřevu

Podstatou indukčního ohřevu je elektomagnetická indukce. Princip indukčního ohřevu lze srovnat s principem transformátoru, poněvadž přenos energie z induktoru do ohřívaného kusu probíhá, stejně jako u transformátoru z primárního do sekundárního vinutí, prostřednictvím proměnného magnetického pole. /4/

Pokusně i početně se dá dokázat, že střídavý proud neteče rovnoměrně celým průřezem vodiče, ale že s rostoucím kmitočtem roste proudová hustota [A/mm^2] v povrchových vrstvách vodiče a ubývá jí ke středu vodiče(obr. 3a), Se stoupajícím kmitočtem je toto rozdělení stále nerovnoměrnější - křivka je strmější.

Proud jako by byl s rostoucím kmitočtem vytlačován ze středu k povrchu vodiče. Tento jev se nazývá skinefekt. Toto nerovnoměrné rozdělení probíhá podle složité matematické křivky a proto pro zjednodušení zavádíme tzv. hloubku vniku střídavého proudu. Je to pomyslná hloubka od povrchu vodiče v níž je proud stejnoměrně rozdělen tak, že jeho tepelný účinek je stejný (obr. 3b)./4/



Obr. 3. Rozložení proudové hustoty v ohřívaném kusu /4/

a) skutečné rozložení při vyšším kmitočtu

I ... proud

P ... povrch kusu

S ... střed kusu

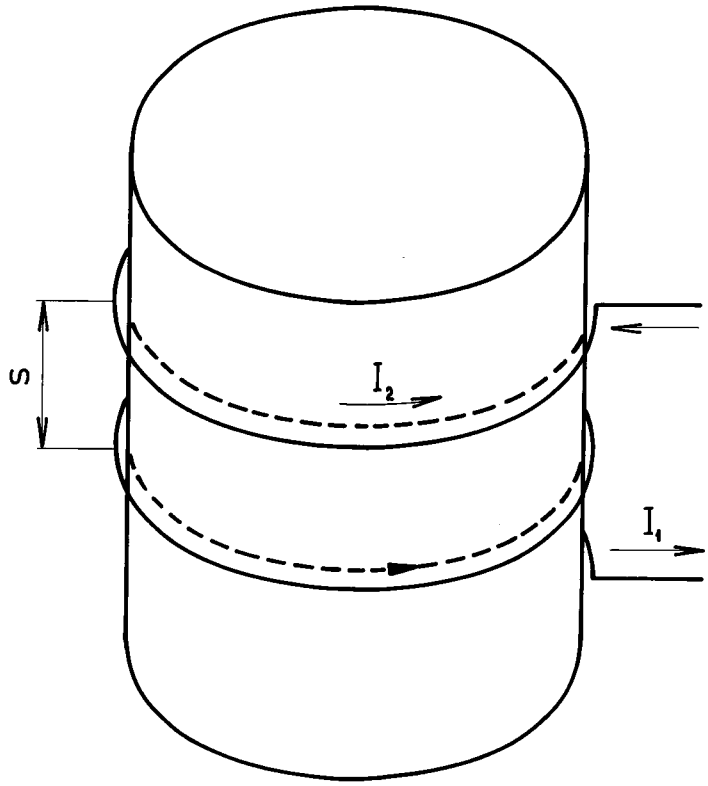
b) fiktivní rozložení proudu v kusu

p ... hloubka průniku

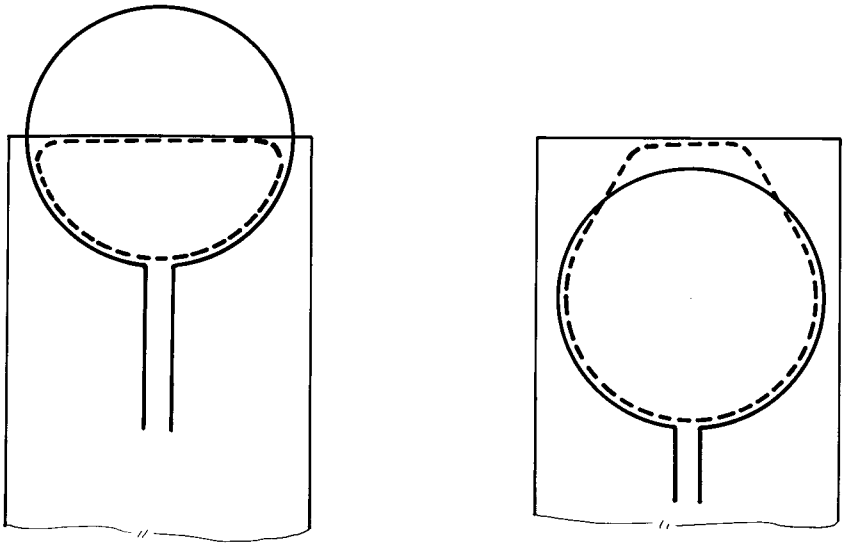
Při indukčním ohřívání (obr. 4) vzniká tedy teplo proudem I_2 indukovaným v ohřívaném předmětu. Odpor R_2 dráhy tohoto proudu závisí na její délce, šířce, tloušce a na měrném odporu materiálu. Při nepatrné hloubce vniku vysokofrekvenčních proudů lze dráhu indukovaného proudu nahradit tenkou vodivou vrstvou na povrchu předmětu. Tloušťka této vrstvy se rovná tzv. hloubce vniku střídavého proudu.
Šířka dráhy proudů indukovaných induktorem s několika závity může být považována za rovnu rozteči závitů a při použití širokého induktoru s jedním závitem za rovnu šířce závitu. /2/

II.23. Vlastnosti dráhy indukovaných proudů

Uzavřená proudová dráha (např. kruhová) nekryje střed. Šířka ani hloubka dráhy nemusí být v celé délce stejné, místa užší se pak zahřívají více než místa širší, protože místní ohřívací výkon je úměrný čtverci hustoty proudu.
Při těsné vazbě mezi indukujícím a indukovaným proudem je tvar proudové dráhy obrazem tvaru induktoru. Jinak jde indukovaný proud drahou co možná nejkratší, vysokofrekvenční proudy se tlačí k hranám předmětu překážejícím jejich normální dráze (obr. 5). /2/
Dráhy indukovaných proudů ve feromagnetickém materiálu se dělí na paralelní větve. Dosáhne-li materiál Curieova bodu (u ocele asi 760°C) stane se náhle nemagnetickým, čímž se zvětší hloubka vniku a zmenší se odpor příslušné části dráhy. Tím se na místa nejdříve ohřátá soustředí větší proud a jejich ohřátí se ještě více urychlí na úkor míst sousedních. Jev zmizí, přesáhne-li teplota celého povrchu Curierův bod./2/



Obr. 4. Princip indukčního ohřívání /2/



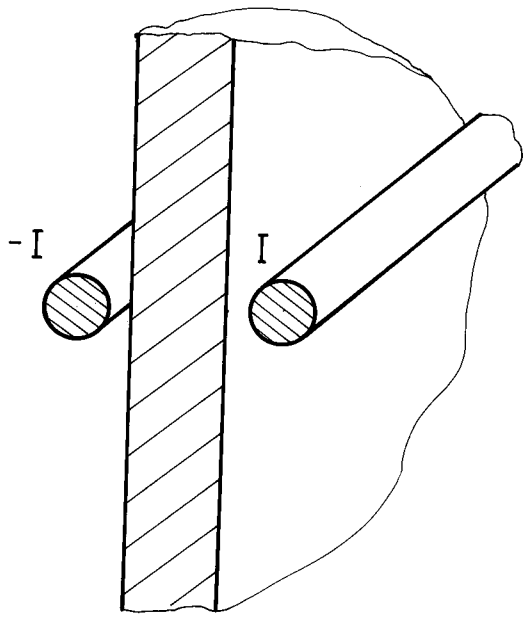
Obr. 5. Dráhy indukovaných proudů / 2/

II. 24. Činitel vazby induktoru

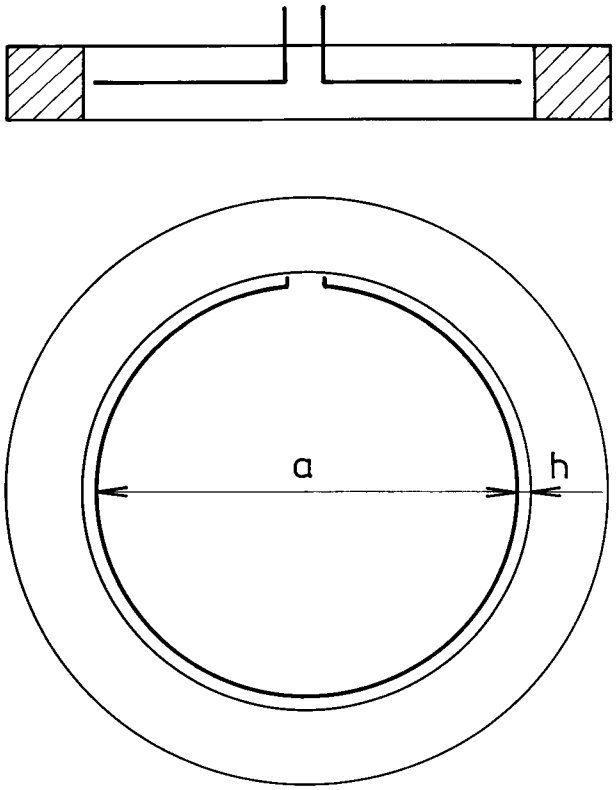
Indukovaný proud se rovná indukujícímu jen v teoretickém případě. Ve skutečnosti je induktor obvod, který má i zpětný proud, zmenšující proud indukovaný. Je možno mluvit o jakémsi přenosu proudu z induktoru na ohřívaný předmět. Tento přenos je nejlepší, jsou-li od sebe dva přímé vodiče odděleny poměrně velkým ohřívaným předmětem (obr. 6) nebo jde-li o ohřev válce vnějším cívkovým induktorem (obr. 4).

Jsou-li oba vodiče odděleny jen vzdáleností a je přenos tím horší, čím je a menší proti vzdálenosti h vodiče od předmětu. To platí o induktorech vložených do dutiny předmětu i přiložených k jedné jeho straně (obr. 7;8).

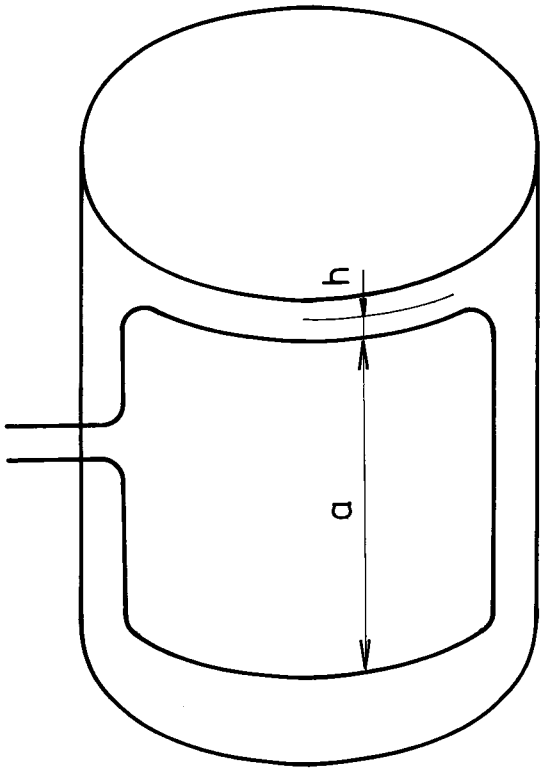
Poměr a : h se zmenší tloušťkou vodiče induktoru, proto tento volíme tak tenký, jak jen je to konstrukčně možné. /2/



Obr. 6. Část smyčky s vloženou deskou /2/



Obr. 7. Induktor v dutině předmětu /2/



Obr. 8. Induktor vně předmětu /2/

Činitel vazby induktoru je poměr magnetického toku spřaženého s předmětem k toku induktoru samého bez vloženého předmětu. Činitel vazby se u induktorů s dobrou vazbou pohybuje v rozmezí 0,7 - 0,85, u induktorů s vazbou volnější 0,5 - 0,7 a 0,3 - 0,5 přiléhá-li k předmětu jen malá část induktoru./2/

II.25. Způsoby indukčního ohřívání

Indukční ohřívání může probíhat různým způsobem. Patří sem ohřívání jednorázové, při němž je celá ohřívaná plocha pokryta indukovanými proudy. A to sice za klidu nebo za rotačního pohybu k vyrovnání teplot. Dále je to ohřívání integrační u něhož indukované proudy pokrývají jen část ohřívané plochy a jejich poloha se neustále mění. U podélných předmětů se používá ohřívání postupné,při němž probíhá předmět závitem induktoru. Podobné je ohřívání průchozí, ale předmět procházející induktorem, má délku menší než induktor. Pohyb předmětu může být buď trhavý nebo plynulý./2/

II.26. Induktory

Tvar aktivní části induktoru určuje dráhy indukovaných proudů. Pro jednoduché předměty se používá tvar prstence, rámečku, cívky, rovinné spirály apod..
Mezera mezi induktorem a ohřívaným předmětem bývá 1,5 - 5 mm. Při návrhu je třeba dbát na dobrou vazbu a na vlastnosti dráhy indukovaných proudů.
Zátěž je třeba přizpůsobit tomu, aby byl generátor přiměřeně zatížen a aby přenášený příkon byl přiměřený výkonu generátoru. Lze toho docílit změnami vzduchové mezery a někdy i počtem závitů. Také tloušťka vodiče mění indukčnost a vazbu.

Výpočet optimálního řešení je nepřesný pro svou závislost na mnoha činitelích. Zpravidla se řídíme osvědčenými vzory a zkušeností. Je-li výsledek neuspokojující, zkoušíme jiné řešení.

Induktory se obyčejně dělají z měděných trubek chlazené vodou, neboť mívají malé rozměry a vedou velké proudy (i 1000 A). Části trubek se pájejí nebo svařují. Je možno použít i měděných plechů spojených trubkami nebo plné mědi, v níž se vyvrtají chladící kanálky.

Induktory jsou nejčastěji pevné, samonosné a upevňují se za přívody. Mohou však být i rozvírací dvojdílné či podajné. Nehodí-li se induktor samonosný použijeme, induktoru vyztuženého izolantem nebo zalitého do vhodné hmoty.

II.27. Použití indukčního zahřívání

Indukční ohřev se využívá při povrchovém kalení, kde se na kalící teplotu ohřeje pouze povrch a vnitřek předmětu zůstává chladný. Oproti cementování se zde ušetří energie i čas, nedochází ani k deformacím a odpadají další zpracování nebo jsou omezena.

Dále lze indukční zahřívání použít při pájení, přičemž je lépe využita pájka, spoj je čistší a dokonalejší než při jiném ohřevu.

Možnosti využití indukčního ohřevu jsou i při žíhání (převším místním), tváření, obrábění za tepla, provádění zátavů skla a kovů, patentování drátů, zonální tavbě, sušení a vypalování laku, nalisovávání dvou částí za tepla, přetavování galvanicky naneseného cínového povlaku (šetří se 2/3 cínu proti máčení) a ve vývoji je ohřev malých dávek kovů bez použití kelímku,

což se děje tak, že kov se vznáší působením elektrodynamických sil nad induktorem.

Lze také indukčně ohřívat různé chemické vodivé látky místo jejich spalování (např. koks), přičemž do reakcí nezasahují ani látky potřebné k hoření ani spalné produkty.

II.28. Potřebná zařízení pro indukční ohřev

Jsou to především generátory, to je měniče kmitočtu, jimiž se mění kmitočet proudu v síti (většinou rovněž napětí) na zvýšený kmitočet./4/

Při indukčním ohřívání se užívá elektronkových generátorů s kmitočtem kolem 500 kHz a s ohřívacími výkony do 100 kW. /2/

II.29. Výhody a nevýhody indukčního ohřevu

Výhody oproti starším druhům ohřevu:

- zvýšená produktivita
- snížené procento zmetků
- zlepšení pracovních podmínek
- pohotovost, provozní spolehlivost
- zkrácená doba ohřevu
- úspora elektrické energie při správném využití

Nevýhody:

- poměrně vysoké pořizovací náklady proti plamenným způsobům
- zvýšené provozní náklady (odpisy, údržba)
- malá přizpůsobivost pro výrobu členitých součástí
- ekonomicky je výhodné použití pro dávky teprve od nekolika set kusů

II. 3. Výpočet indukčního ohřívání

V praxi se počítá potřebný výkon a napětí jen zřídka, dáváme přednost pokusům a měřením. U složitějších tvarů je totiž výpočet pole a tepelné vodivosti velmi nesnadný. Rychlým oteplováním se také mění odpor a permeabilita materiálu předmětu i pracovní podmínky generátoru. Při přechodu Curieova bodu se permeabilita zmenší skokem tak rychle, že oteplování nepostupuje rovnoměrně. /2/

II.31. Vztahy pro výpočet

vztah	/jednotky výsledku/	/jednotky dosazovaných veličin/	
teplotní spád			
$\sigma = 86{,}4 \cdot \frac{P_1}{\lambda}$	[°C /cm]	[W/cm²; kcal/mh°C]	(1)
měrný příkon k dosažení požadovaného teplotního spádu			
$P_1 = \frac{\sigma}{86{,}4} \lambda$	[W/cm²]	[°C/cm; kcal/mh°C]	(2)
celkový příkon			
$P = P_1 . \pi D_2 L_1$	[W]	[W/cm²; cm; cm]	(3)
čas potřebný k dosažení potřebné teploty			
$t = \left(\frac{m}{5{,}12 . P_1}\right)^2 \delta . c . \lambda$	[s]	[°C; W/cm²; kg/dm²; kcal/kg°C; kcal/mh°C]	(4)
hloubka vniku při určité teplotě			
$d_m = \sqrt{\frac{\rho_m}{\mu_r f}} \cdot 16$	[mm]	[Ωmm²/m; H/cm; kHz]	(5)

odpor dráhy indukovaných proudů při určité teplotě

$$R_{\vartheta} = \frac{\varrho_{\vartheta} \cdot l'_2}{s \cdot d_{\vartheta}} \qquad [\Omega] \qquad [\Omega mm^2/m; m; mm; mm] \qquad (6)$$

indukčnost dráhy indukovaných proudů

$$L_2 = \alpha \cdot \mu_0 \cdot \pi \left(\frac{D_2}{2}\right)^2 \frac{N_2^2}{l_2} \qquad [H] \qquad [H/cm; cm; cm] \qquad (7)$$

indukčnost prázdného induktoru

$$L_1 = \alpha \cdot \mu_0 \cdot \pi \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 \frac{N_1^2}{l_1} \qquad [H] \qquad [H/cm; cm; cm] \qquad (8)$$

součinitel poměru D/l

$$\frac{D}{l} \Rightarrow \alpha \qquad \text{tab. 73/340 /2/} \qquad (9)$$

vzájemná indukčnost obvodů

$$M = F \cdot \mu_0 \pi \left(\frac{D_2}{2}\right)^2 \frac{N_1^2}{l_2} \qquad [H] \qquad [H/cm; cm; cm] \qquad (10)$$

součinitel F

$$\frac{D_1}{l_1}; \frac{D_2}{l_2}; \frac{l_1}{l_2} \Rightarrow F \qquad \text{tab. 74/341 /2/} \qquad (11)$$

činitel vazby

$$\varkappa = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \qquad - \qquad [H; H; H] \qquad (12)$$

činitel jakosti dráhy indukovaných proudů

$$Q_{\vartheta} = \frac{\omega \cdot L_2}{R_{2\vartheta}} \qquad - \qquad [H; \Omega] \qquad (13)$$

přenesený odpor při určité teplotě

$$r_{\vartheta} = \varkappa^2 \cdot \omega \cdot \frac{L_1}{Q_{\vartheta}} \qquad [\Omega] \qquad [H; 1/s] \qquad (14)$$

proud procházející induktorem

$$I = \sqrt{\frac{P}{r_{\vartheta}}} \qquad [A] \qquad [W; \Omega] \qquad (15)$$

napětí na svorkách

$$U = \omega . L_1 . (1 - \varkappa^2) . I \qquad [V] \qquad [1/s ; H ; A] \qquad (16)$$

ztráty v induktoru

$$Z_1 = R_1 . I_1^2 \qquad [W] \qquad [\Omega ; A] \qquad (17)$$

vlastní odpor induktoru

$$R_1 = \frac{\rho . l'_1}{q} \qquad [\Omega] \qquad [\Omega mm^2/m ; m ; mm^2] \qquad (18)$$

průřez povrchové vrstvy

$$q = d . \pi . d' \qquad [mm^2] \qquad [mm ; mm] \qquad (19)$$

účinnost

$$\eta = \frac{r}{R_1 + r} \cdot 100 \qquad [\%] \qquad [\Omega ; \Omega] \qquad (20)$$

úhlový kmitočet

$$\omega = 2 \pi f \qquad (21)$$

Jednotky jsou odpovídající vztahům podle /2/ a /8/ a tabulkám z nichž byly zjištěny hodnoty použitých veličin.

II. 4. Vlastnosti plynů při nízkých tlacích

Vlastnosti plynů lze vysvětlit představami tzv. kinetické teorie. Podle ní jsou molekuly plynů pružné koule, které se neustále pohybují všemi směry rychlostí, která je úměrná absolutní teplotě plynu. Při tomto pohybu dochází k vzájemným srážkám molekul. Mezi dvěma po sobě následujícími srážkami prolétne molekula určitou přímočarou tzv. volnou dráhu. Protože tato je u různých molekul různá zavádí se tzv. střední volná dráha. Molekuly se nesrážejí pouze navzájem, ale narážejí také na stěny nádoby. Tyto nárazy na stěny se ve svém souhrnu projevují jako konstantní tlak plynu na stěny. Ten je přímo úměrný počtu molekul v jednotce objemu. Střední volná dráha je tím větší čím méně je molekul v nádobě. Z toho plyne, že střední volná dráha je nepřímo úměrná tlaku.

Poměr mezi střední volnou drahou a rozměry nádoby je důležitým kritériem vlastností zředěného plynu.

Pokud je střední volná dráha podstatně menší než rozměry nádoby, převládají vzájemné srážky molekul a plyn má vlastnosti kapalin. Zvětší-li se střední volná dráha natolik, že je srovnatelná s rozměry nádoby, převládnou srážky molekul se stěnami a plyn ztrácí vlastnosti kapaliny.

Toto je důležité zvláště při posuzování přenosu energie plynem (např. tepla) a při proudění plynu. Přestane-li se plyn chovat jako kapalina, je množství přenesené energie úměrné počtu molekul a klesá s klesajícím tlakem. /10/

II. 5. Seznámení se stávajícím zařízením

Stávajícím zařízením pro studium difuzních dějů na katedře materiálů je vakuová silitová pec. Skládá se ze dvou hlavních částí - měřící trubice a elektrické odporové pece.

Na měřící trubici jsou kladeny vysoké nároky z hlediska těsnosti a tepelného namahání. Skládá se z křemenné trubky o světlosti 60 mm a dvou chlazených přírub, uzpůsobených pro vkládání vzorků, osvětlování vnitřku trubice, fotografování vzorků, odčerpávání a napouštění atmosféry. Těsné spojení přírub s trubkou je provedeno vakuovým tmelem. Těsnící kroužky mezi částmi přírub jsou ze silikonové gumy. Části přírub jsou spojeny pomocí šesti šroubů. Montáž a demontáž měřící trubice při výměně vzorků jsou zdlouhavé. Obdobně tomu je při čištění křemenné trubky nebo při její výměně při náhodném poškození.

Ohřev vzorků měřící trubicí zajišťuje elektrická odporová pec. Sestavení pece a trubice je provedeno tak, že křemenná trubka je obklopena topnou částí pece. Pec, jejímž úkolem je poskytnout teploty až 1000°C, je dvoudílná krabicové konstrukce. Topnými odpory v peci je 12 silitových tyčí, rozložených rovnoměrně do kruhu kolem křemenné trubky. Jsou uspořádány po šesti do dvou sekcí, z nichž jedna je ve stabilní části a druhá v odklápěcí části pece. Výplň pece tvoří cihly zlehčeného korundu.

Náběh na teplotu 1000°C je velmi zdlouhavý až 2,5 hodiny. Bylo by žádoucí tuto teplotu zkrátit použitím jiného druhu ohřevu.

Regulace teploty je výkonová. Při ohřevu na stanovenou teplotu se při jejím dosažení provede přepnutí na poloviční výkon, takže dál topí jen šest silitových tyčí. Další regulace je prováděna přes autotransformátor a pomocí padáčkového regulátoru.

II.6. Plyny používané při chemickotepelném zpracování

Plyny, které se budou používat při studiu difuzních pochodů, mohou být různé podle druhu chemickotepelného zpracování. Stejně tomu bude i se složením ochranných atmosfér. V úvahu připadají dusík, vodík, argon, metan a čpavek a ochranné atmosféry obsahující CO_2, CO, H_2, N_2 v různých poměrech.

II.7. Některé materiály používané ve vakuové technice

U materiálů, použitých ve vakuové technice, nás zajímá množství plynů, které se z nich uvolní ve vakuu nebo stupeň jejich odplynění. Dále také jejich tepelná a chemická odolnost a v neposlední řadě i pevnostní vlastnosti.

Křemenné sklo - má některé výrazné vlastnosti a parametry, které jiné materiály nemají. Například jeho tepelná roztažnost je mimořádně nízká ($\alpha_{20 \div 1000°C} = 5,8 \cdot 10^{-7}/1/^{o}C/$). Velmi výhodné jsou i další jeho tepelné vlastnosti - teplota měknutí 1650°C; nejvyšší pracovní teplota 1300°C; tepelná odolnost vůči náhlým změnám teploty kolem 1200°C. Pevnost v tahu je 70 - 120 N/mm^2, pevnost v tlaku 1600 - 2000 N/mm^2. Křemenné sklo je také značně necitlivé vůči chemickým vlivům. /11/

Silikonová guma - největší výhodou oproti přírodním a syntetickým kaučukům jsou dobré vlastnosti silikonového kaučuku v oblasti vysokých teplot (nad 125°C). V této oblasti má silikonový kaučuk vyšší pevnost v tahu a neprojevuje se u něj stárnutí, způsobující pokles pevnosti a elasticity. Bezpečná teplota pro trvalý provoz (po několik roků) je pro silikonový kaučuk 180°C a pro krátkodobé použití (cca 100 hodin) dokonce 250°C. Silikonová guma je necitlivá vůči atmosféře (neoxyduje),

ale špatně odolává silným kyselinám, alkáliím a přehřáté páře. /11/

Teflon - nemá definovaný bod tání, snáší po delší dobu až teploty 300°C bez podstatné ztráty pevnosti. Teflon vykazuje dobré pružné vlastnosti, avšak jeho maximální zatížení nemá být při normální teplotě větší než 350 N/cm^2, neboť jinak má sklon k lámání. Má pozoruhodné elektrické vlastnosti, především vysoký elektrický odpor. Dále není smáčivý vodou, je nehořlavý a nerozpouští se v žádném známém rozpouštědle a má vynikající odolnost proti atmosféře. Nevýhodou je to, že se nedá lepit, pouze vakuově "svářet".

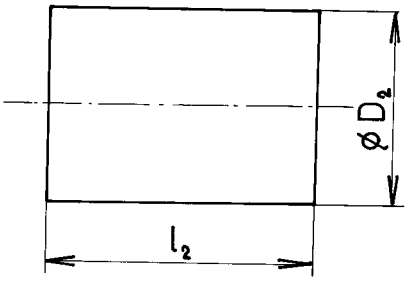
III. Výpočtová část

III.1. Uvažované hodnoty pro výpočet induktoru

Hodnoty použité ve výpočtech jsou získány volbou, vyhledáním v literatuře nebo splněním požadovaných podmínek.

Rozměry vzorku

Rozměry vzorku byly zvoleny po dohodě s konzultantem.



$D_2 = 25$ [mm]

$l_2 = 25$ [mm]

$\rho_{2;20} = 0{,}16$ [Ω mm^2/m] /2/

$\rho_{2;1100} = 1{,}6$ [Ω mm^2/m] /2/

$\mu_{r;20} = 20$ /2/

$\mu_{r;1100} = 1$ /2/

$c = 0{,}17$ [kcal/kg°C] /2/

$\lambda = 40$ [kcal/mh°C] /2/

$\delta = 7{,}8$ [kg/dm^3]

$N_2 = 5$

Rozměry cívky induktoru

Rozměry jsou voleny s ohledem na rozměry vzorku a na výrobní možnosti.

$D_1 = 32$ [mm]

$l_1 = 38$ [mm]

$d'_1 = 6$ [mm]

$N_1 = 5$

$s = 8$ [mm]

$D'_1 = 38$ [mm]

$\rho_{1;20} = 0{,}02$ [$\Omega mm^2/m$] /2/

$\rho_{1;40} = 0{,}05$ [$\Omega mm^2/m$] /2/

$\mu_{r;1;20} = 1$ /2/

$\mu_{r;1;40} = 1$ /2/

$2p = 200$ [mm]

Teplota ohřevu

$\vartheta_1 = 1100$ [°C]

Teplotní spád

$\sigma = 500$ [°C/cm]

Kmitočet

$f = 250$ [kHz]

Kmitočet je volen podle možnosti generátoru GV 22 s trvalým výkonem 25 kW a pracovním kmitočtem 200 - 500 kHz.

Permeabilita vakua

$\mu_0 = 4.\pi.10^{-9}$ [H/cm] /2/

III.2. Vlastní výpočet induktoru

Při výpočtu jsem pracoval s jednotkami odpovídajícími výpočtovým vztahům a hodnotám z tabulek podle /2/ a /8/. Konečné výsledky jsou převedeny do soustavy SI. Vstupní hodnoty byly získány z kapitoly III.1. nebo předchozím výpočtem nebo byly vyhledány v tabulkách.

vstupní hodnoty	výpočet	výsledné hodnoty
	měrný příkon k dosažení teplotního spádu	
$\sigma = 500 [°C/cm]$	$P_1 = \frac{\sigma}{86,4} \cdot \lambda =$	
$\lambda = 40 [kcal/mh°C]$	$= \frac{500}{86,4} \cdot 40 = \underline{\underline{232}} [W/cm^2]$	$P_1 = 232 [W/cm^2]$
$D_2 = 2,5 [cm]$		
$l_2 = 2,5 [cm]$		
$\vartheta = 1100 [°C]$		
$\delta = 7,8 [g/cm^3]$	celkový příkon	
$c = 0,17 [kcal/kg°C]$	$P = P_1 . \pi D_2 . l_2 =$	
	$= 232 . \pi . 2,5 . 2,5 = \underline{\underline{4555}} [W]$	$P = 4555 [W]$
	čas potřebný k dosažení teploty	
	$t = \left(\frac{\vartheta}{5,12 . P_1}\right)^2 . \delta . c . \lambda =$	
	$= \left(\frac{1100}{5,12 . 232}\right)^2 7,8 . 0,17 . 40 = \underline{\underline{45,2}} [s]$	$t = 45 [s]$

vstupní hodnoty	výpočet	výsledné hodnoty
	hloubka vniku (je počítána pro různé teploty induktoru a vzorku) teplota induktoru 20-40°C teplota vzorku 20-1100°C do vzorku při 20°C :	
$f = 250 [kHz]$ $\rho_{2;20} = 0{,}16 [\Omega mm^2/m]$ $\rho_{2;1100} = 1{,}6 [\Omega mm^2/m]$ $\mu_{r2;20} = 20$	$d_{2;20} = 16\sqrt{\frac{\rho_{2;20}}{\mu_{r2;20} \cdot f}} =$ $= 16\sqrt{\frac{0{,}16}{20.250}} = \underline{\underline{0{,}09}} [mm]$	$d_{2;20} = 0{,}09 [mm]$
$\mu_{r2;1100} = 1$ $\mu_{r1;20} = 1$ $\mu_{r1;40} = 1$ $\rho_{1;20} = 0{,}02 [\Omega mm^2/m]$ $\rho_{1;40} = 0{,}05 [\Omega mm^2/m]$	při 1100°C : $d_{2;1100} = 16\sqrt{\frac{\rho_{2;1100}}{\mu_{r2;1100} \cdot f}} =$ $= 16\sqrt{\frac{1{,}6}{1.250}} = \underline{\underline{1{,}3}} [mm]$	$d_{2;1000} = 1{,}3 [mm]$
	do cívky induktoru při 20°C :	
	$d_{1;20} = 16\sqrt{\frac{\rho_{1;20}}{\mu_{r1;20} \cdot f}} =$ $= 16\sqrt{\frac{0{,}02}{1.250}} = \underline{\underline{0{,}14}} [mm]$	$d_{1;20} = 0{,}14 [mm]$
	při 40°C :	
	$d_{1;40} = 16\sqrt{\frac{\rho_{1;40}}{\mu_{r1;40} \cdot f}} =$ $= 16\sqrt{\frac{0{,}05}{1.250}} = \underline{\underline{0{,}23}} [mm]$	$d_{1;40} = 0{,}23 [mm]$

vstupní hodnoty	výpočet	výsledné hodnoty
	odpor dráhy indukovaných proudů (je opět počítán pro teploty 20a1100°C při 20°C :	
$d_{2;20} = 0{,}09\ [mm]$ $d_{2;1100} = 1{,}3\ [mm]$ $\rho_{2;20} = 0{,}16\ [\Omega mm^2/m]$ $\rho_{2;1100} = 1{,}6\ [\Omega mm^2/m]$	$R_{2;20} = \frac{\rho_{2;20} \cdot l'_2}{s \cdot d_{2;20}} =$ $= \frac{0{,}16 \cdot 0{,}39}{8 \cdot 0{,}09} = \underline{\underline{0{,}09\ [\Omega]}}$	$R_{2;20} = 0{,}09\ [\Omega]$
	при 1100°C:	
$D_2 = 25 \cdot 10^{-3}\ [m]$ $N_2 = 5$ $s = 8\ [mm]$	$R_{2;1100} = \frac{\rho_{2;1100}\, l'_2}{s \cdot d_{2;1100}} =$ $= \frac{1{,}6 \cdot 0{,}39}{8 \cdot 1{,}3} = \underline{\underline{0{,}06\ [\Omega]}}$ $l'_2 = \pi D_2 N_2 = \pi \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 5 = \underline{0{,}39\ [m]}$	$R_{2;1100} = 0{,}06\ [\Omega]$
	indukčnost dráhy indukovaných proudů	
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}\ [H/cm]$ $D_2 = 2{,}5\ [cm]$ $l_2 = 2{,}5\ [cm]$	$L_2 = \alpha \mu_0 \pi \left(\frac{D_2}{2}\right)^2 \cdot \frac{N_2^2}{l_2} =$ $= 0{,}6884 \cdot 4\pi \cdot 10^{-9} \cdot \pi \left(\frac{2{,}5}{2}\right)^2 \cdot \frac{5^2}{2{,}5} = \underline{\underline{4{,}2 \cdot 10^{-7}\ [H]}}$ $\frac{D_2}{l_2} \Rightarrow \alpha$ $\frac{2{,}5}{2{,}5} = 1 \Rightarrow \alpha = \underline{0{,}6884}$	$L_2 = 4{,}2 \cdot 10^{-7}\ [H]$

vstupní hodnoty	výpočet	výsledné hodnoty
	činitelé jakosti dráhy indukovaných proudů při 20°C:	
$L_2 = 4{,}2 \cdot 10^{-7}$ [H] $R_{2;20} = 0{,}09$ [Ω] $R_{2;1100} = 0{,}06$ [Ω] $f = 250$ [kHz]	$Q_{2;20} = \frac{\omega \cdot L_2}{R_{2;20}} = \frac{2\pi \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 4{,}2 \cdot 10^{-7}}{0{,}09} = \underline{\underline{7{,}3}}$	$Q_{2;20} = 7{,}3$
	při 1100°C $Q_{2;1100} = \frac{\omega \cdot L_2}{R_{2;1100}} = \frac{2\pi \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 4{,}2 \cdot 10^{-7}}{0{,}06} = \underline{\underline{11}}$	$Q_{2;1100} = 11$
$D_1 = 3{,}2$ [cm] $l_1 = 3{,}8$ [cm] $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ [H/cm] $N_1 = 5$	indukčnost prázdného induktoru $L_1 = \alpha \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 \cdot \frac{N_1^2}{l_1} = 0{,}723 \cdot 4\pi \cdot 10^{-9} \cdot \pi \cdot \left(\frac{3{,}2}{2}\right)^2 \cdot \frac{5^2}{3{,}8} = \underline{\underline{4{,}8 \cdot 10^{-7}\,[H]}}$ $\frac{D_1}{l_1} \Rightarrow \alpha$ $\frac{3{,}2}{3{,}8} = 0{,}84 \Rightarrow \alpha = \underline{0{,}723}$	$L_1 = 4{,}8 \cdot 10^{-7}$ [H]

vstupní hodnoty	výpočet	výsledné hodnoty
$D_1 = 3{,}2\,[cm]$ $l_1 = 3{,}8\,[cm]$ $D_2 = 2{,}5\,[cm]$ $l_2 = 2{,}5\,[cm]$ $\mu_0 = 4.\pi.10^{-9}\,[H/cm]$ $N_1 = 5$ $L_1 = 4{,}8.10^{-7}\,[H]$ $L_2 = 4{,}2.10^{-7}\,[H]$ $f = 250\,[kHz]$	vzájemná indukčnost obou obvodů $M = F.\mu_0.\pi.\left(\frac{D_2}{2}\right)^2.\frac{N_1^2}{l_2} =$ $= 0{,}58.4\pi.10^{-9}.\pi\left(\frac{2{,}5}{2}\right)^2.\frac{5^2}{2{,}5} = \underline{\underline{3{,}58.10^{-7}\,[H]}}$ $\frac{D_1}{l_1};\frac{D_2}{l_2};\frac{l_1}{l_2} \Rightarrow F \quad 0{,}84;1;1{,}5 \Rightarrow F = \underline{0{,}58}$ činitel vazby $\varkappa = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} =$ $= \frac{3{,}58.10^{-7}}{\sqrt{4{,}8.10^{-7}.4{,}2.10^{-7}}} = \underline{\underline{0{,}79}}$ úhlový kmitočet $\omega = 2\pi f =$ $= 2\pi.250.10^3 = \underline{\underline{1{,}5.10^6\,[1/s]}}$	$M = 3{,}58.10^{-7}\,[H]$ $\varkappa = 0{,}79$ $\omega = 1{,}5.10^6\,[1/s]$
$Q_{2;20} = 7{,}3$ $Q_{2;1100} = 11$	přenesený odpor při 20°C: $r_{20} = \varkappa^2.\omega\frac{L_1}{Q_{2;20}} =$ $= 0{,}79.1{,}5.10^6.\frac{4{,}8.10^{-7}}{7{,}3} = \underline{\underline{0{,}06\,[\Omega]}}$ při 1100°C: $r_{1100} = \varkappa^2.\omega\frac{L_1}{Q_{2;1100}} =$ $= 0{,}79^2.1{,}5.10^6.\frac{4{,}8.10^{-7}}{11} = \underline{\underline{0{,}04\,[\Omega]}}$	$r_{20} = 0{,}06\,[\Omega]$ $r_{1100} = 0{,}04\,[\Omega]$

vstupní hodnoty	výpočet	výsledné hodnoty
	proud procházející induktorem (je počítán pro počáteční fázi ohřevu, tedy při 20°C, stejně tak napětí na svorkách)	
$P = 4555$ [W] $r_{20} = 0{,}06$ [Ω]	$I_1 = \sqrt{\frac{P}{r_{20}}} =$ $= \sqrt{\frac{4555}{0{,}06}} = \underline{\underline{275\ [A]}}$	$I_1 = 275$ [A]
	napětí na svorkách induktoru	
$\omega = 1{,}5.10^6$ [1/s] $\varkappa = 0{,}79$ $L_1 = 4{,}8.10^{-4}$ [H]	$U = \omega . L_1 . (1-\varkappa^2) I_1 =$ $= 1{,}5.10^6 . 4{,}8.10^{-4} . (1-0{,}79^2) . 275 = \underline{\underline{75\ [V]}}$	$U = 75$ [V]
$\rho_{2;20} = 0{,}02$ [Ωmm²/m] $d_1' = 6$ [mm] $D_1' = 38$ [mm] $N_1 = 5$ $p = 200$ [mm] $d_{1;20} = 0{,}14$ [mm]	vlastní odpor induktoru (skutečný odpor bude následkem nerovnoměrného rozložení proudu po obvodu vodiče větší) $R_1 = \frac{\rho_{1,20} . l_1'}{q} =$ $= \frac{0{,}02 . 0{,}796}{2{,}6} = \underline{\underline{0{,}006\ [\Omega]}}$ $q = d_{1;20} . \pi . d_1' = 0{,}14 . \pi . 6 = \underline{2{,}6\ [mm^2]}$ $l_1' = \pi . D_1' . N_1 + p = \pi . 38 . 5 + 200 = 796$ [mm] $= \underline{0{,}796\ [m]}$	$R_1 = 0{,}006$ [Ω] $R_{1sk} = 0{,}01$ [Ω]

vstupní hodnoty	výpočet	výsledné hodnoty
$R_{1sk} = 0{,}01\ [\Omega]$ $I_1 = 275\ [A]$	ztráty v induktoru $Z_1 = R_{1sk} I_1^2 =$ $= 0{,}01 \cdot 275^2 = \underline{\underline{756\ [W]}}$	$Z_1 = 756\ [W]$
$r_{20} = 0{,}06\ [\Omega]$	účinnost induktoru $\eta = \frac{r_{20}}{R_1 + r_{20}} \cdot 100 =$ $= \frac{0{,}06 \cdot 100}{0{,}01 + 0{,}06} = \underline{\underline{86\ [\%]}}$	$\eta = 86\ [\%]$

III.3. K výpočtu induktoru

Výpočet ukázal, že induktor bude vyhovovat požadavkům na něj kladeným. To znamená, že zajistí ohřev vzorku na stanovenou teplotu 1100°C, aniž by byl třeba výkon větší než může poskytnout generátor GV 22. Také čas náběhu na teplotu 1100°C, který vyšel 45 vteřin, vyhovuje požadavku zkrácení doby ohřevu.

Výsledky výpočtu však nelze považovat za zcela odpovídající skutečnosti a to z několika důvodů.

Výpočet je závislý na mnoha veličinách, které nejsou stálé a mění se nepravidelně se změnou teploty. Je to například měrná tepelná vodivost λ , permeabilita materiálu vzorku μ_r, odpor dráhy indukovaných proudů v závislosti na měrném odporu a hloubce vniku. Dále se také mění pracovní podmínky generátoru.

Ani samotný ohřev neprobíhá rovnoměrně, což je důsledkem toho, že při přechodu přes Curierův bod se permeabilita materiálu zmenší skokem na hodnotu $\mu_r = 1$, když se materiál stane nemagnetickým.

To, do jaké míry odpovídají výsledky skutečnosti, se ukáže až jejich porovnáním s výsledky, získanými praktickými zkouškami.

IV. Vlastní návrh zařízení a jeho popis

IV.1. Požadavky na zařízení

vakuová těsnost pro tlaky 10^{-2} - 10^{-3} torr; 1 - 0,1 Pa

dosahovaná teplota 1100°C

zkrácený čas náběhu na teplotu

odvod vzduchu a přívod určitého plynu

jednoduchost manipulace se vzorkem

jednoduchost montáže a demontáže zařízení

uložení vzorku

nepřekročit výkony generátorů GV 22 - výkon 25 kW

- prac. kmitočet 200 - 500 kHz

měření teploty vzorku

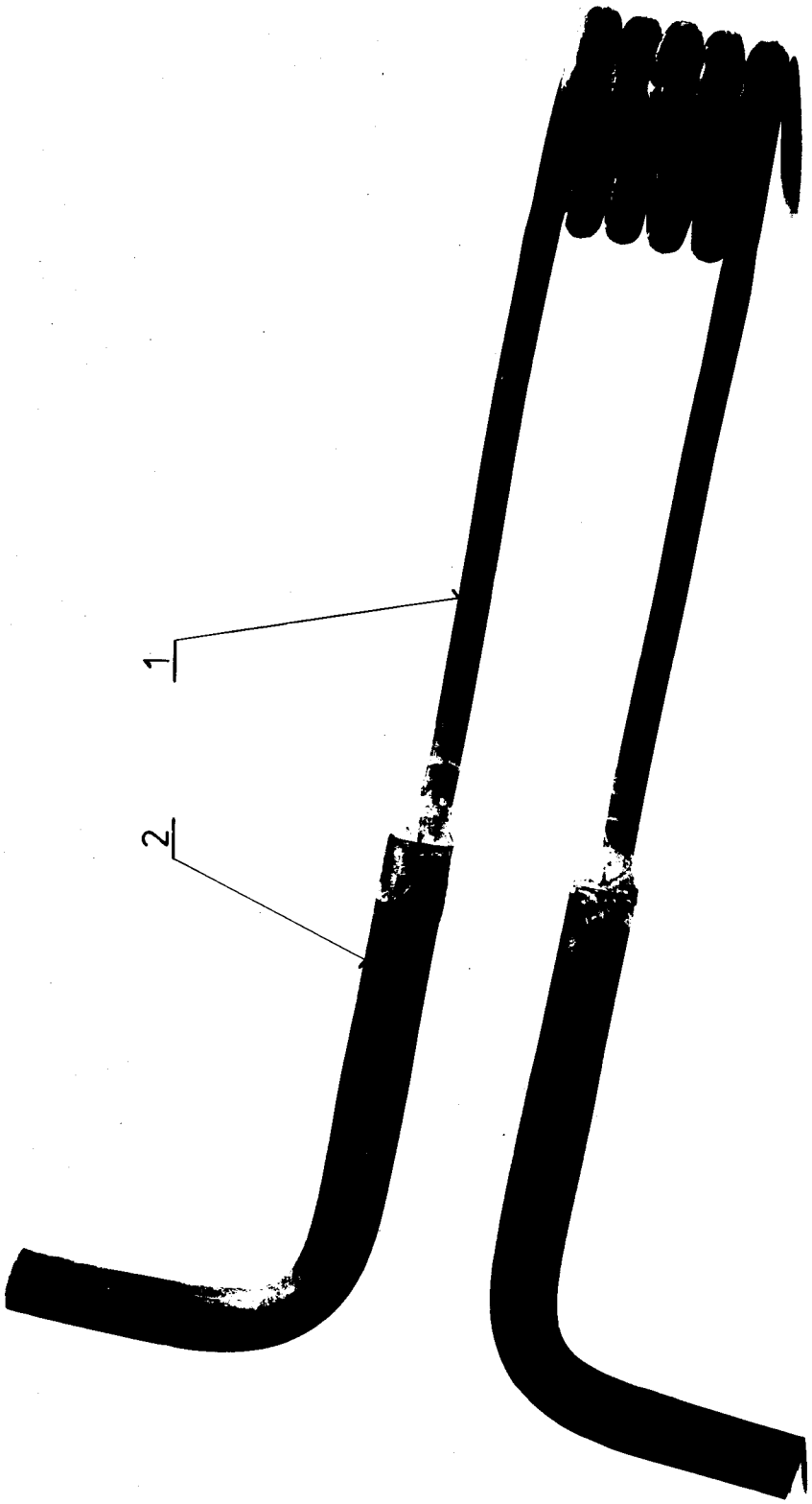
regulace teploty vzorku na hodnotě 1100°C ±1o po dobu cca 1 hodinu

IV.2. Návrh induktoru

Při návrhu induktoru (obr. 9) jsem vycházel z literatury /2/ a /8/ a z rozměrů vzorku. Snahou bylo dosahnout dobrého přenosu proudu z induktoru na vzorek a tím i dobré účinnosti induktoru. Kvalita přenosu závisí podle /2/ mimo jiné i na velikosti mezery mezi induktorem a vzorkem v poměru k střednímu průměru cívky induktoru /pos.1/. Velikost této mezery je také určena tloušťkou stěny křemenné trubky na níž bude induktor navlečen. Protože křemenná trubka má vnější průměr 30,5 mm ±0,5 mm navrhl jsem vnitřní průměr cívky induktoru 32 mm. Střední průměr cívky induktoru je dále závislý na průměru trubičky, z níž je induktor navinut. Ten jsem zvolil 6 mm, opět s ohledem na kvalitu přenosu proudu.

Při pokrytí celého vzorku vychází pět závitů cívky. Ta se rozvíjí v přívody dlouhé 110 mm. Přívody jsou zapájeny do trubek ø 12 mm, ohnutých do písmene L /pos.2/. Za tyto trubky se bude induktor upínat do svorek generátoru a na ně se také nasunou hadice přívodu chladící vody.

Materiál induktoru (měď) je vyžíhán naměkko a to před i po navinutí. Tím se částečně zabrání deformaci kruhového průřezu trubičky při navíjení a získá se možnost úprav např. natažením induktoru.



Obr. 9. Induktor

IV. 3. Volba konstrukce

Původně jsem navrhoval konstrukci pece svislou, ale od této jsem upustil z důvodů omezené možnosti použití pece pro eventuelní tavení kovů. Bylo by zde totiž problematické uložení vzorku. Při vodorovné konstrukci se naskýtá možnost uložení vzorku volně na vnitřní stěnu křemenné trubky. Vzorek však nesmí mít příliš malý průměr. Tím by totiž vznikla příliš velká nesoustřednost s cívkou induktoru, což by mělo za následek nerovnoměrný ohřev vzorku. Vakuová část pece je navržena pro provoz za podtlaku do 0,1 Pa.

IV. 4. Popis zařízení a vysvětlení funkcí jeho částí

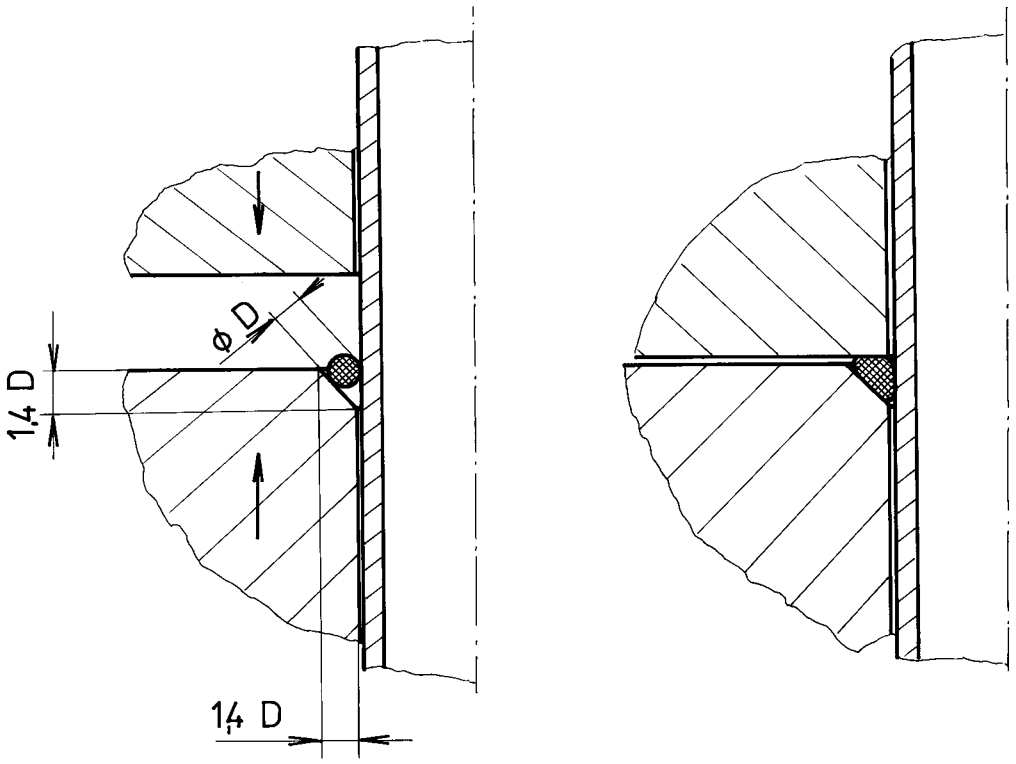
Celé zařízení je možno rozdělit na část zajišťující ohřev a na vakuovou část pece. Je to tedy induktor a křemenná trubka, uložená svými konci v ocelových hlavách. Induktor je již popsán v kapitole III.2..

Vakuová část pece (Výkr. č. KMM-08-01) (obr. 10) se sestává ze čtyř hlavních dílů. Je to základová deska /pos.1/, na níž jsou přišroubovány dvě stejné konzoly /pos.2/ s přivařenými lůžky /pos.3/. Otvory těchto lůžek prochází křemenná trubka /pos.4/, která je v nich uzavřena z každé strany válcovými tělesy /pos.5 a 6/. Tato tělesa jsou vsunuta do dutin lůžek a částečně nasunuta na křemennou trubku, s níž tvoří vakuotěsný spoj.

Tento spoj je proveden rozebiratelně pro urychlení demontáže a montáže např. při čištění. Princip spoje je převzat z /9/ (obr.11). Jde zde o použití gumového kroužku kruhového průřezu,

který je zamačkáván do trojúhelníkové drážky pomocí tlačného kroužku. Po uvolnění těsnícího kroužku, lze trubkou posouvat, ale na obou stranách spoje musí být při pohybu stejný tlak. Do sedací plochy pro gumová těsnění musí být co nejlépe opracovány, hlavně bez rýh napříč těsnícímu kroužku. Vhodné opracování je soustružením, nevhodné je frézování.
V našem případě je nátlačný kroužek tvořen dnem dutiny lůžka a trojúhelníková drážka pro těsnicí kroužek je vysoustružena ve válcovém tělese.
Válcová tělesa jsou opatřena navařenými hrdly s přírubami, které slouží pro připojení napouštěcího jehlového ventilu a vývěvy. Jedno těleso je na křemennou trubku nasunuto slepým otvorem, do něhož shora ústí hrdlo příruby. Podobně je tomu i u druhého tělesa, ale s tím rozdílem, že zde je otvor průchozí na jedné straně rozšířený pro vsazení zátky /pos.7/. Tímto tělesem bude vkládán vzorek. Zátka, k níž je přišroubována dvěma šrouby M4 teflonová průchodka /pos. 8/ přes dva kotoučky silikonové gumy /pos.10/, je do válcového tělesa vtlačována šroubem M10 /pos.12/. Šroub se opírá závitem v třmenu /pos.11/, navlečeném v drážce lůžka /pos.3/. Šroub M10 působí tedy přes zátku také na válcové těleso /pos.5/ a vtlačuje jej do dutiny lůžka. Tím dochází také ke stlačení obou kotoučků silikonové gumy mezi zátkou a teflonovou průchodkou. Obdobně je provedeno vtlačování druhého tělesa /pos.6/, pouze není provedeno přes zátku, ale šroub působí přímo na čelo tělesa. Zátka, respektive teflonová průchodka, je utěsněna ve válcovém tělese pomocí gumového kroužku /pos.18/.

Do teflonové průchodky ja navlečena keramická kapilára /pos.9/, kterou prochází termočlánek /pos.19/. Ten dále vede skrz první gumový kotouček a pokračuje mezi prvním a druhým kotoučkem ven z tělesa i z lůžka. Termočlánek je možno vést i podél kapiláry a skrz průchodku dvěma otvory, dále pak jako v předchozím případě. Sestavení zátky, gumových těsnících kotoučků, průchodky a kapiláry s termočlánkem je na obr. 12. Oba způsoby vedení termočlánku lze použít současně, je však nutno dbát na to, aby se termočlánky vzájemně nedotýkaly.



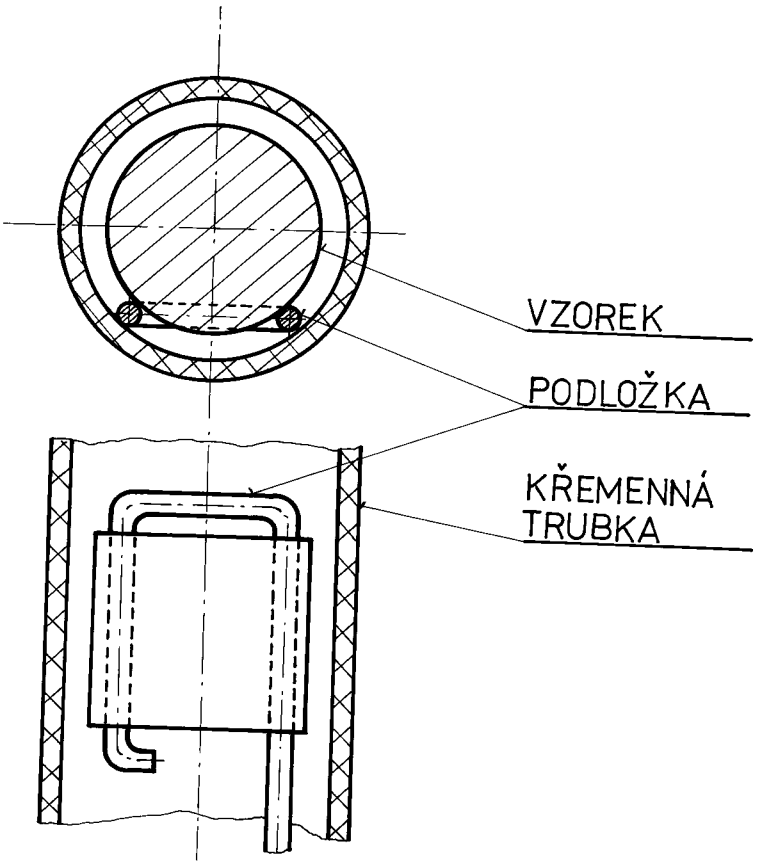
Obr. 11. Princip vakuového spojení trubky a tělesa.

Obr. 12. Sestavení zátky, kapiláry a termočlánku

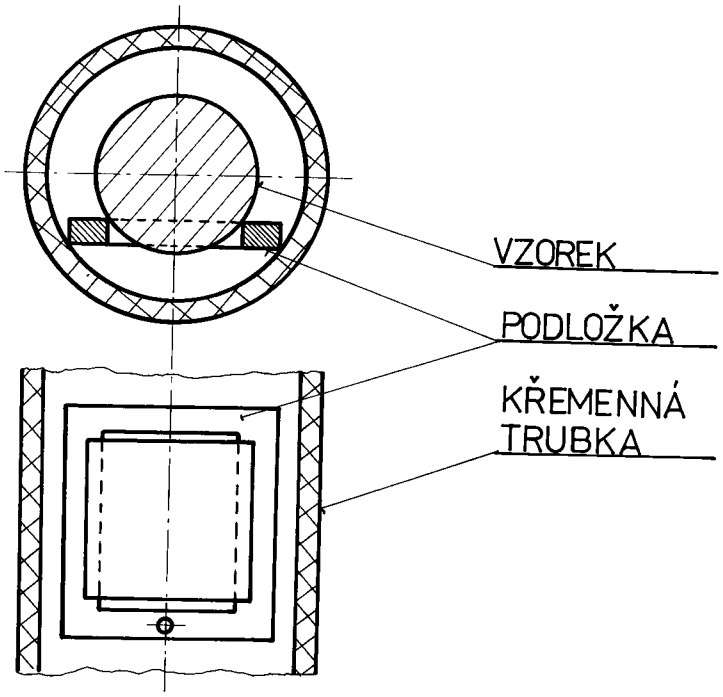
Obr. 10. Sestavení vakuové části pece

IV.41. Vystředění vzorku malého průměru

Požadavek lepšího vystředění vzorku v křemenné trubce a cívce induktoru je řešen položenímvzorku na podložku z molybdenového drátu odpovídajícího průměru. Druhým řešením může být uložení vzorku v plechovém rámečku odpovídajících rozměrů. Tato řešení jsou znázorněna na obr. 13 a 14. Vystřednění vzorku je důležité z hlediska stejnoměrného ohřevu a sycení povrchu vzorku plynem a to hlavně vzorků průměrů značně menších než je světlost křemenné trubky. Jedná se případ, kdy vzorek není navlečen na kapiláře.



Obr. 13. Vystředění vzorku pomocí drátěné podložky



Obr. 14. Vystředění vzorku pomocí plechové podložky

IV.5. Zdůvodnění použití materiálů

Při volbě materiálů součástí musí být brán ohled na to, v jakém prostředí budou pracovat. V případě vakuové indukční pece to jsou vysoké teploty a dále plyny a ochranné atmosféry, používané při chemickotepelném zpracování kovových materiálů. Tyto jsou vypsány v kapitole II.6. Trubka z křemenného skla (výrobek firmy Degussa - Hanau) jsem použil pro obzvláště výhodné tepelné vlastnosti tohoto materiálu, popsané v kapitole II.6. Tyto vlastnosti dobře vyhovují podmínkám v nichž bude pec pracovat (vysoká teplota - 1100°C; velké teplotní rozdíly vznikající v krátkém čase).

Pro těsnicí kroužky, použité na peci, je nejvýhodnějším materiálem silikonová guma, snášející trvale až 180°C vysoké teploty, při nichž si zachovává dobré pevnostní, elastické a tedy i těsnicí vlastnosti. Těsnicí kroužky kruhového průřezu jsou normalizovány - ČSN 02 92 81.

Na výrobu průchodky je použito teflonu pro jeho nevodivost a odolnost teplotám trvale do 200°C.

Základová deska je vyrobena z lisované vrstvené hmoty Umatex. Tento materiál je nevodivý a nebude tedy ohříván induktorem, který se nachází v jeho těsné blízkosti.

Pro výrobu konzoly, lůžka, válcového tělesa, zátky, třmenů a přírub může být použito konstrukční oceli třídy 11. Tyto součásti mohou být opatřeny vhodnou povrchovou úpravou proti korozi. Také šrouby jsou ocelové černěné.

Podložky použité k vystředění vzorků je možno vyrobit buď z molybdenového drátu nebo plechu. Důležitou vlastností zde je vysoká teplota tání molybdenu 2622°C.

V. Čištění pece

Protože v průběhu pokusů zaměřených na studium difuzních pochodů dochází ke znečištění pece uvnitř, musí být umožněno její čištění.

Čištění provádíme po demontáži zařízení různými způsoby, podle charakteru prováděného pokusu a použitého plynu. Čištění může být mechanické, chemické nebo kombinace obou. Je při něm nutno dbát na to, aby nedošlo k poškození součástí např. nevhodnou volbou chemikálií.

Vyčištěním zařízení předejdeme nežádoucímu ovlivnění pokusu nečistotami a zbytky plynu z pokusu předcházejícího.

Přo čištění křemenné trubky se doporučuje roztok chrómsírové směsi ve vodě.

VI. Způsob měření teploty vzorku

Na průběh difuzních pochodů má vliv teplota při níž difuze probíhá viz. kap. II.12. Musí být tedy zajištěno měření teploty vzorku v potřebném rozsahu a v požadovaném místě.

Bezdotykové měření teploty jsem vyloučil, protože na vnitřní stěně křemenné trubky se v průběhu difuze tvoří neprůhledný povlak a měření by bylo zkreslené, ne-li nemožné.

Měření teploty vzorku je tedy provedeno termočlánkem připojeným na ocejchovaný přístroj. Může to být termočlánek NiCr-Ni, který krátkodobě měří teploty do 1200°C nebo termočlánek PtRh-Pt k trvalému měření do 1300°C a krátkodobě do 1600°C. Termočlánek bude přivařen na vzorek do místa, kde nás zajímá velikost teploty.

Místo běžných termočlánků, by bylo také možno použít termočlánku plášťového při použití jiného druhu vývodu z pece. Tyto jsou však zatím obtížně dostupné na našem trhu.

VII. Způsob měření tlaku v zařízení

Měření tlaku může být provedeno kombinovaným vakuometrem Penning-Pirani například typem VTR 2 (výrobce n.p. Labora). Přístroj se napojí na vývod z pece k vývěvě.

VIII. Další zařízení potřebná pro provoz pece

Generátor GV 22 - vysokofrekvenční elektronkový
- pracovní kmitočet 200-500 kHz
- trvalý výkon 25 kW

výrobce ZEZ Rychnov

Zapisovač Zepakord - pro zápis průběhu teploty v čase

výrobce ZPA Nová Paka

Regulátor Zeparis PD (proporcionálně-derivační)

výrobce ZPA Nová Paka

Vakuové zařízení (obr.15)

vývěva - rotační olejová, dvoustupňová, výkon $5m^3$/hod.

n. p. Labora

vakuometr VTP 2 - n.p. Labora

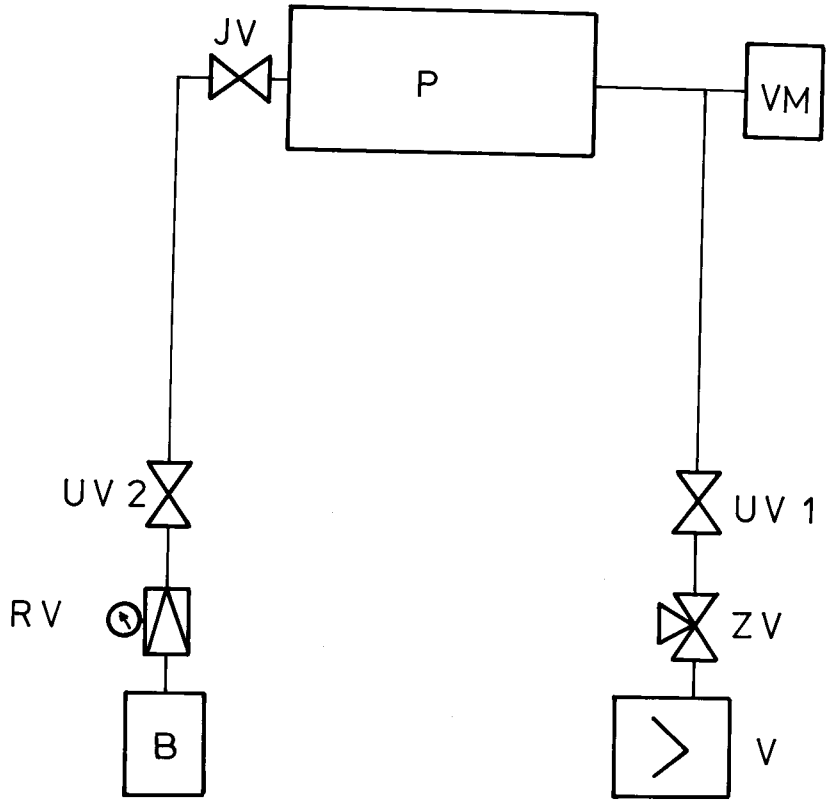
ventily uzavírací a zavzdušňovací

Napouštěcí zařízení (obr. 15)

jehlový napouštěcí ventil NV 20

ventily uzavírací a redukční

tlaková bomba s plynem



Obr. 15. Blokové schéma vakuové a napouštěcí aparatury

UV 1 - uzavírací ventil

ZV - zavzdušňovací ventil

V - vývěva

JV - jehlový napouštěcí ventil

UV 2 - uzavírací ventil

RV - redukční ventil

B - tlaková bomba

VM - vakuometr VTP 2

IX. Praktické odzkoušení zařízení

Abych si ověřil správnost návrhu induktoru i vakuové části pece provedl jsem několik zkoušek.

IX.1. Zkouška ohřevu

Při této zkoušce mě zajímalo, jak bude probíhat ohřev (rovnoměrnost) a jak rychle proběhne náběh na teplotu 1100°C. Zkoušku jsme prováděli mimo vakuovou část pece, vzorek, opatřený termočlánkem, byl uchycen ve zvláštním držáku a vsunut do dutiny cívky induktoru, připojeného na generátor GV 22. Dále jsme při zkoušce použili přístroj pro měření teploty Regula - DV - NiCr-Ni; 0-1200°C a světelný dvanáctikanálový zapisovač 12 LS-1 RFT a dělič napětí.

Nastavení generátoru

zapojení Y

Us = 395 V

Ua = 5 kW

Um = 12,3 V

Ia = 1,8 A

Im = 0,3 A

Provedli jsme ohřev vzorku na 1100°C v čase 30 vteřin. Zkoušku jsme ještě jednou opakovali na druhém vzorku s přibližně stejným výsledkem. Ohřev probíhal nerovnoměrně, obzvlášť kolem teploty přeměny. Tato nerovnoměrnost je zachycena i na grafickém záznamu ze zapisovače. (Přepracován na příl. XIII). Hodnota času k dosažení teploty 1100°C získaná zkouškou - 30 s se neshoduje s hodnotou vypočtenou - 45 s. Tato nesrovnalost vznikla zřejmě z příčin popsaných v kap. II.3. a III.3. Úhrnem je však možno říci, že ohřev probíhá dobře a má velkou rezervu výkonu.

Vzhledem k nevelké vzdálenosti induktoru od lůžek (110 mm) vznikla domněnka, že by tato mohla být vlivem rozptylového magnatického pole induktoru ohřívána. Výpočet oteplení lůžek působením induktoru v kombinaci se sáláním vzorku by byl složitý a s největší pravděpodobností i nepřesný. Proto jsem navrhl provedení zkoušky, při níž by po určitou dobu (cca 15 minut) byl vzorek udržován na teplotě 1100°C a po uplynutí této doby by se odměřila teplota lůžka.

Zajímala mě hlavně teplota v místě těsnění gumovým kroužkem. Zároveň jsem chtěl zjistit, do jaké míry jsou lůžka ovlivňována sáláním vzorku a také to, jak postupuje teplo vedením v křemenné trubce.

Z naměřené hodnoty teploty a známé hmotnosti příruby bych vypočítal množství přivedeného tepla. Z toho pak dále s ohledem na požadovanou maximální možnou teplotu v místě těsnění lze určit množství chladicí vody, potřebné dodat v určitém čase. Vedení tepla v plynu se při nižších tlacích může zanedbat vlivem vlastností zředěného plynu, popsaných v kap. II.4.

Tato zkouška byla provedena na sestaveném zařízení. Vzorek, který volně ležel v křemenné trubce, byl zahřát až na teplotu tání a byla měřena teplota jednoho lůžka. K ohřátí lůžka nedošlo a křemenná trubka byla silně zahřátá pouze lokálně v místě uložení vzorku. Z těchto důvodů jsem tedy upustil od tepelného výpočtu.

Kdyby však v budoucnu měla být pec používána k dlouhodobějším ohřevům, pak konstrukce pece umožňuje chlazení lůžek vodou. Odvod tepla z křemenné trubky z místa před gumových těsněním by byl v tomto případě zprostředkován tmelem Umatherm, jimž by byla vyplněna kruhová mezera mezi trubkou a lůžkem.

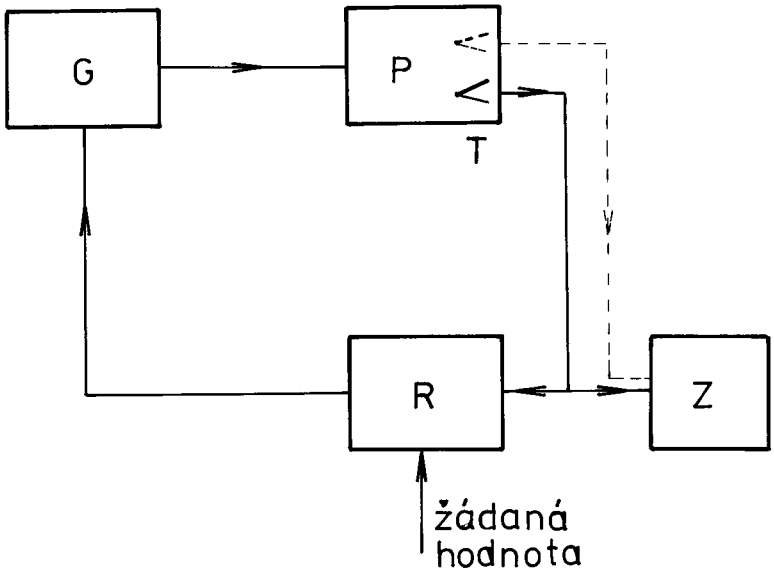
IX.2. Zkouška těsnosti zařízení

Těsnost vakuové aparatury ověříme jejím vyčerpáním a uzavřením. Z velikosti a průběhu stoupání tlaku můžeme posoudit těsnost aparatury. V každé neodplyněné aparatuře bude po vyčerpání a uzavření stoupat tlak. U těsné aparatury je toto stoupání dáno množstvím plynů uvolněných ze stěn. Po čase nastane rovnováha a tlak se dále nemění.
V netěsné aparatuře bude tlak stoupat stále až na hodnotu atmosferického tlaku. /10/. Místo, kde se nachází netěsnost, lze najít několika různě citlivými metodami popsanými v /9/ a /10/. Vybral jsem nejjednodušší z nich.
V sestavené aparatuře (nebo její uzavřené součásti) se zvýší tlak a součást se celá ponoří do nádoby s vodou. V místě netěsnosti se tvoří bublinky. Rychlost tvorby bublin je mírou velikosti netěsnosti. Tlak vzduchu v aparatuře musí být tak velký, aby vytlačil vodu, drženou v netěsnosti kapilárními silami. Tam, kde není možno součásti ponořit do vody, lze podezřelá místa potírat mýdlovou vodou (nebo saponátovým roztokem). Na netěsných místech se opět tvoří bubliny. Citlivost této metody je asi 10^{-4} torr.l/s. /9/
Tato metoda tedy vyhovuje pro náš případ jak svou citlivostí tak i tím, že naše zařízení je poměrně malých rozměrů.
Zkouška byla provedena při přetlaku 0,15 MPa. Bublinky se netvořily, pec vykazovala při této zkoušce naprostou těsnost.

X. Návrh regulace teploty

Regulaci bych navrhoval provést pomocí "start-stop" režimu, který by byl řízen regulátorem Zeparis PD. Ten by byl napojen svými releovými kontakty na ovládací smyčku pomocného obvodu generátoru. Blokové schéma regulace je na obr. 16.

Regulátor Zeparis PD (proporcionálně-derivační) omezuje kolísání regulované veličiny, způsobené tepelnou setrvačností soustavy.



Obr. 16. Blokové schéma regulační soustavy

G ... generátor

P ... pec

R ... regulátor Zeparis PD

T ... termočlánek

Z ... zapisovač Zepakord

XI. Závěr

Tato práce byla zaměřena na vyvinutí vakuové indukční pece pro studium difuzních dějů v laboratorních podmínkách. Cílem bylo zkonstruovat zařízení, které by umožňovalo studium procesů chemickotepelného zpracování kovů, za podmínek vysokofrekvenčního indukčního ohřevu.

Byl proveden návrh zařízení a na základě vypracované dokumentace vyroben jeho prototyp. Ten byl odzkoušen po stránce ohřevu i těsnosti.

Na základě výsledků získaných těmito zkouškami, lze říci, že zařízení je schopno ohřívat vzorek průměru 25 mm a délky 25 mm na teplotu 1100°C v čase 30 vteřin. Tato teplota může být udržována po dobu přibližně 30 minut, aniž by došlo k překročení provozní teploty použitých materiálů. Při déle trvajícím procesu se použije vodního chlazení, kterým je zařízení vybaveno. Hodnota netěsnosti je podle provedené zkoušky pod 10^{-4} torr.l/s. Zařízení se dále vyznačuje poměrně jednoduchým a rychlým způsobem montáže a demontáže.

Z těchto závěrů lze vycházet při doporučení dalšího směru vývoje.

XII. Další směry vývoje

V současné době je zařízení určeno pro použití k práci za podtlaku a vzhledem k tomu bylo také odzkoušeno. Při dalším vývoji by bylo vhodné přesnější vyzkoušení vakuové těsnosti , použitím některé z přesnějších metod zkoušek s citlivostí 10^{-5} torr.l/s podle literatury /9/ a /10/.

Dále by bylo třeba prověřit schopnost zařízení pracovat i za mírných přetlaků a odzkoušet jejich přípustnou velikost.

Je také nutno realizovat návrh regulace teploty a provést její odzkoušení. Pakliže by tato byla nevyhovující, provedla by se její obměna na regulaci spojitou.

Dalším směrem vývoje by také mohlo být vyřešení regulace velikosti vakua připojením vhodného regulátoru na vakuometr VTP 2 a na uzavírací ventil mezi pecí a vývěvou.

V závěru děkuji vedoucímu diplomové práce s. ing. Jiřímu Horynovi CSc, konzultantům s. ing. Daniele Fryaufové a s. ing. Karlu Ďaďourkovi CSc, s. Antonínu Vojtěchovi a všem pracovníkům a pedagogům VŠST v Liberci za ochotu a veškerou pomoc při zpracování diplomové práce.

V Liberci dne 12. 6. 1981

Tomáš Lisner

Tomáš Lisner

Seznam literatury

/ 1/ Píšek F.: Nauka o materiálu. 1. vyd. Praha 1957. 1. sv.

/ 2/ List V.: Technický průvodce (Elektrické teplo). 3. vyd. Praha 1958. 20. sv.

/ 3/ Espe W.: Technológia hmôt vákuovej techniky. 1. vyd. Bratislava 1962. 3. sv.

/ 4/ Jiřička Z.: Indukční ohřev v kovárnách. 1. vyd. Praha 1966. 125. sv.

/ 5/ Přenosil B.: Nitrocementace. 1. vyd. Praha 1964

/ 6/ Sedláček V.: Difuzní a precipitační procesy v kovových soustavách. 1. vyd. Praha 1968

/ 7/ Zobač L.: Základy vakuové techniky. 1. vyd. Praha 1954

/ 8/ Stivín J.: Vysokofrekvenční ohřev v průmyslu. 1. vyd. Praha 1955. 1. sv.

/ 9/ Češpíro Z.: Vakuová technika. Praha 1973

/10/ Češpíro Z.: Vakuové praktikum. Praha 1967

/11/ Espe W.: Technológia hmôt vákuovej techniky. 1. vyd. Bratislava 1962. 2. sv.

/12/ Bulíř M.: DP VŠST Liberec. VŠST Liberec 1977

Přílohy

Pozice, uvedené v příloze "Sestavení pece (návod)" a "Způsob vkládání vzorků", jsou odpovídající pozicím v kapitole IV.4. a jsou obsaženy na výkrese č. KMM-08-01, na obr. 10 a 12 a na přiložených fotografiích.

Obsah příloh

Sestavení pece (návod) ..... I.

Způsob vkládání vzorků ..... II.

Připojení induktoru na generátor ..... IV.

Detail vývodu termočlánku z pece ..... V.

Detail vyústění termočlánku z kapiláry ..... VI.

Součásti sestavy zátky ..... VII.

Součásti sestavy tělesa a třmen ..... VIII.

Detail uložení křemenné trubky v lůžku ..... IX.

Detail provedení sražení na tělese ..... X.

Zařízení při zkoušení ohřevu ..... XI.

Vzorky použité při zkoušení ohřevu ..... XII.

Průběh teploty v čase ..... XIII.

Sestavení pece (návod)

1) Na základovou desku /pos.1/ přišroubujeme konzoly /pos.2/ s lůžky /pos.3/, každou třemi šrouby M6.

2) Na jeden konec křemenné trubky navlékneme těsnící kroužek /pos.17/ a trubku nasuneme do lůžka.

3) Po prostrčení otvorem lůžka navlékneme na trubku cívku induktoru a trubku vsuneme do druhého lůžka.

4) Na konec trubky, vyčnívající z otvoru uvnitř druhého lůžka, navlékneme druhý těsnící kroužek.

5) Provedeme domačknutí kroužků na dna dutiny lůžek.

6) Do jednoho lůžka nasuneme válcové těleso s neprůchozím otvorem, převlékneme třmen /pos.11/ a po vystředění trubky v otvoru lůžka utahneme šroub M10 /pos.12/.

7) Do druhé příruby pouze nasuneme těleso (pos.5/ a do něj těsnící kroužek /pos.18/.

8) Takto sestavené zařízení připojíme po položení na vhodný podstavec ke svorkám generátoru a napojíme na přívod chladící vody.

9) K zařízení připojíme vývěvu a napouštěcí ventil.

10) Způsobem,popsaným dále, vložíme vzorek, přes zátku /pos.7/ převlékneme třmen a dotažením šroubu utěsníme druhý konec zařízení.

11) Vývody termočlánků připojíme na měřicí či regulační zařízení a na zapisovač.

Rozebrání provedeme obráceným postupem.

Způsob vkládání vzorků

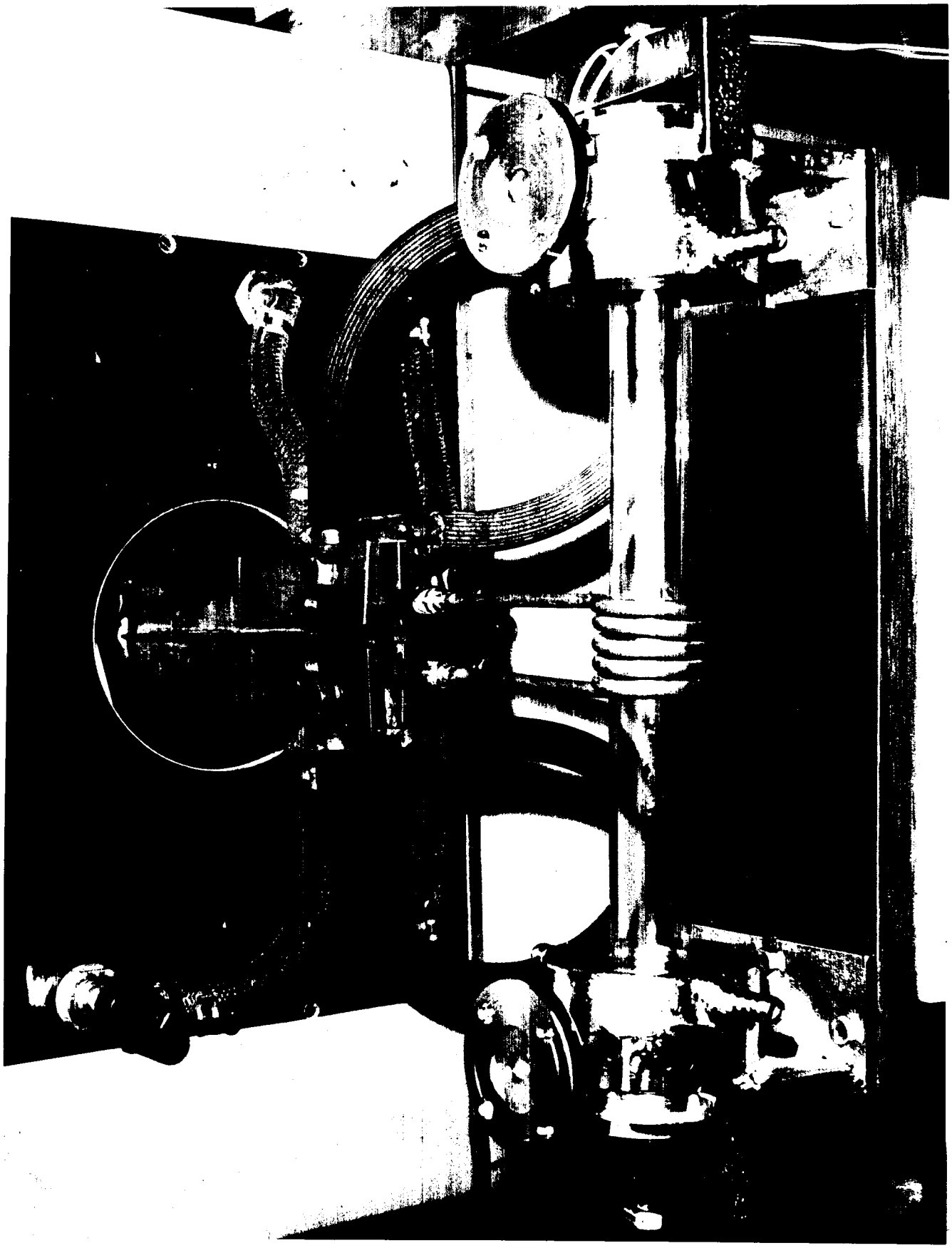
Způsob vkládání vzorků bude odvislý od toho, zda budeme měřit povrchovou nebo vnitřní teplotu vzorku nebo obě současně. Předpokládejme druhý případ a dále to, že zařízení je již sestaveno a chybí pouze vložit vzorek a uzavřít těleso /pos.5/ zátkou /pos.7/.

Svařený termočlánek provlékneme kapilárou, na níž je navlečena teflonová průchodka a jedním gumovým kotoučkem. Potom vedeme drátky termočlánku souběžně od otvorů v kroužku na kraj kroužku a přitiskneme tuto sestavu na druhý kroužek, položený na zátce. Přitom je třeba, aby se kryly otvory pro šrouby. Pomocí šroubů M4 stahneme všechny části v jeden celek. Před úplným dotažením šroubů je ještě třeba navléknout na vývody termočlánku bužírky, které zasuneme v délce asi 3 mm mezi gumové kotoučky. Tím je zajištěno, že se vývody termočlánků nebudou dotýkat kovových částí (zátky, tělesa, lůžka). Takto připravený termočlánek (obr. 12) přivaříme do dutiny vzorku, který přitom zároveň nasuneme na kapiláru. Hotový komplet uchopíme za zátku a opatrně nasuneme do válcového tělesa a křemenné trubky. Pak už jen zbývá převléknout třmen přes zátku a dotáhnout šroub.

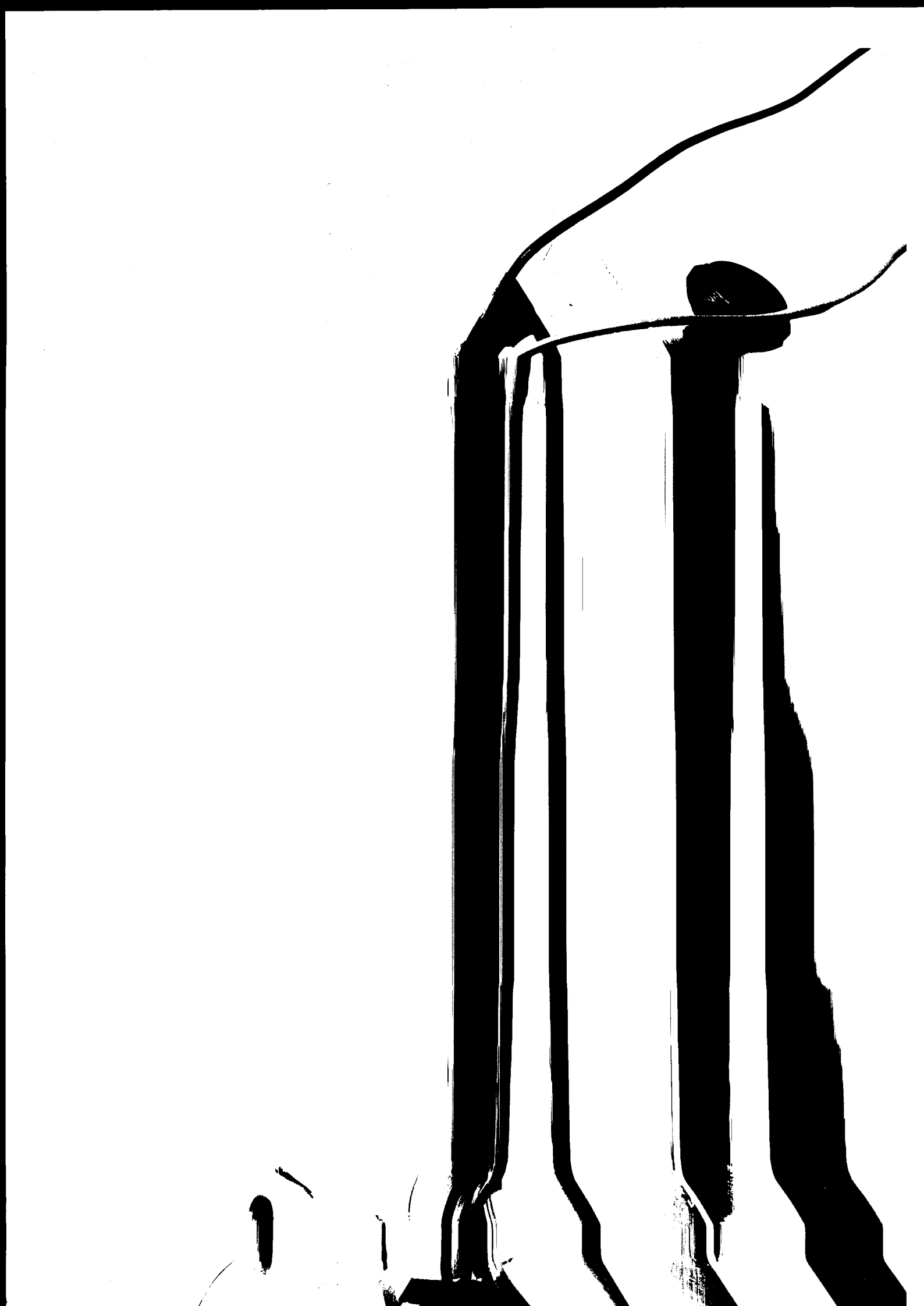
Výjmutí vzorku provedeme opačným způsobem.

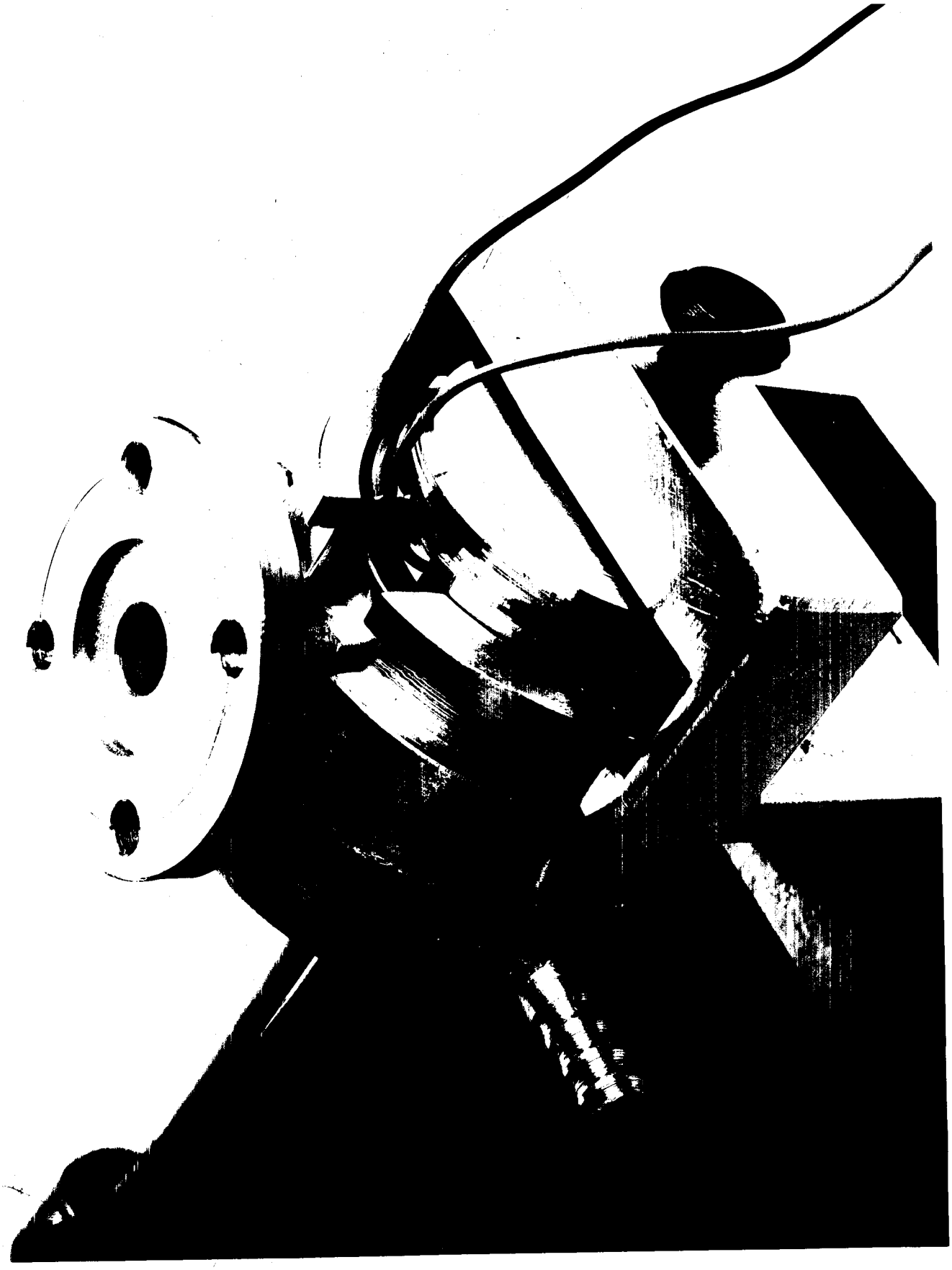
Chceme-li měřit také vnější teplotu na vzorku (tedy na jeho povrchu) provlékneme druhý termočlánek otvory v teflonové průchodce a prvním gumovém kroužku, dále jej vedeme stejně jako první. Je třeba dát pozor na to, aby nedošlo k vzájemnému dotyku termočlánků. V místě vedení mezi vzorkem a průchodkou budou navlečeny keramické korálky. Druhý termočlánek

opět přivaříme na vzorek v místě, kde chceme měřit teplotu. Při vkládání dalšího vzorku již celou sestavu na zátce nerozebíráme. Povolíme pouze šrouby M4 a termočlánek popotáhneme. Šrouby opět utahneme. Provedeme svaření termočlánku a navaření na vzorek, který je tímto připraven k vložení do pece. Při manipulaci se zátkou a vzorkem je třeba dát pozor na to, aby nedošlo k pootočení kapiláry v průchodce. Došlo by tím k překroucení termočlánku a jeho vzájemnému dotyku. Polohu kapiláry v průchodce je proto dobré označit ryskami. Pokud by nevyhovovalo navlečení vzorku na kapiláru, vsunul by se vzorek s navařeným termočlánkem do trubky a to až za lůžko. Dále by se posunul pomocí permanentního magnetu s pólovým nástavcem až do cívky induktoru.



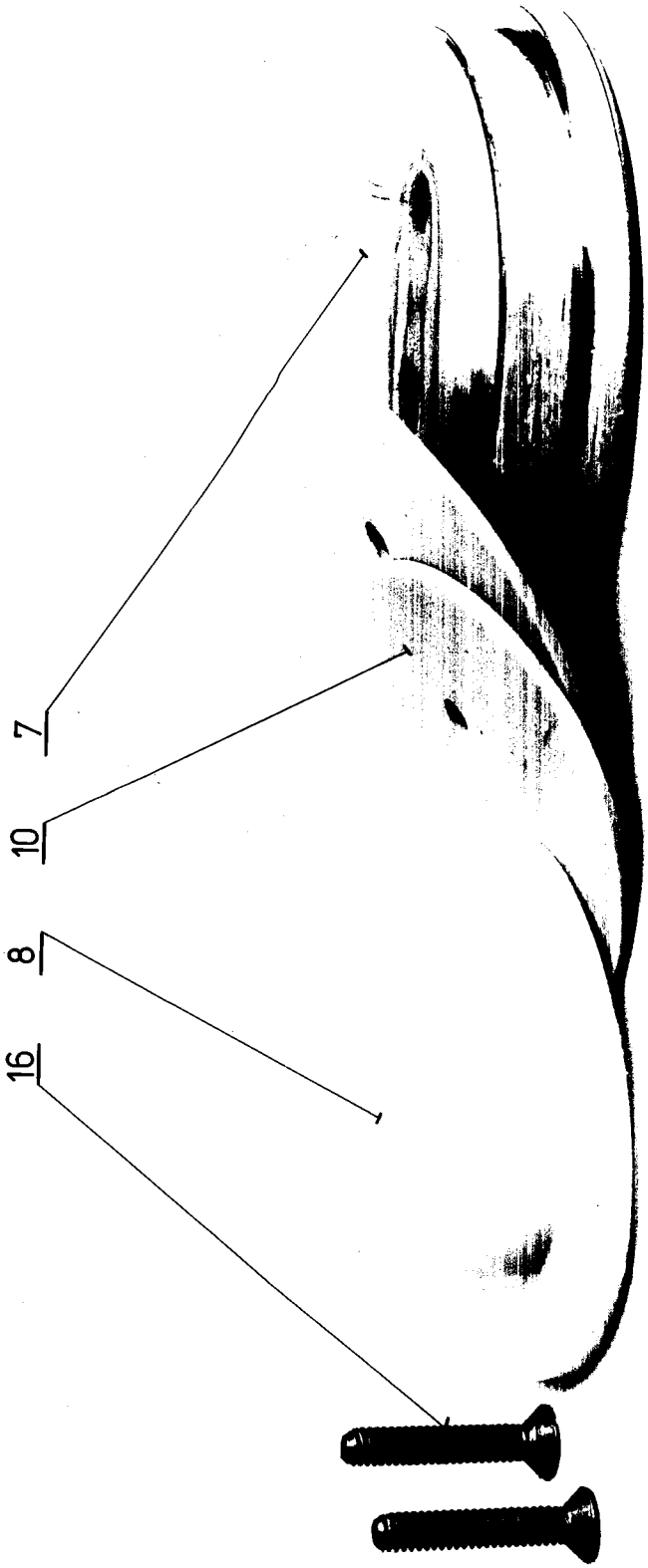
Připojení induktoru na generátor



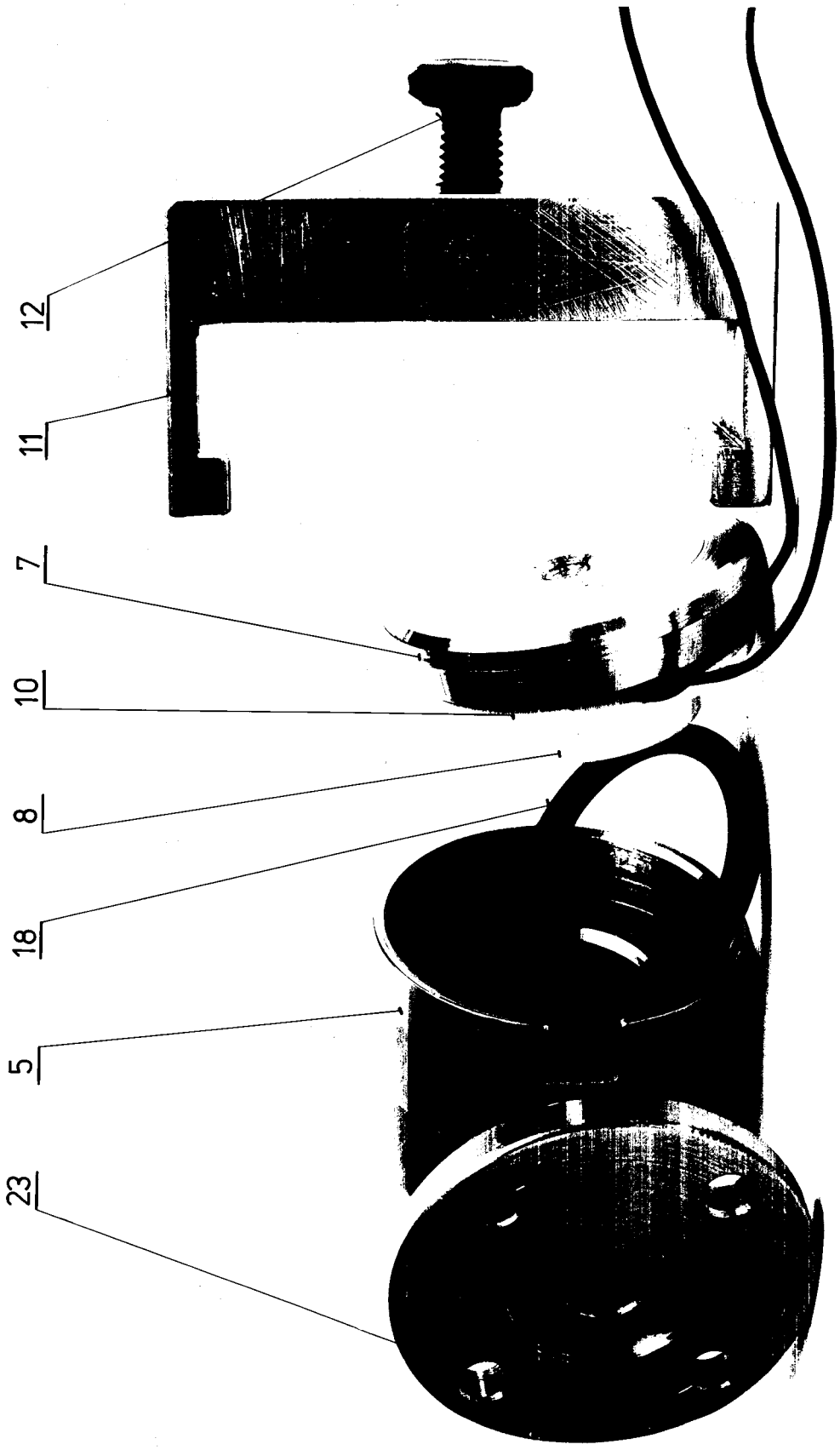


Detail vývodu termočlánku z pece

Detail vyústění termočlánku z kapiláry



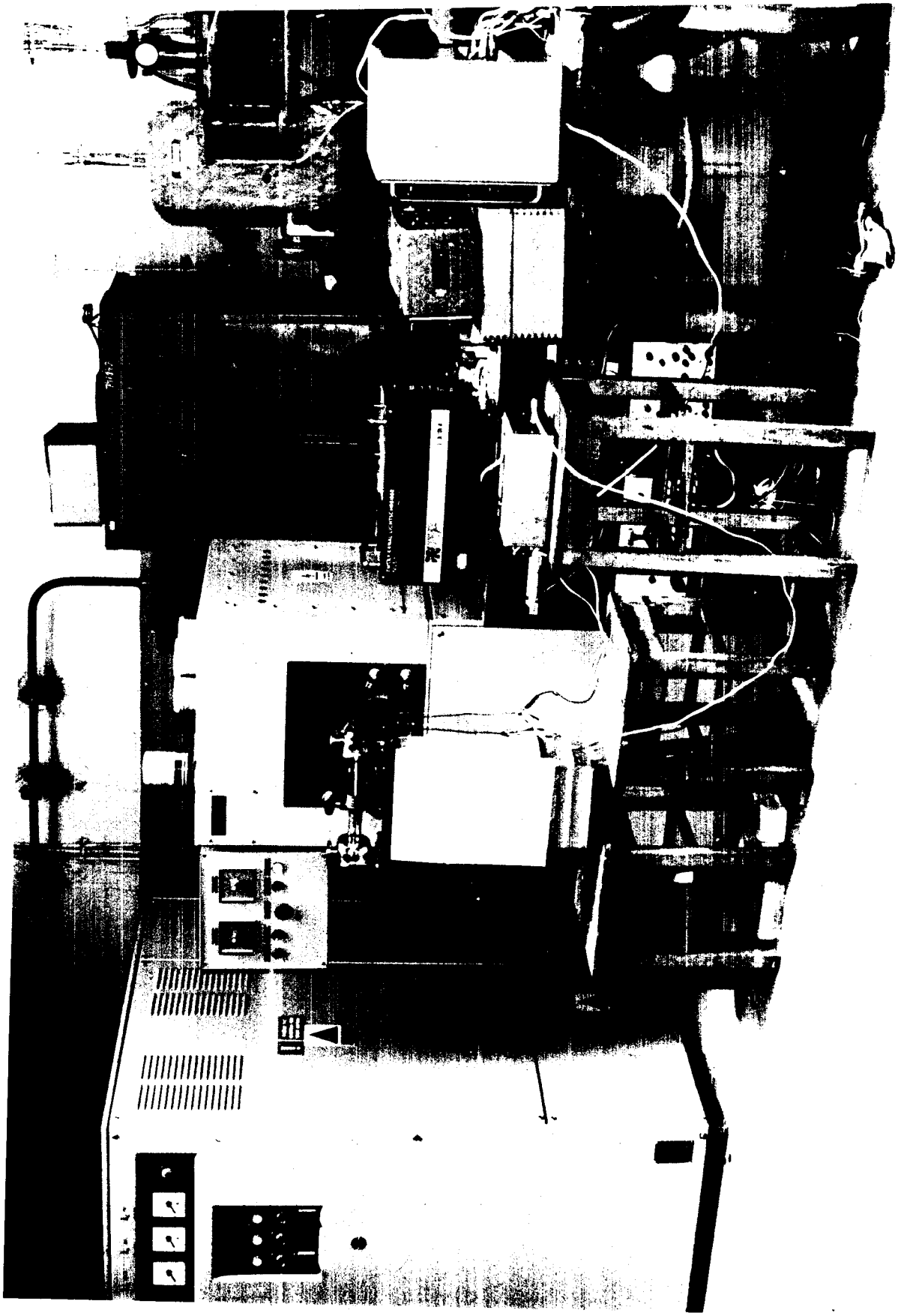
Součásti sestavy zátky



Součásti sestavy tělesa a třmen

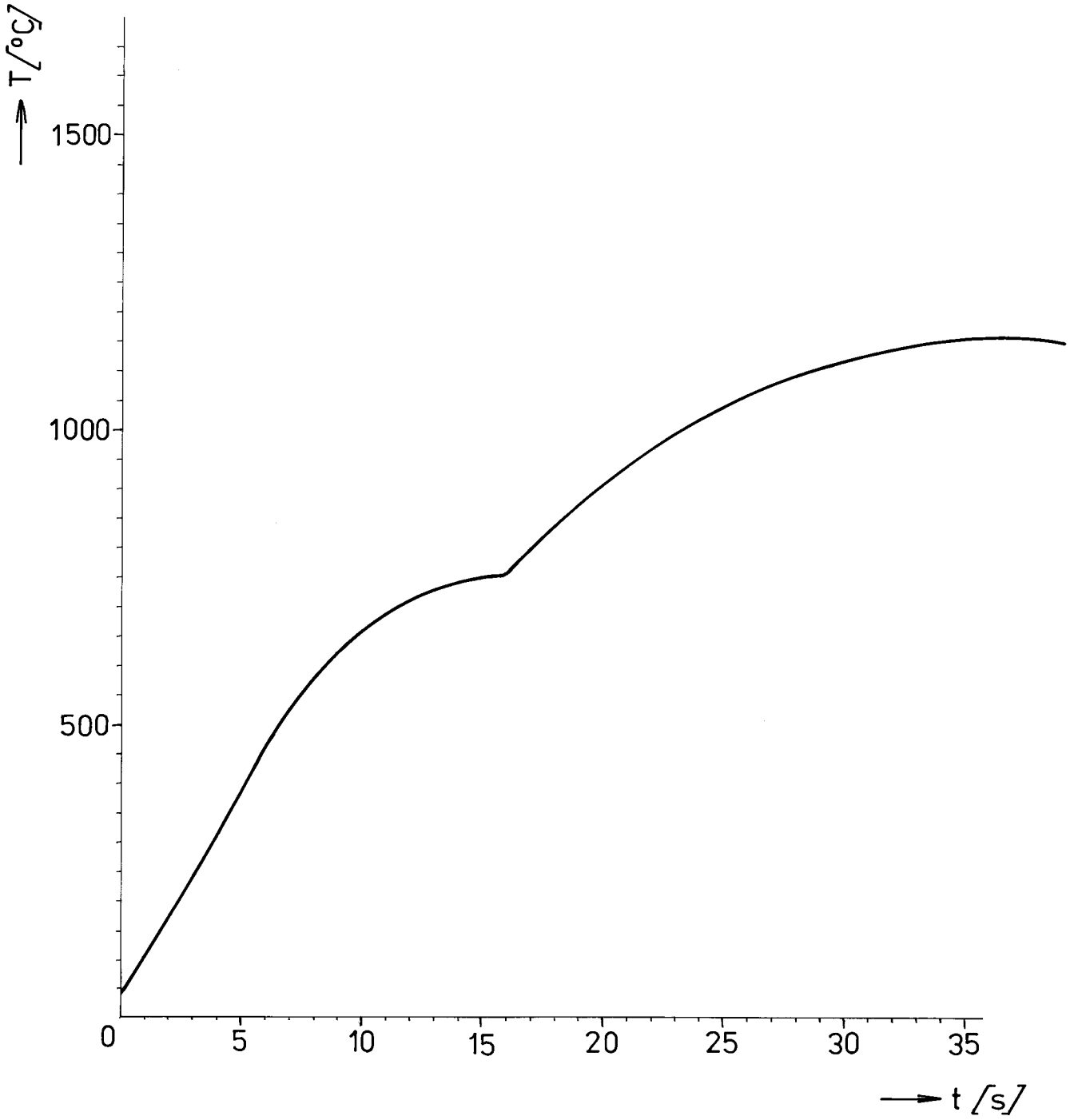
Detail uložení křemenné trubky v lůžku

Detail provedení sražení na tělese

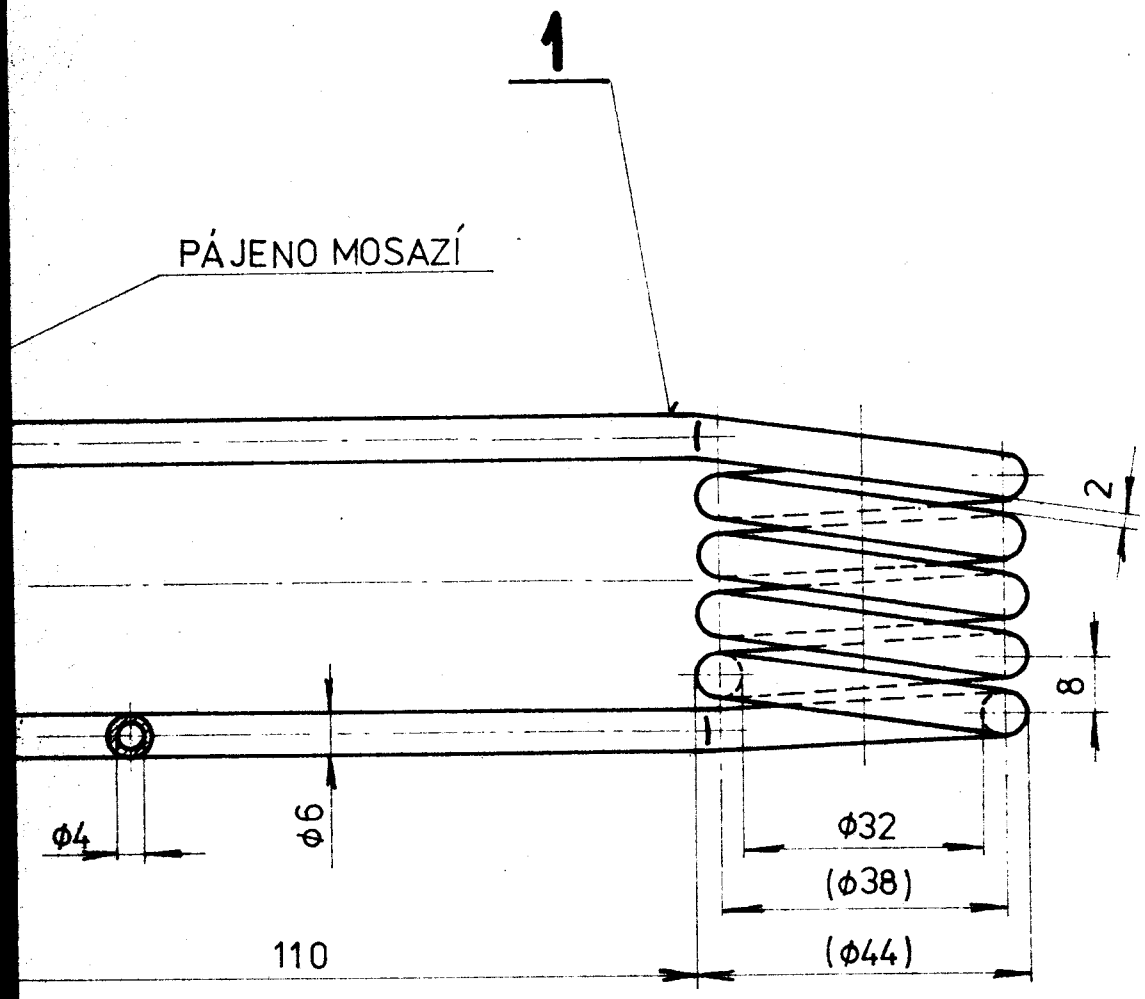


Zařízení při zkoušení ohřevu

Vzorky použité při zkoušení ohřevu



Průběh teploty v čase



2	ÚCHYT ϕ12/8×145	ČSN42 8710	42 3004.02	——	—	0,1	0,11	——	2
1	CÍVKA ϕ6/4 × 840	ČSN42 8710	42 3004.02	——	—	0,16	0,18	——	1
						0,26			

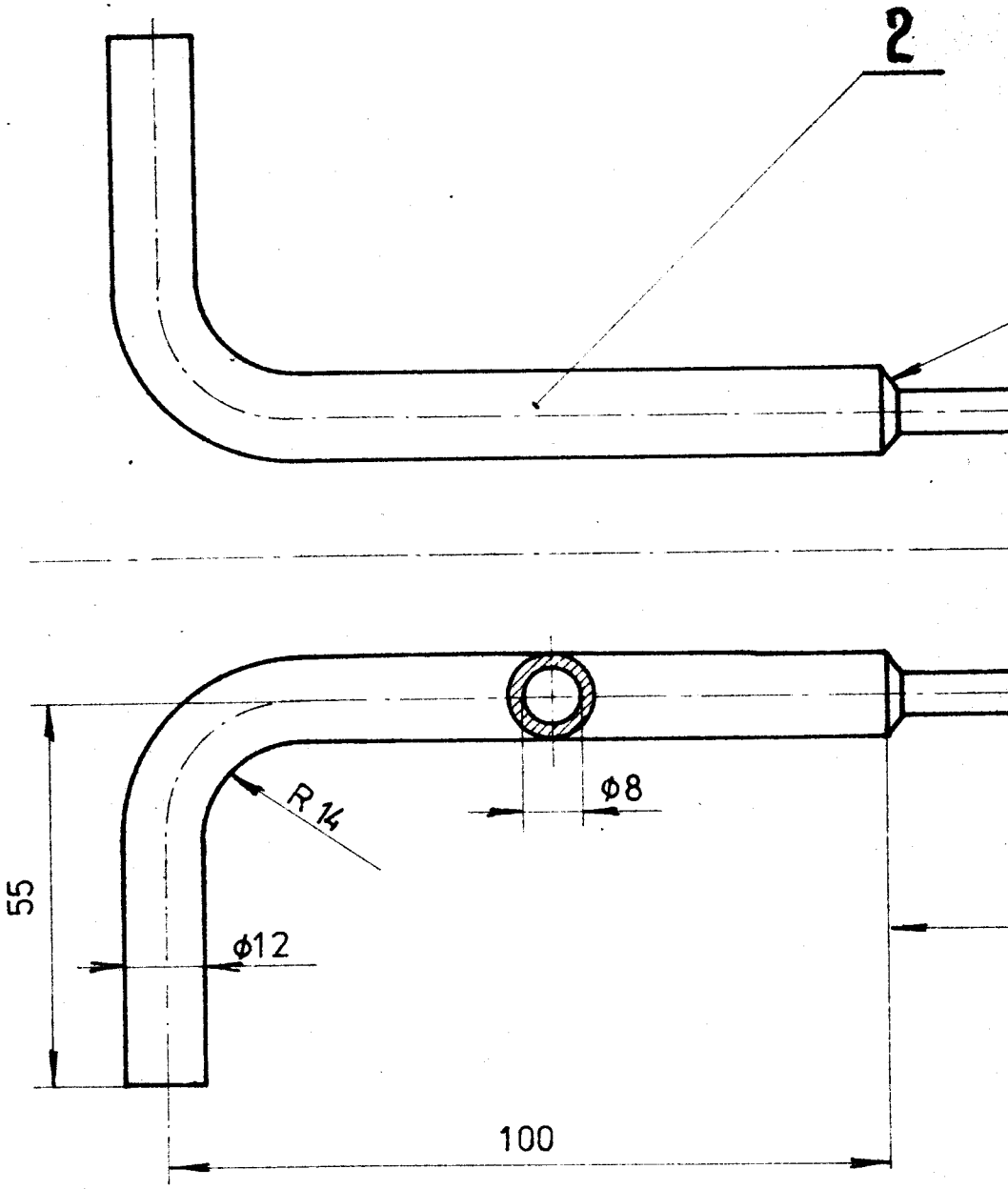
LISNER

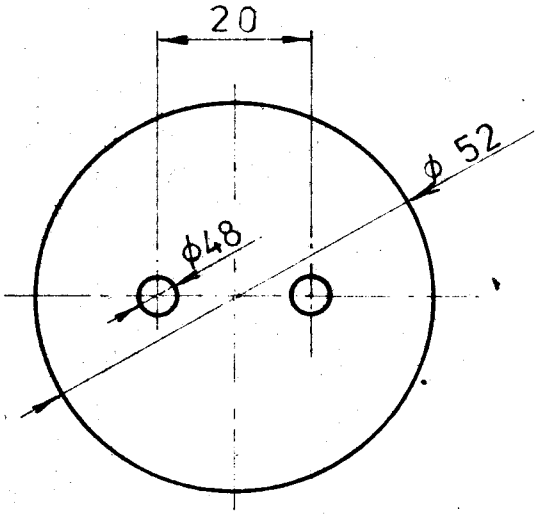
1:1

VŠST Liberec

INDUKTOR

KMM-08-19


2
R14
ϕ8
55
ϕ12
100

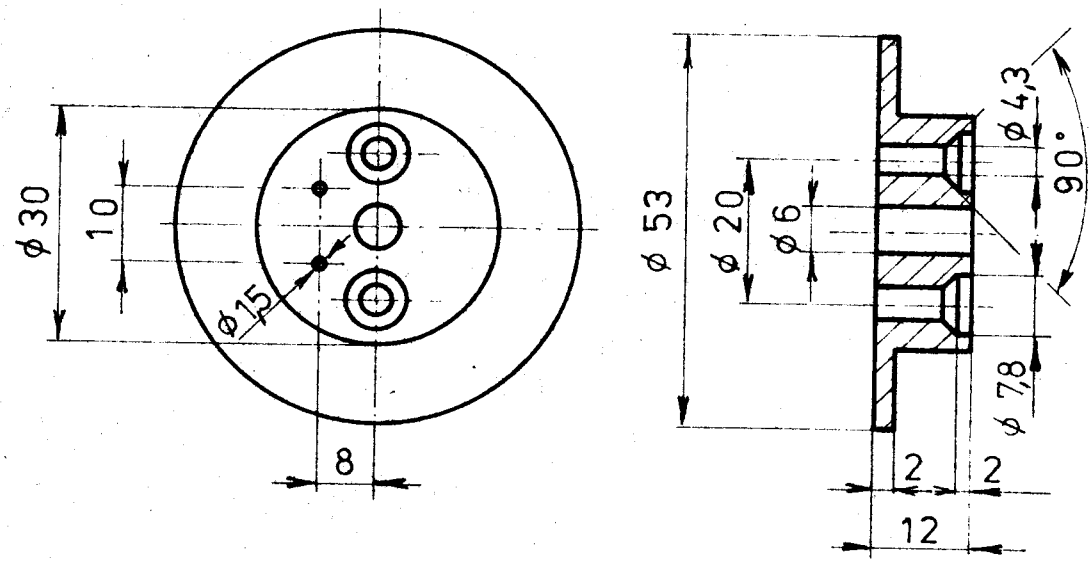


2	1,5 × 60 × 60	SILIKONOVÁ GUMA	0,005	KMM-08-01	10

1:1	LISNER	Lisner

VŠST Liberec	TĚSNĚNÍ	KMM-08-18

3,2



1	ϕ 55 - 12		TEFLON		0,005	0,008	KMM-08-01	8
Počet kusů	Název - Rozměr	Norma - Polotovar						

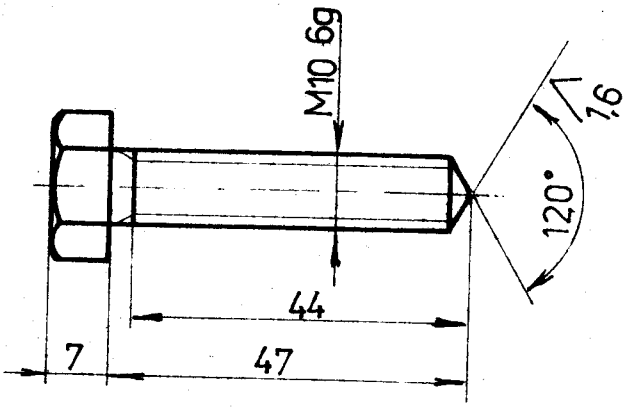
Poznámka

Měřítko: 1:1	Kreslil: LISNER	
	Přezkoušel:	
	Norm. ref.:	
	Schválil:	Schválil
	Mat. ref.	Datum

VŠST Liberec

Název: PRŮCHODKA

KMM-08-17



2	ŠROUB M 10 × 50	ČSN 021101	ČSN 021101			0,03	0,032	KMM-08-01	12
Počet kus.	Název - Rozměr	Norma - Polotovar	Mat. číslo					Číslo výkresu	Poz.

Poznámka

Měřítko 1:1

Kreslil: LISNER

Přezkoušel:

Norm. ref.:

Výr. projekt.:

Mat. ref.:

Schválil:

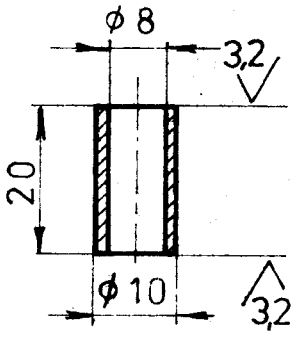
Datum:

VŠST Liberec

Typ:

Název: ŠROUB

KMM-08-16



4	TRUBKA Js 10-20	ČSN 131020	11 353.1		1	0,001	0,002	KMM-08-01	22

Kreslil LISNER

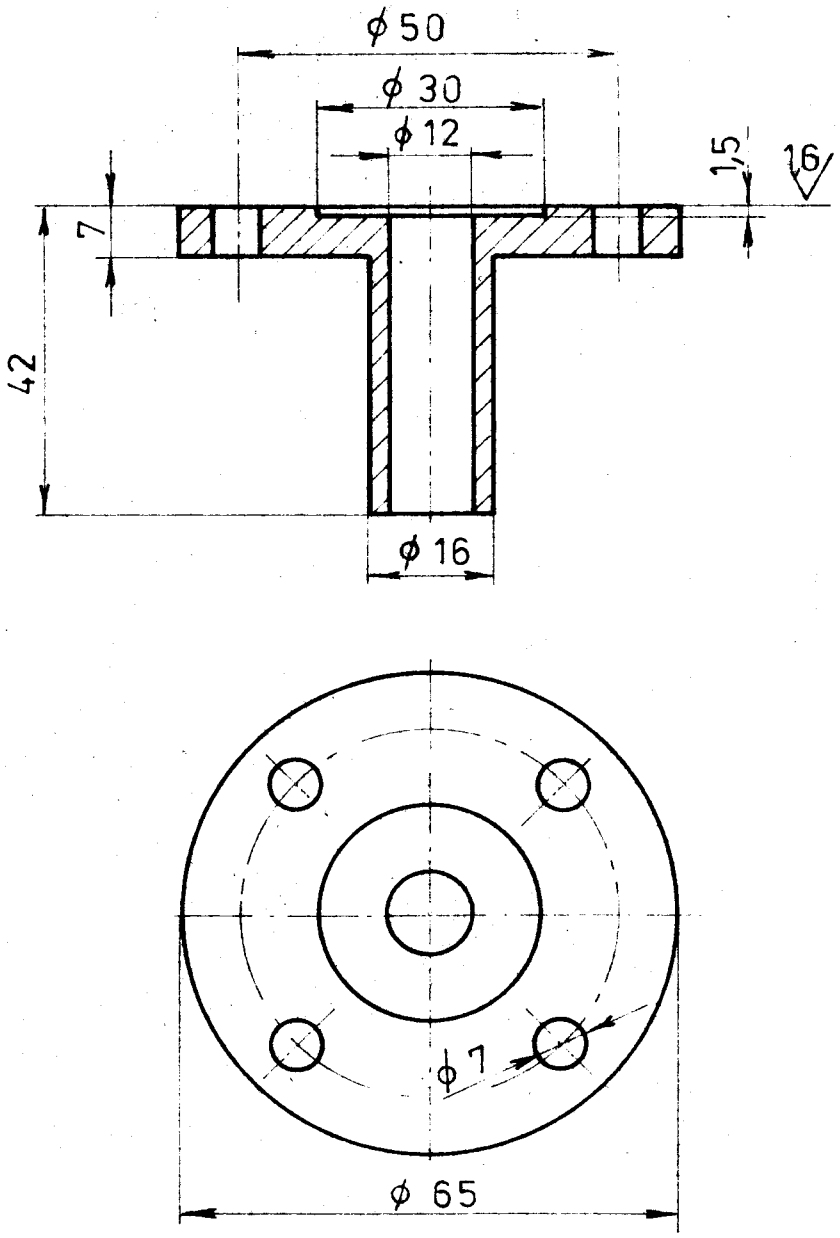
1:1

VŠST Liberec

HRDLO

KMM-08-15

32 (√)

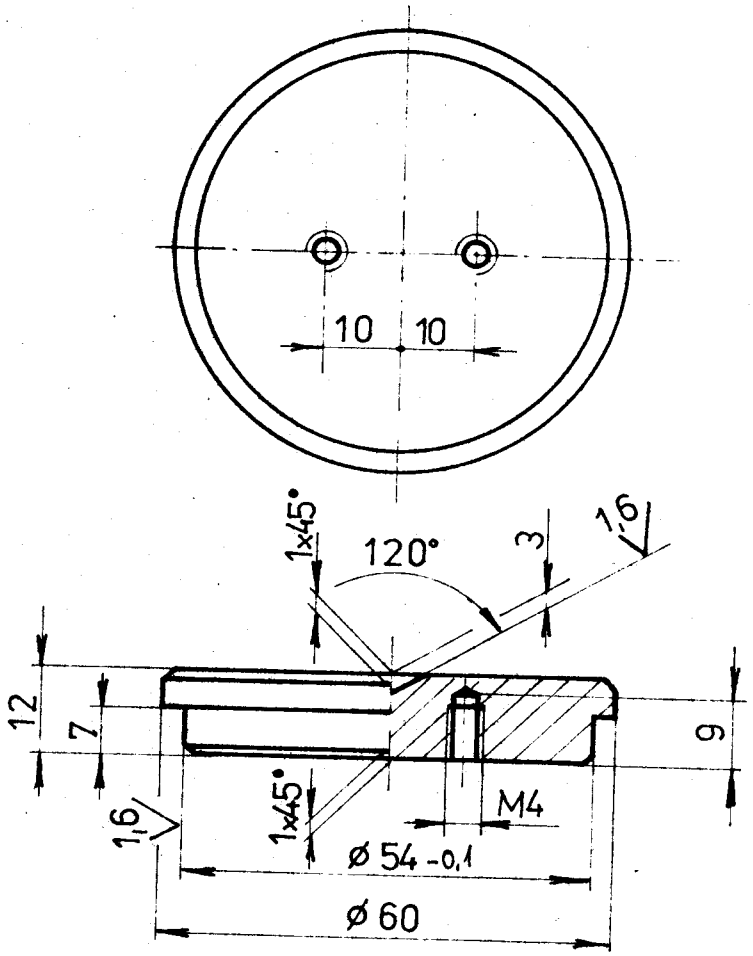


HRANY SRAZIT 0,5 x 45°

2	ϕ 68 - 42	ČSN425510 1	11 373 1		1	0,18	0,22	KMM-08-01	23

1:1	LISNER	
VŠST Liberec	HRDLO	KMM-08-14

3,2 (✓)



1	ϕ 63 - 12	ČSN425510.1	11373.1		1	0,2	0,21	KMM-08-01	7
Číslo	Název - Rozměr	Norma - Polotovar							Poz.

Poznámka:

Měřítko: 1:1	Kreslil: LISNER	Lisner	
	Přezkoušel:		
	Norm. ref.:		
	Výr. projedn.:	Schválil:	
	Stol. ref.	Dne:	

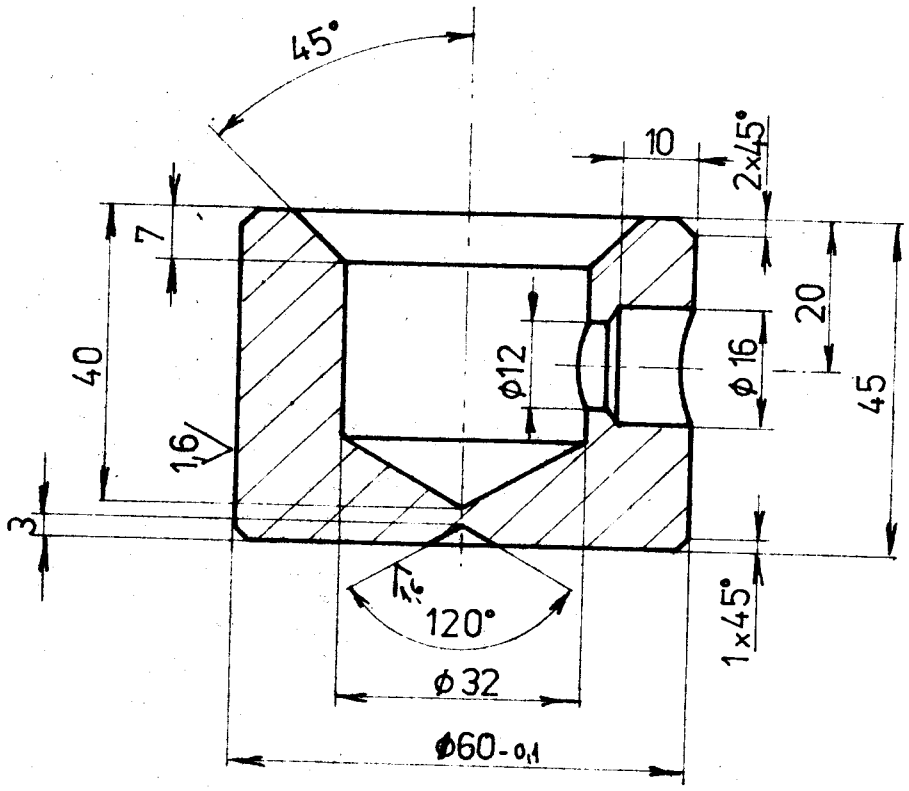
VŠST Liberec

Typ: | Skupina:

Název: ZÁTKA

KMM-08-13

√(√)

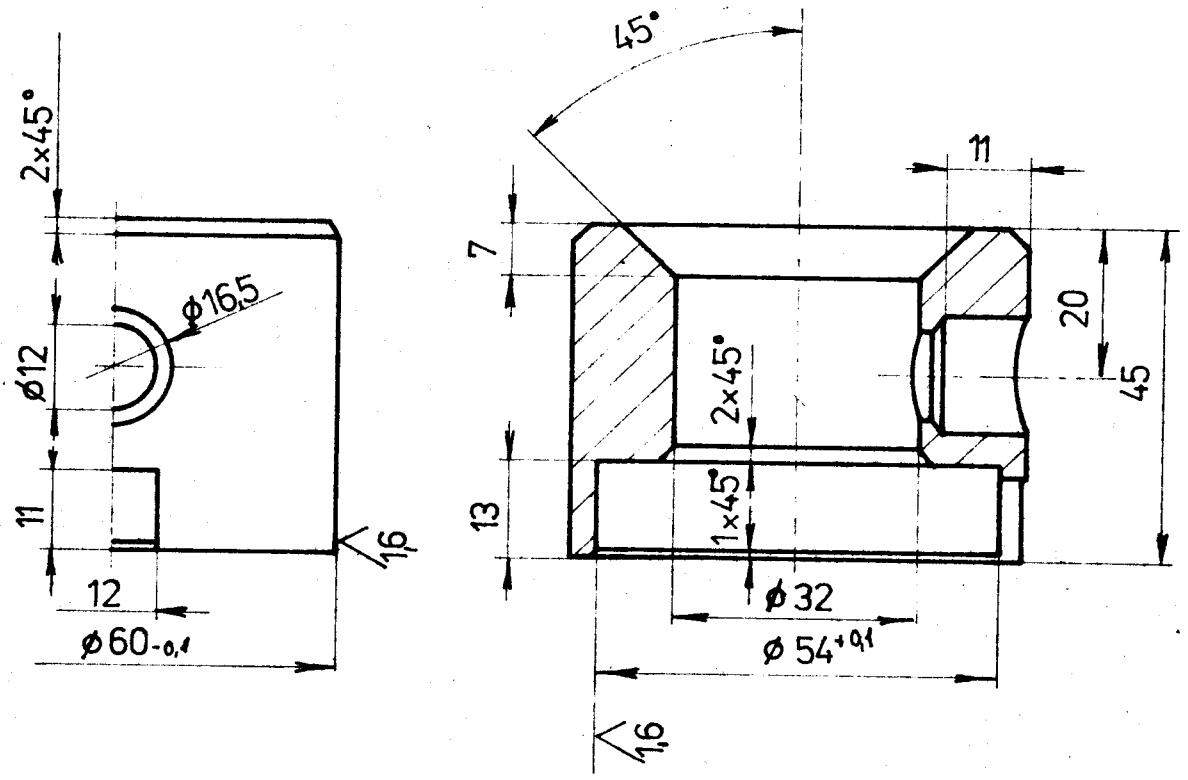


1	ϕ 63-45	ČSN425510.1	11373.1		1	0,78	0,84	KMM-08-01	6
Číslo	Název - Rozměr	Norma - Polotovar	Vaz. konečný						

1:1	LISNER	Lisner	

VŠST Liberec	TĚLESO	KMM-DB-12	

3,2 (✓)



1	ø 63-45	ČSN425510.1	11 373.1		1	0,62	0,72	KMM-08-01	5
Poz.	Název - Rozměr	Norma - Polotovar	Mat. kvalita						

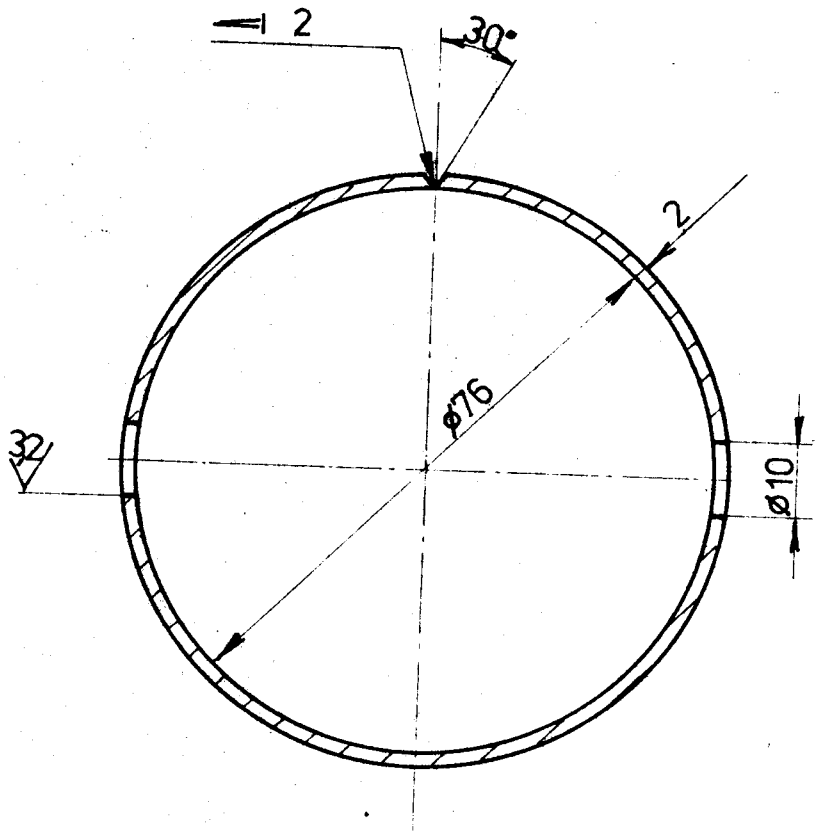
Poznámka:

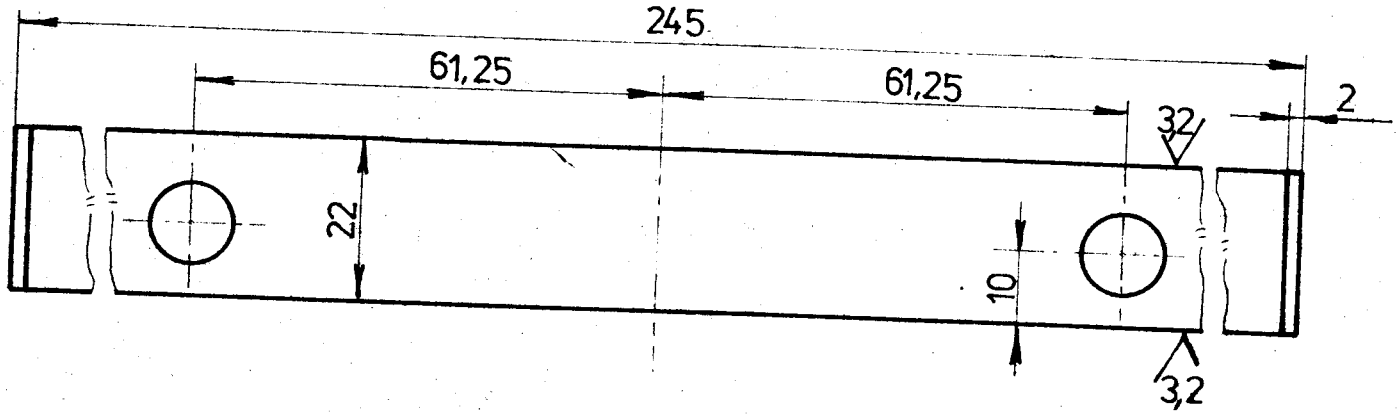
Měřítko 1:1	Kreslil: LISNER	Lisner	
	Přezkoušel:		
	Norm. ref.:		
	Výr. probedn.:		
	Mat. ref.:		

VŠST Liberec

Název: TĚLESO

KMM-08-11





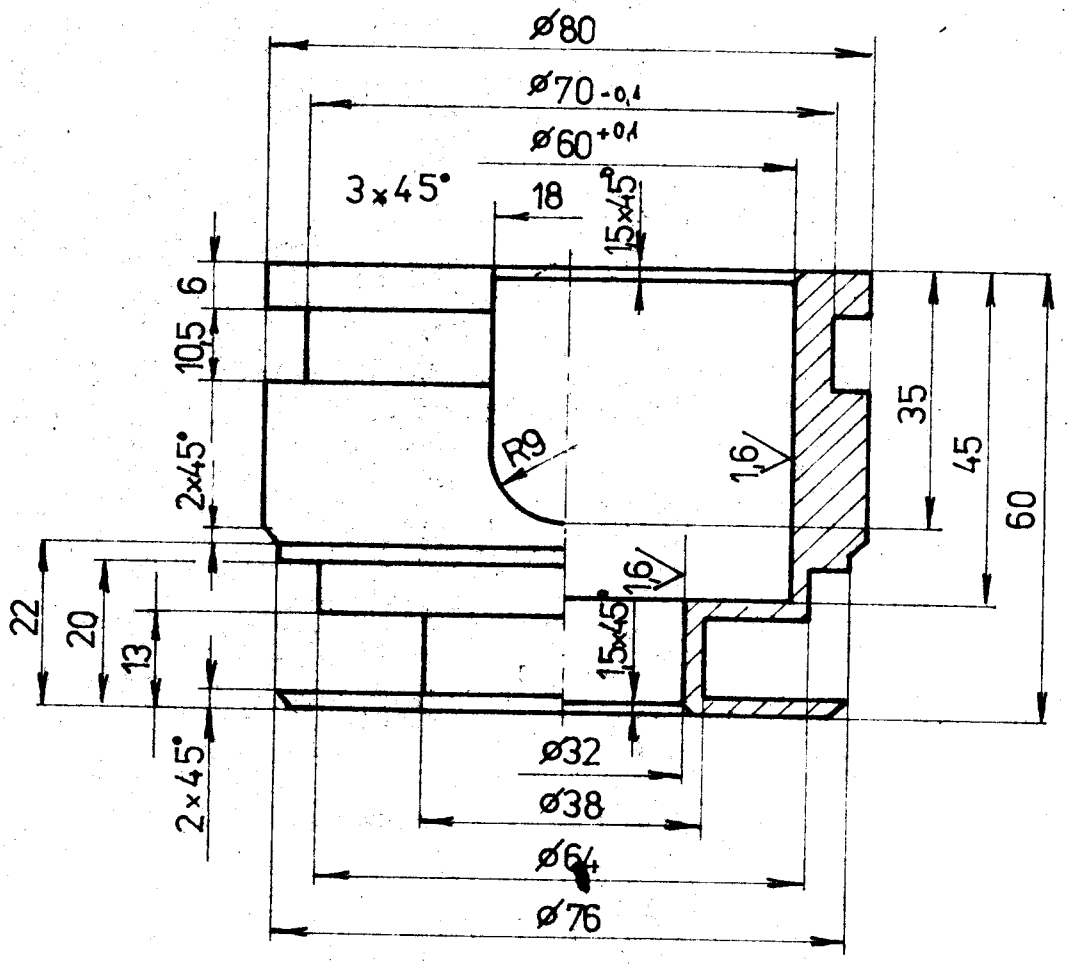
SVAŘENO E 44.83.1 E-K-103

2	PÁS 2×25-245	ČSN 425350	11 373.1		1	0,07	0,075	KMM-08-01 21
Poz.	Název - Rozměr	Norma - Polotovar	Mat. konečný	Motor. výrobní				

Měřítko 1:1 | Kreslil LISNER | Č. strojku | Změny | Stupeň výkres

VŠST Liberec | Typ: | Skupina | Název: PRSTENEC | KMM-08-10

3,2 (✓)



2	ϕ 85 - 60	ČSN 425510.1	11 375.1		1	0,9	1,3	KMM-08-01	3
Poz.	Název - Rozměr	Norma - Polotovar	Mat. číselný	Materiál výrobku	Počet kusů				Poz.

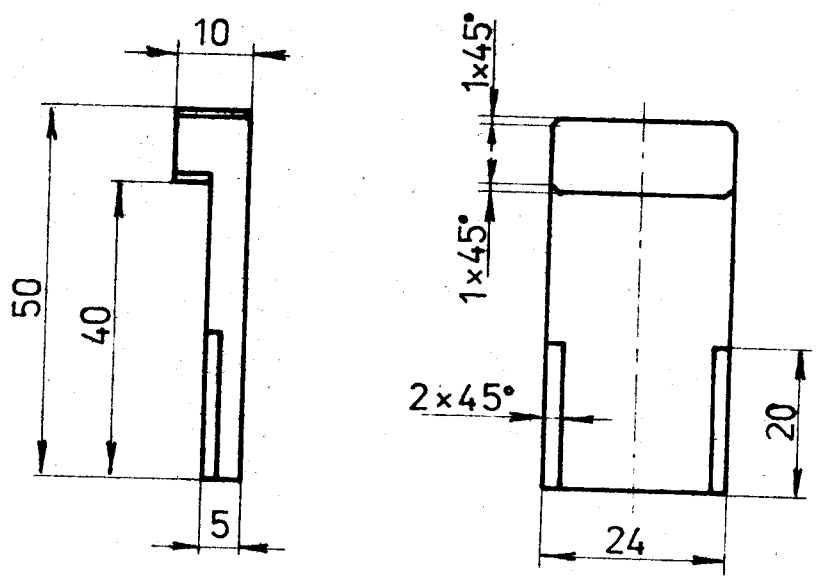
Číslo výkresu

Celkový počet listů

Měřítko	Kreslil LISNER		Č. strojní	Změny
1:1	Kontroloval			
	Schválil			
	Datum	Stav	Č. normy	
		Grafo		

VŠST Liberec	Vzor	Skupina	Nový výkres
	LŮŽKO		KMM-08-09
			Počet listů

3,2

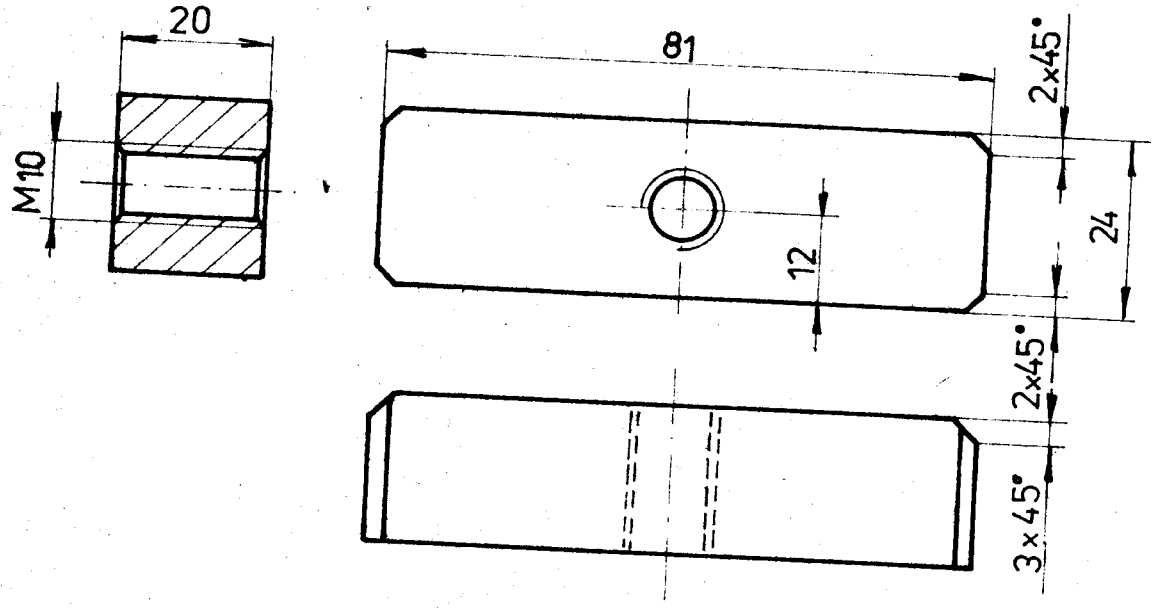


4	⌀ 25 × 10-55	ČSN42552211	11 373.1		1	0,14	0,18	KMM-08-04	2
	Název - Rozměr	Norma - Polotovar	Mat. konečný	Materiál výchozí					

1:1	LISNER		Č. snímku
			Č. transp.
		Datum	

VŠST Liberec	Ing.	Skupina	Starý výkres
	Název: RAMENO		KMM-08-08
			Počet listů:

3,2



2	⌀ 25×20-85	ČSN42552211	11373.1		1	0,24	0,25	KMM-08-04	1
Poznámka									

Měřítko: 1:1

Kreslil: LISNER

Přezkoušel:

Normalizoval:

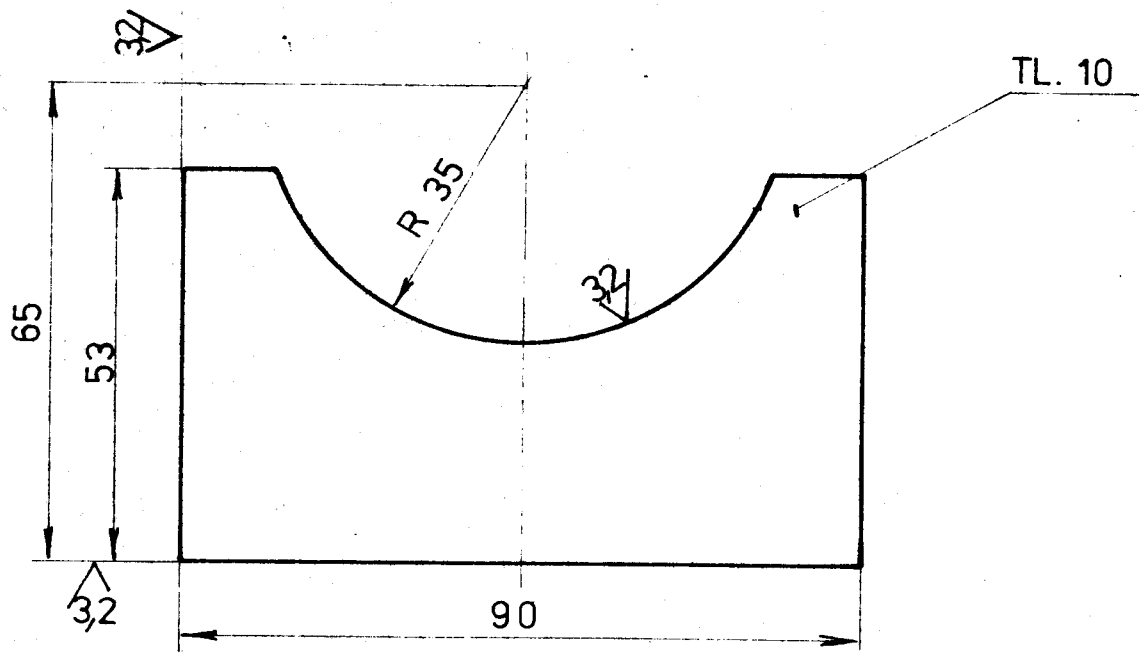
Vyrobil:

Hmotnost:

VŠST Liberec

Název: PŘÍČNÍK

KMM-08-07



2	PL 10 x 100 x 55	ČSN 425310	11373.1		1	0,21	0,25	KMM-08-03	2

Poznámka

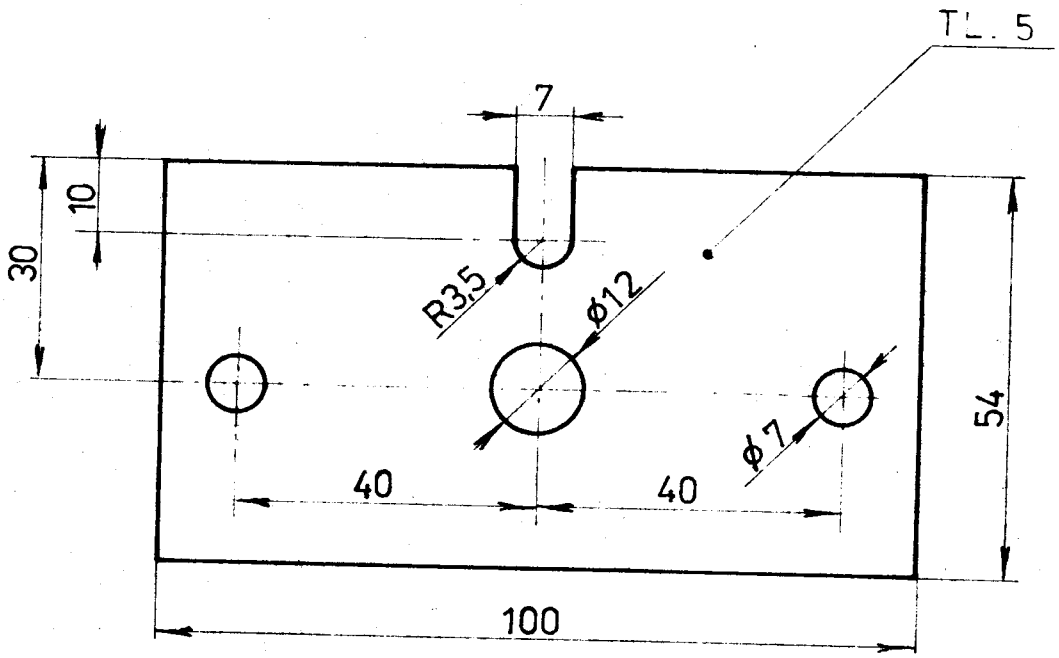
Měřítko 1:1 | Kreslil LISNER | Přezkoušel | Normoval | Vyrobil | Materiál

VŠST Liberec

Název: STOJNA

KMM-08-06

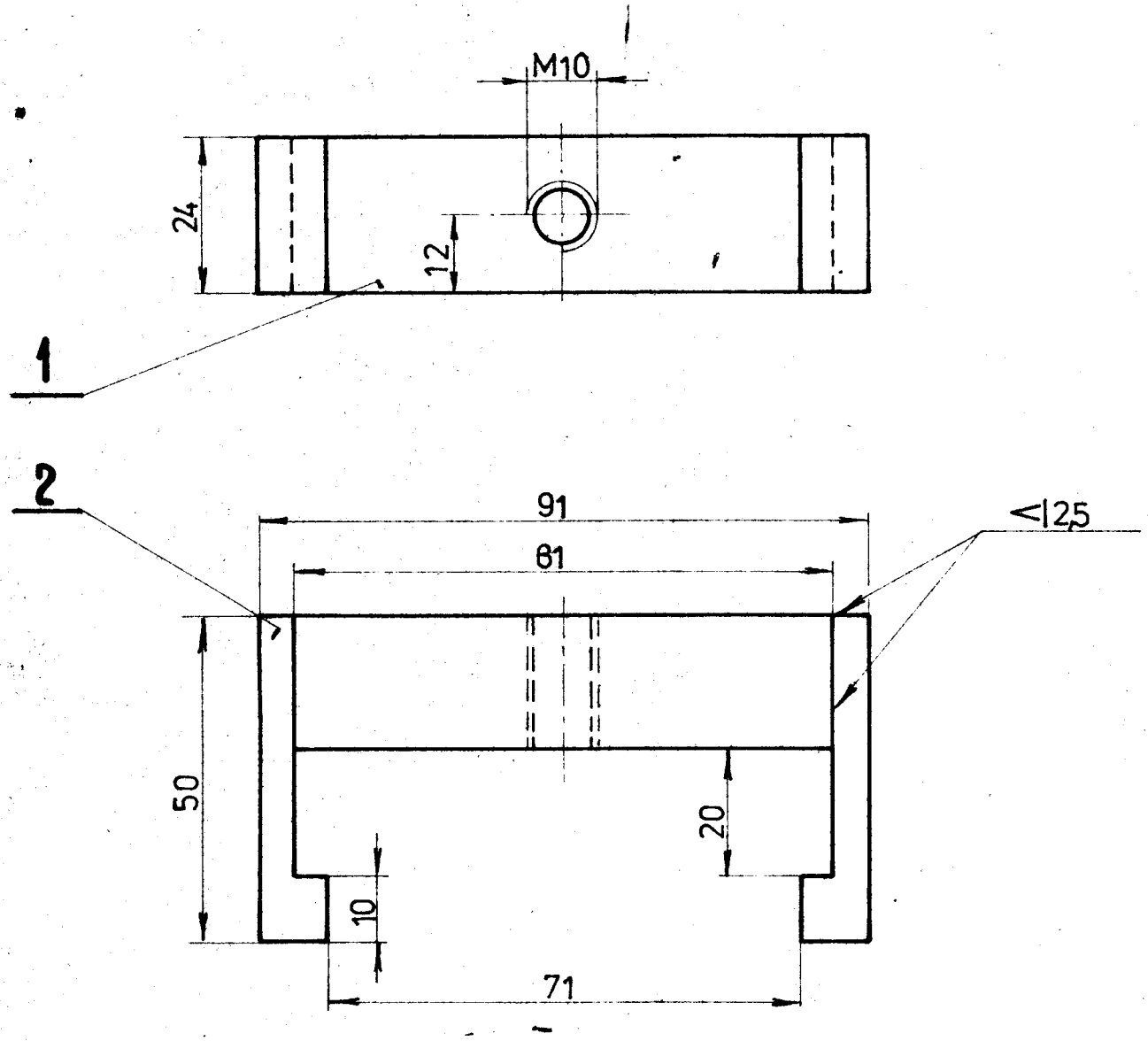
3,2



2	PL 5 x 100 x 55	ČSN 425311	11373.1		1	0,19	0,2	KMM-08-03 1
	Název	Norma	Materiál					

1:1	LISNER	Lisner	Č. výrobku
			Č. výkresu

VŠST Liberec	Skupina	PODSTAVA
		KMM-08-05



SVAŘENO E-K-103

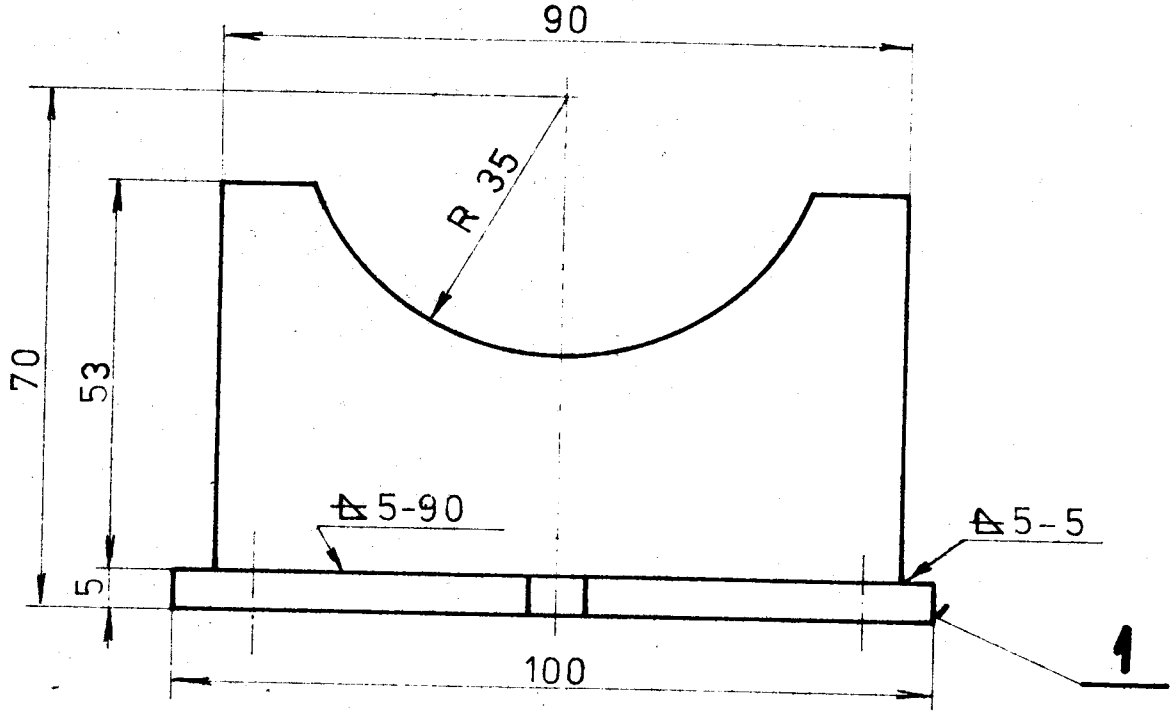
2	⌀ 25×10-55	ČSN425522.11	11 373.1		1	0,14		KMM-08-08	2
1	⌀ 25×20-85	ČSN425522.11	11 373.1		1	0,24		KMM-08-07	1
						0,52			

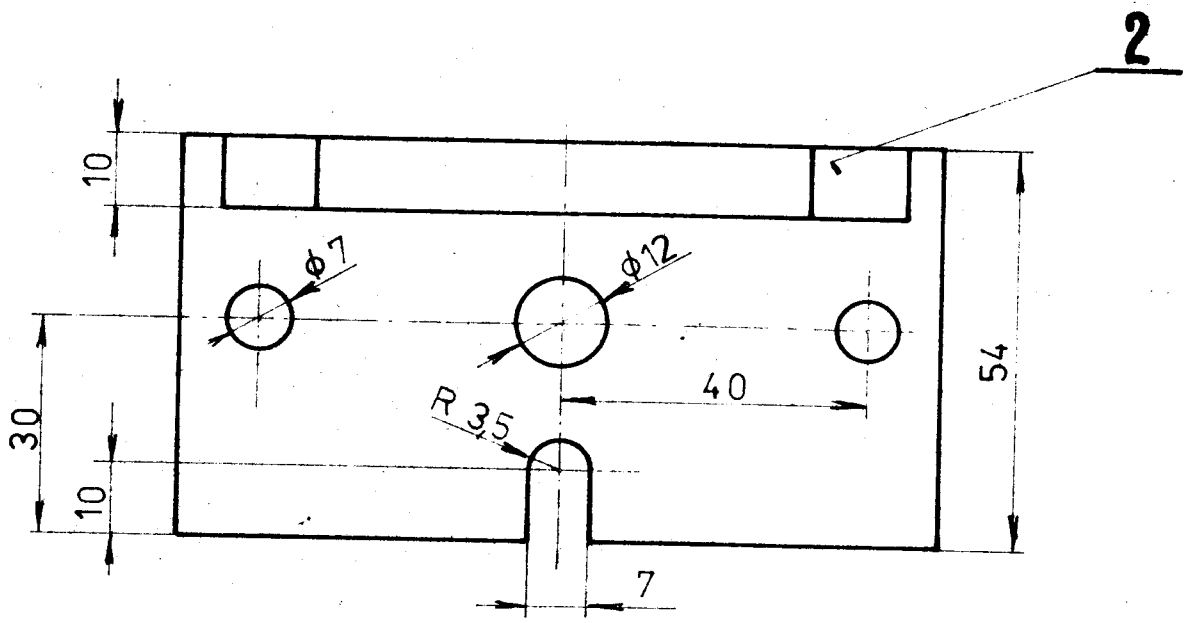
1:1 LISNER

VŠST Liberec

TŘMEN

KMM-08-04





SVAŘENO E-K-103

1	PL 10 x 100 x 55	ČSN 425310	11 373.1		1	0,21		KMM-08-06	2
1	PL 5 x 100 x 55	ČSN 425310	11 373.1		1	0,19		KMM-08-05	1
						0,4			

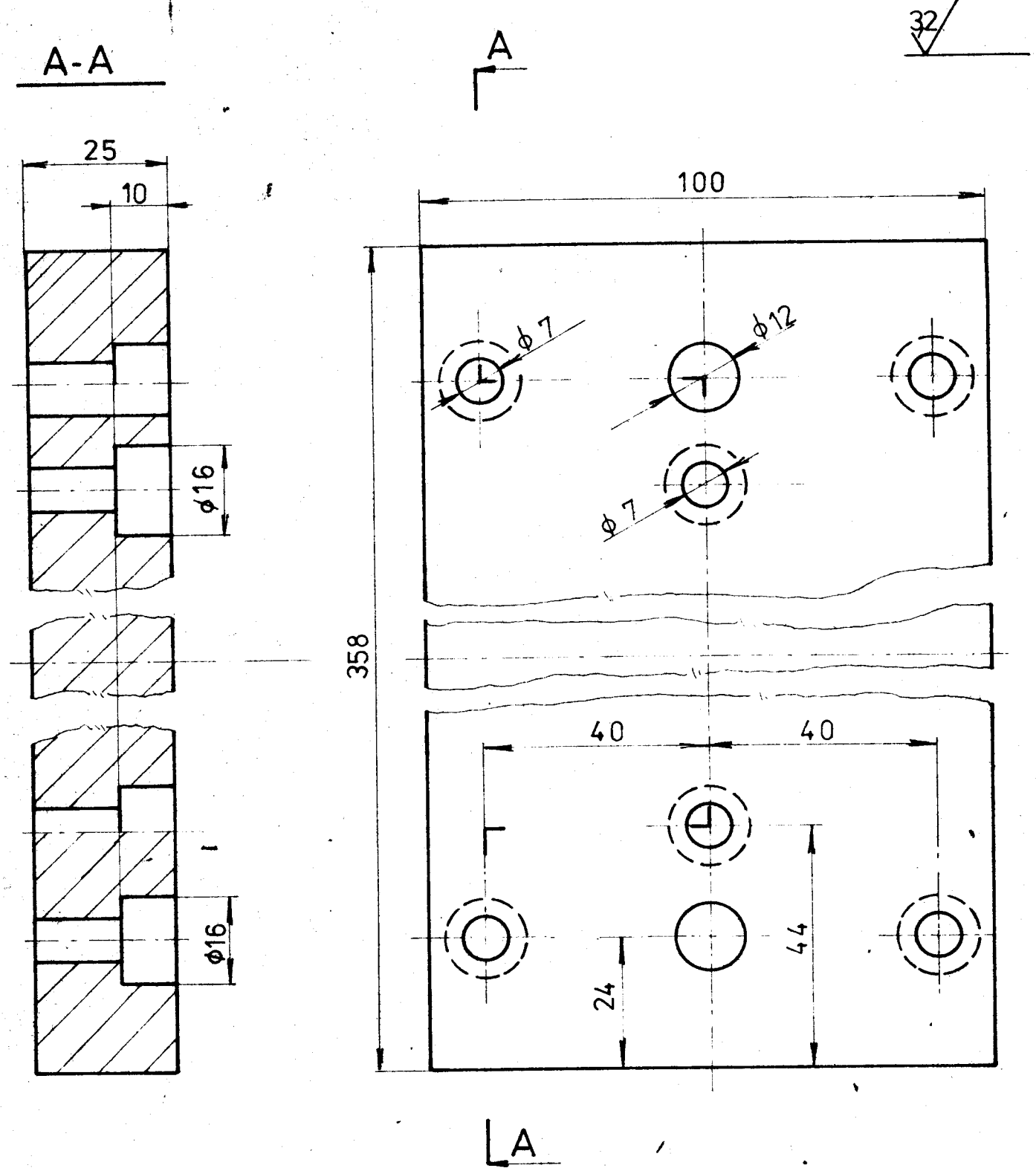
LISNER

1:1

VŠST Liberec

KONZOLA

KMM-08-03



1	25 x 360 - 100		UMATEX	1,25	1,3	KMM-08-01	1

Poznámka

Měřítko 1:1 LISNER

VŠST Liberec

DESKA

KMM - 08 - 02