

V Š S T L I B E R E C

Fakulta strojní

Obor 23 - 07 - 8

S T R O J Í R E N S K Á T E C H N O L O G I E

zaměření

/ strojírenská metalurgie /

Katedra technologie a nauky o materiálu

STUDIUM METODIKY ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH A TECHNOLOGICKÝCH  
VLASTNOSTÍ NÁSTROJOVÝCH OCELÍ PO TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ  
RYCHLÝM INDUKČNÍM OHŘEVEM

P E T R Lubomír

DP - ST - 1203/76

Vedoucí práce: Doc. Ing. Václav Chaloupecký CSc,  
KTM VŠST Liberec

Konzultant: Ing. František Grch, KTM VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh

Počet stran - 63

Počet tabulek - 6

Počet obrázků - 37

Počet výkresů - 3

DT: 620.17

Liberec, 20. 5. 1976

STUDIUM METODIKY ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH A TECHNOLOGICKÝCH  
VLASTNOSTÍ NÁSTROJOVÝCH OCELÍ PO TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ  
RYCHLÝM INDUKČNÍM OHŘEVEM

P E T R Lubomír

Vedoucí DP: Doc. Ing. Václav Chaloupecký CSc

V první teoretické části této diplomové práce je provedena studie k problematice návrhu mechanických zkoušek vhodných pro vzorky zpracované rychlým indukčním ohřevem. Byla navržena zkouška vrubové houževnatosti a zkouška kroužků tahem. Tyto zkoušky nebyly experimentálně ověřeny.

V druhé, praktické a experimentální části byla provedena zkouška tlakem v podélné ose a kolmo na podélnou osu trubičky, zkouška tahem a zkouška tvrdosti v závislosti na průřezu plného válečku.

Jelikož se jedná o zkoušky, které byly na takovýchto vzorcích prováděny poprvé a ani v literatuře nebyly nalezeny údaje týkající se této problematiky, budu se opírat především o výsledky měření prováděné na VŠST v Liberci.

Místo vypracování a obhajoby DP: KTM VŠST Liberec

Vysoká škola: Libeňská textilní Katedra: Textilní technologie

Fakulta: Strojní Školní rok: 1975/76

## DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro Ing. Jaroslava Štěrby

obor Textilní technologie

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

Nazev tématu: Účinnost vlněných tkanin při odstraňování nečistot z oděvních materiálů  
Účinnost vlněných tkanin při odstraňování nečistot z oděvních materiálů  
Účinnost vlněných tkanin při odstraňování nečistot z oděvních materiálů

Podmínky pro zpracování:

1. Zpracovat literaturu v oblasti vlněných tkanin a jejich účinnosti při odstraňování nečistot z oděvních materiálů.
2. Zpracovat odbornou literaturu v oblasti vlněných tkanin a jejich účinnosti při odstraňování nečistot z oděvních materiálů.
3. Zpracovat odbornou literaturu v oblasti vlněných tkanin a jejich účinnosti při odstraňování nečistot z oděvních materiálů.
4. Zpracovat odbornou literaturu v oblasti vlněných tkanin a jejich účinnosti při odstraňování nečistot z oděvních materiálů.

*Autorské právo se řídí směrnicemi MŠV č. 115/75 ze dne 12. července 1975. Vydáno MŠV, Praha 22, ze dne 31. 8. 1980 č. 19. Autorské právo č. 115, 12. 75.*

**VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ**  
Ústřední úřad vna  
**LIBEŇSKÁ 5**  
**PSČ 461 17**

Rozsah grafických laboratorních prací: 100 x 60 mm (10 listů)

Rozsah průvodní zprávy: 50 x 60 mm (10 listů)

Seznam odborné literatury:

1. ...
2. ...
3. ...
4. ...
5. ...

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Chaloupka, CSc.

Konsultanti: Ing. Vladimír Chaloupka, CSc.

Datum zahájení diplomové práce: 15. října 1975

Datum odevzdání diplomové práce: 29. října 1975

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
fakulta strojního inženýrství  
LIBEREC

*[Signature]*  
Vedoucí katedry

*[Signature]*  
Děkan

*[Handwritten mark]*

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

V Liberci dne 20. 5. 1976

P E T R Lubomír

*P. Lubor*

O B S A H :

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | Symbolika   | 3  |
| 2.     | Úvod  | 4  |
| 3.     | Teoretická část   | 5  |
| 3.1.   | Indukční ohřev  | 5  |
| 3.1.1. | Rozložení teplot při indukčním ohřevu   | 6  |
| 3.2.   | Ohřev nástrojových ocelí  | 6  |
| 3.2.1. | Vliv ohřevu na jakost povrchu nástrojů  | 7  |
| 4.     | Návrh mechanických zkoušek vhodných pro vzorky tepelně zpracované rychlým indukčním ohřevem | 8  |
| 4.1.   | Zkouška vrubové houževnatosti   | 8  |
| 4.2.   | Návrh přípravku pro zkoušku tahem   | 9  |
| 4.2.1. | Orientační výpočet síly potřebné pro přetržení kroužku                                      | 10 |
| 5.     | Experimentální část   | 13 |
| 5.1.   | Použité měřicí zařízení a jeho popis  | 13 |
| 5.2.   | Zkouška tlakem v podélné ose trubičky   | 17 |
| 5.2.1. | Příprava a materiál vzorků  | 17 |
| 5.2.2. | Měření tvrdosti   | 18 |
| 5.2.3. | Popis zkoušky a postup práce  | 20 |
| 5.2.4. | Popis a vyhodnocení závislostí získaných měření   | 21 |
| 5.2.5. | Diskuse výsledků  | 28 |
| 5.3.   | Zkouška tlakem kolmo na podélnou osu trubičky   | 29 |
| 5.3.1  | Příprava a materiál vzorků  | 29 |
| 5.3.2. | Popis zkoušky a postup práce  | 30 |
| 5.3.3. | Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení   | 31 |
| 5.3.4. | Diskuse výsledků  | 38 |
| 5.4.   | Zkouška tahem   | 39 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 5.4.1. | Příprava a materiál vzorků                              | 39 |
| 5.4.2. | Měření tvrdosti   | 41 |
| 5.4.3. | Popis tahové zkoušky                                    | 41 |
| 5.4.4. | Popis a vyhodnocení závislostí získaných měření         | 43 |
| 5.4.5. | Diskuse výsledků  | 50 |
| 5.5.   | Zkouška tvrdosti v závislosti na průřezu plného válečku | 52 |
| 5.5.1. | Příprava a materiál vzorků                              | 52 |
| 5.5.2. | Struktury některých vzorků                              | 53 |
| 5.5.3. | Měření tvrdosti   | 56 |
| 5.5.4. | Vyhodnocení závislostí získaných měření                 | 56 |
| 5.5.5. | Diskuse výsledků  | 59 |
| 6.     | Závěr - shrnutí výsledků                                | 60 |
| 7.     | Literatura  | 62 |
|        | Přílohy   | 63 |

## 1. SYMBOLIKA

|                  |   |
|------------------|---|
| F                | - síla  |
| F <sub>max</sub> | - maximální dosažená síla   |
| HV1              | - průměrná tvrdost jednotlivých vzorků dle Vickerse                 |
| T <sub>kal</sub> | - Kalicí teplota  |
| t <sub>kal</sub> | - doba kalení   |
| t <sub>ohř</sub> | - doba ohřevu   |
| σ <sub>pt</sub>  | - mez pevnosti v tahu   |
| τ <sub>s</sub>   | - napětí ve stříhu  |
| σ                | - napětí  |
| σ <sub>red</sub> | - redukované napětí   |
| M <sub>0</sub>   | - ohybový moment  |
| W <sub>0</sub>   | - průřezový modul v ohybu   |
| S                | - plocha  |
| N                | - normalná síla   |
| b                | - šířka   |
| t                | - tloušťka  |
| h                | - výška   |
| r                | - poloměr   |
| v                | - rychlost ohřevu vzorků  |
| v <sub>1</sub>   | - první průměrná rychlost ohřevu                                    |
| v <sub>2</sub>   | - druhá průměrná rychlost ohřevu                                    |
| d                | - průměr vzorku   |
| d <sub>1</sub>   | - vnější průměr vzorku /u tahových tyčí značí průměr před zkouškou/ |
| d <sub>2</sub>   | - vnitřní průměr vzorku /u tahových tyčí značí průměr po zkoušce/   |
| δ                | - stlačení nebo prodloužení vzorků /deformace/                      |
| ∅                | - značí průměrnou hodnotu /v tabulce/                               |



## 2. ÚVOD

Na katedře technologie a nauky o materiálu na Vysoké škole strojní a textilní v Liberci se zabývají výzkumem kinetiky fázových přeměn  $\alpha \rightarrow \gamma$  v ocelích při rychlém indukčním ohřevu. Byla prováděna řada výzkumných prací, mnoho z nich bylo i součástí státních úkolů na katedře řešených. V rámci těchto výzkumů zde i posluchači zpracovávají své diplomové práce.

Tato diplomová práce vychází z výsledků prací na této problematice, která se provádí na KTM od roku 1965. Úkolem této práce je provést studium metodiky zkoušení mechanických a technologických vlastností nástrojových materiálů a pokračovat tak ve zjišťování poznatků a výsledků v tomto novém, dosud ještě příliš neprobádaném oboru. Experimenty byly prováděny na vzorcích běžně používaných na VŠST, tj. ve tvaru trubiček. Dále byly navrženy vzorky speciálně zkonstruované pro zkoušku tahem s přihlédnutím k ČSN, ale i k jiným faktorům, o nichž bude dále pojednáno. Jedná se o zkoušky, které byly na těchto vzorcích prováděny poprvé, a ani v literatuře nebyly nalezeny údaje týkající se této problematiky zkoušení mechanických a technologických vlastností nástrojových ocelí zpracovaných rychlým indukčním ohřevem. Pro nás má velký význam každý poznatek, ať už pozitivní, či nikoliv. Na tomto základě bude možnost usměrnit další vývoj a výzkum.

Teprve po pečlivém teoretickém a praktickém poznání a zdůvodnění všech jevů může být dosaženo konečných výsledků a závěrů a z toho plynoucího výhodného použití v průmyslové výrobě.

### 3. TEORETICKÁ ČÁST

#### 3.1. Indukční ohřev

Vysokofrekvenční ohřev je poměrně novou technologií zaváděnou do průmyslu. Původně se však užíval hlavně pro tavení kovů [1]. Teprve později se začal tento způsob používat i jinde, například při povrchovém kalení nebo při ohřevu pro kování z indukčního ohřevu.

Výhody indukčního kalení oceli:

Indukční ohřev má v porovnání s klasickým ohřevem v peci mnoho předností. Například je možno spotřebovat tepelnou energii pouze na ohřev nutné části výrobku, který je třeba povrchově kalit. Indukční ohřev zabezpečuje velmi dobrou jakost tepelného zpracování. Teplo vzniká přímo v kovu, a to velmi rychle, což podstatně zmenšuje nebezpečí přehřátí, růst zrna a oduhličení povrchu. Množství tepla lze přesně dávkovat. Velikou výhodou je libovolně velká rychlost ohřevu, omezená pouze maximálním teplotním gradientem, který ohříváný materiál ještě nepoškodí.

Volbou příslušné frekvence lze regulovat hloubku zakalení u dané oceli a rozmístění jednotlivých pásem kalení. Při ohřevu nevznikají okraje, a proto odpadají některé pomocné operace po tepelném zpracování, jako je čištění [2].

Nevýhodou je, že pro každou součást je nutný zvláštní induktor a vypracování optimálního režimu zpracování. Proto je indukční ohřev účelný především v hromadné a seriové výrobě.

### 3.1.1. Rozložení teplot při indukčním ohřevu

Indukované proudy protékají v povrchové vrstvě předmětů vložených do ohřívací cívky, čili induktoru. Dráha těchto indukovaných proudů má určitý činný odpor, a proto se ohřívá úměrně čtverci místní proudové hustoty.

Rozdíl proti jiným způsobům ohřevu /v peci, v lázni, plamenem aj./ je v dosaženém měrném výkonu. V peci musíme mít konečnou teplotu, které chceme na vloženém studeném konci předmětu dosáhnout. Na předmět se přenáší ohřívací výkon sáláním. Rychlejšího ohřevu dosahujeme v lázni, kde převedení tepla z lázně do předmětu je usnadněno kapaliným stykem - vedením.

Při ohřevu plamenem je teplota plamene vyšší než konečná požadovaná teplota ohřívaného předmětu. Teplo se rychleji převádí prouděním žhavého plynu. Indukční ohřev umožňuje značně větší výkony.

### 3.2. Ohřev nástrojových ocelí

Ohřev nástrojových ocelí je důležitou součástí tepelného zpracování [3]. Při tom je důležitá nejen rychlost vlastního ohřevu, ale i výdrž na potřebné teplotě, zabezpečující jak prohřátí celého průřezu, tak i dosažení předepsaných mechanických vlastností. Při ohřevu v peci v důsledku rozdílu teplot na povrchu součásti a v jádře vznikají velká vnitřní pnutí. Aby k tomu nedošlo, je nutné dbát na potřebnou rychlost ohřevu a dostatečnou výdrž na teplotě.

### 3.2.1. Vliv ohřevu na jakost povrchu nástrojů

Vliv ohřevu na jakost povrchu nástrojů ohříváných v normální pecní atmosféře, ale i v některých solných lázních, je nepříznivý [37]. Podle povahy ohřívacího prostředí může nastat buď okujení, oduhličení nebo nauhličení tepelně zpracovávaných ocelových předmětů.

4. NÁVRH MECHANICKÝCH ZKOUŠEK VHODNÝCH PRO VZORKY  
TEPELNĚ ZPRACOVANÉ RYCHLÝM INDUKČNÍM OHŘEVEM

4.1. Zkouška vrubové houževnatosti

Pro nás velmi důležitý požadavek zjistit vrubovou houževnatost, abychom mohli ve srovnání s dalšími mechanickými zkouškami komplexně posoudit mechanické vlastnosti materiálů tepelně zpracovaných rychlým indukčním ohřevem. Proto, že velikost vzorků je omezena velikostí induktoru, je nutné navrhnout velikost vzorků s ohledem na velikost induktoru a dostatečné prohřátí v celém průřezu vzorku.

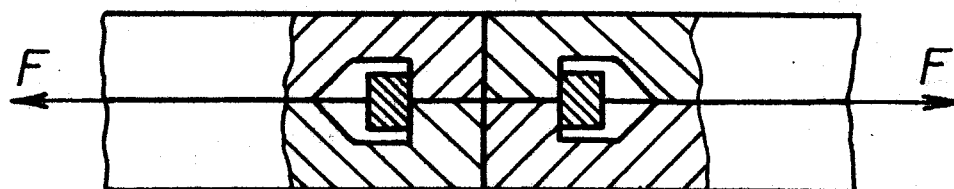
Rozměr zkušebního vzorku byl navržen dle Komárka [4]. Šířka vzorku 4mm, tloušťka 4mm a délka 24mm. Komárkova zkouška byla prakticky vyzkoušena v nejrůznějších případech a dobře se osvědčila. Přesnost výsledků získaných ve dvou laboratořích na strojích různé konstrukce byla  $\pm 10\%$ , což je pro tak malou tyčinku plně vyhovující.

Toto je jen návrh a bylo by nutno zkusit tyto vzorky vysokofrekvenčně ohřát a zakalit. Tím zjistíme, zda vzorek ohřev vydrží či ne. Vzniká zde nebezpečí vzniku trhlinek na hranách vzorku, popřípadě možnost prasknutí celého vzorku.

Na základě experimentálního ověření by následovalo vyhodnocení této metodiky a zjištění, zda bylo dosaženo určitých výsledků.

#### 4.2. Návrh přípravku pro zkoušku tahem

Pro vzorky běžně používané na VŠST, tedy ve tvaru trubiček, byl navržen přípravek pro tahovou zkoušku. Schéma zkoušky je znázorněno na obr. 1.



Obr. 1. Schéma zkoušky

Princip zkoušky spočívá v nařezání kroužků o tloušťce 1,5 mm. Tyto kroužky jsou nařezány z tepelně zpracované trubičky. Při řezání kroužků je požadováno dostatečné chlazení vodou, aby nedošlo k popuštění kroužků v místě řezu.

Takto připravené kroužky je možno postupně vkládat do přípravku a na trhacím stroji je postupně zatěžovat až do úplného přetržení. Hodnoty maximální dosažené síly zaznamenávané do tabulky by se zanesly do grafů v závislosti na teplotě kalení.

Pro přesnější vyhodnocení by bylo dobré před tahovou zkouškou změřit tvrdost na každém kroužku. Dle požadované přesnosti volit počet vpichů a určit průměrnou tvrdost každého kroužku. Z naměřených hodnot tvrdostí by násle-

dovalo znázornění závislosti  $F_{\max}$  - HV1 ; HV1 - Tkal a komplexní vyhodnocení.

Znázornění sešroubovaného přípravku je na výkrese sestavení /viz příloha/. Rozšroubováním obou matic šroubů M6 do-  
sílíme oddělení upínacích čelistí 7 a čelistí 8 od sebe. V čelistech 8 zůstanou vždy oba čepy v dírách, protože jsou z konstrukčních důvodů pevně uloženy. Funkce čepů je velmi důležitá vzhledem k přesnému dosednutí funkčních částí čelistí 7 vzhledem k protikusům 8 po složení přípravku. Po vložení zkušebního kroužku do dutinky ve funkčních částech čelistí 7 je možno nasadit protikusy 8 a sešroubovat k sobě. Celý přípravek je možno upnout do trhacího stroje za měděné příložky a zkoušku provést.

Pro výpočet a návrh materiálu čelisti je nutno vypočítat maximální sílu potřebnou pro přetržení kroužku. Podle velikosti této síly lze spočítat namáhání v nebezpečném průřezu čelisti, tj. v místě I - I /viz obr. 2/. Dle velikosti vypočteného namáhání je možno zvolit nejvhodnější materiál, z něhož bude upínací čelist vyrobena.

#### 4.2.1. Orientační výpočet síly potřebné pro přetržení kroužku a návrh materiálu čelisti

Při výpočtu lze uvažovat napětí v tahu zhruba 1500 MPa.

$$\sigma_{pt} = 1500 \text{ MPa}$$

$$t = 0,5 \text{ mm}$$

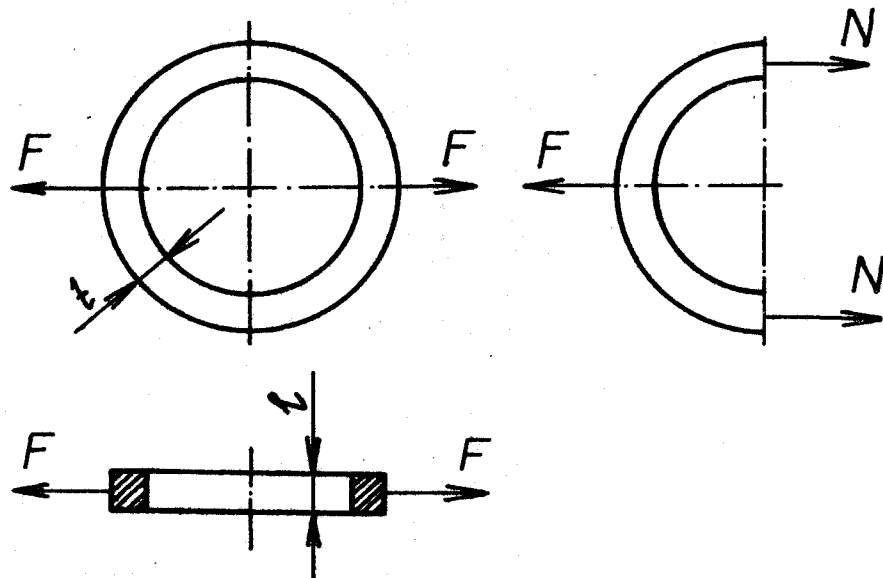
$$b = 1,5 \text{ mm}$$

$$\sigma_{pt} = \frac{N}{t \cdot b}; \quad F = 2N$$

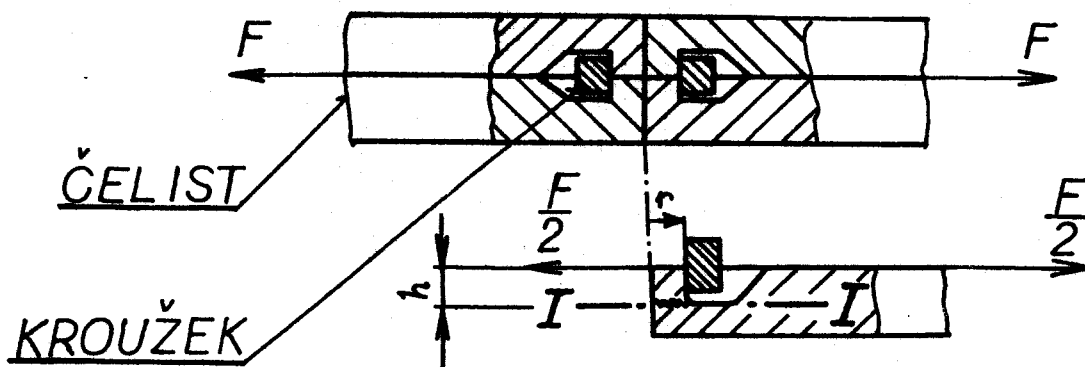
$$N = \sigma_{pt} \cdot t \cdot b = 1500 \cdot 0,5 \cdot 1,5 = 1130 \text{ N}$$

$$F = 2 \cdot 1130 = 2260 \text{ N}$$

Namáhání kroužku



Pro přetržení kroužku je potřebná síla asi 2260 N.  
Z vypočteného namáhání čelisti v průřezu I - I /obr. 2-/  
bude navržen materiál čelisti.



Obr. 2. Namáhání čelisti



$$F = 2260 \text{ N}$$

$$h = 0,8 \text{ mm}$$

$$r = 2 \text{ mm}$$

$$W_0 = 0,2587 r^3 [\text{mm}^3]$$

$$M_0 = \frac{F}{2} \cdot h = 1130 \cdot 0,8 = 904 \text{ MPa}$$

$$W_0 = 0,2587 \cdot 2^3 = 2,062 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_0 = \frac{M_0}{W_0} = \frac{904}{2,062} = 437 \text{ MPa}$$

$$\tau_s = \frac{F}{S} = \frac{2F}{r^2} = \frac{2260}{2} = 359 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma_0^2 + 4\tau_s^2} = 840 \text{ MPa}$$

Na základě výpočtů navrhuji materiál ČSN 19452 Poldi SC.

Tato metodika zkoušení mechanických vlastností nebyla prakticky ověřena, ani přípravek nebyl vyroben. Je to jen teoretický návrh, jak by se mohly zkoušet vzorky typické pro VŠST. Proto by nebylo ani dobré dělat určité a konkrétní závěry k této metodě. Bylo by účelné tuto metodiku vyzkoušet v praxi, zjistit výsledky a dle poznatků získaných při zkouškách tuto metodiku poopravit a vylepšit.

O dalších zkouškách, například o zkoušce tlakem v podélné ose trubičky, zkoušce tlakem kolmo na osu trubičky, zkoušce tahem a zkoušce tvrdosti v závislosti na průřezu, bude pojednáno v experimentální části.

## 5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

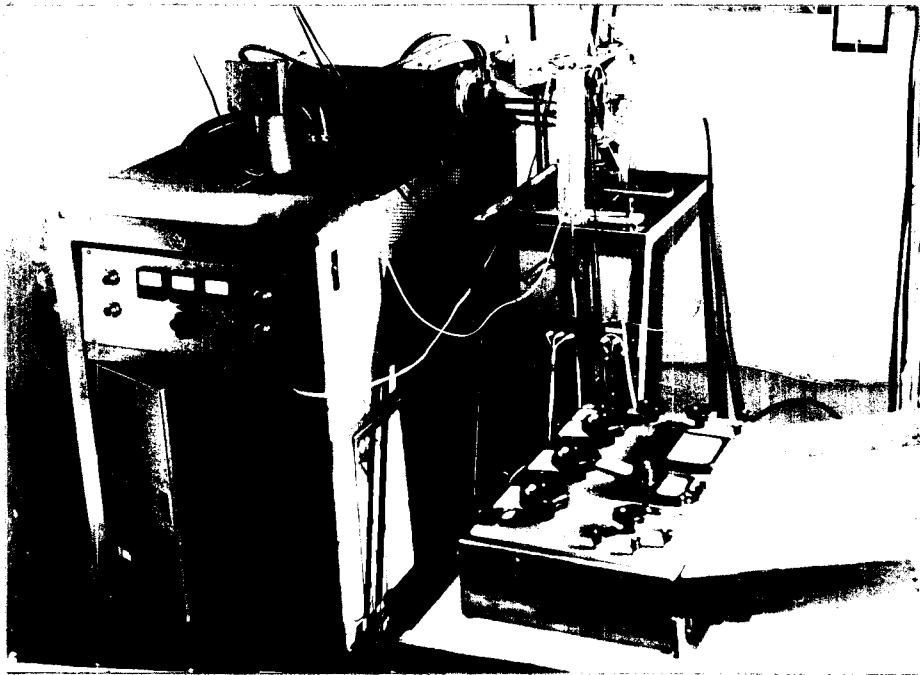
### 5.1. Použité měřicí zařízení a jeho popis

Pro ohřev vzorků jsme používali vysokofrekvenční generátor GV - GA /obr. 3/, na kterém lze dosáhnout velké rychlosti ohřevu, umožňuje regulaci rychlosti ohřevu, a i jeho obsluha je jednoduchá. Rychlost ohřevu se reguluje změnou buzení střídavého obvodu generátoru. K vlastnímu ohřevu dochází v induktoru, do kterého se vzorek vkládá. Induktor tvoří závit z měděné trubky, která je chlazená vodou /obr. 4 a 6/. Tvar induktoru je volen tak, aby mezera mezi závitem induktoru a zkušebním vzorkem byla co nejmenší a rovnoměrná. Toto je důležité proto, aby bylo dosaženo rovnoměrného ohřevu vzorku.

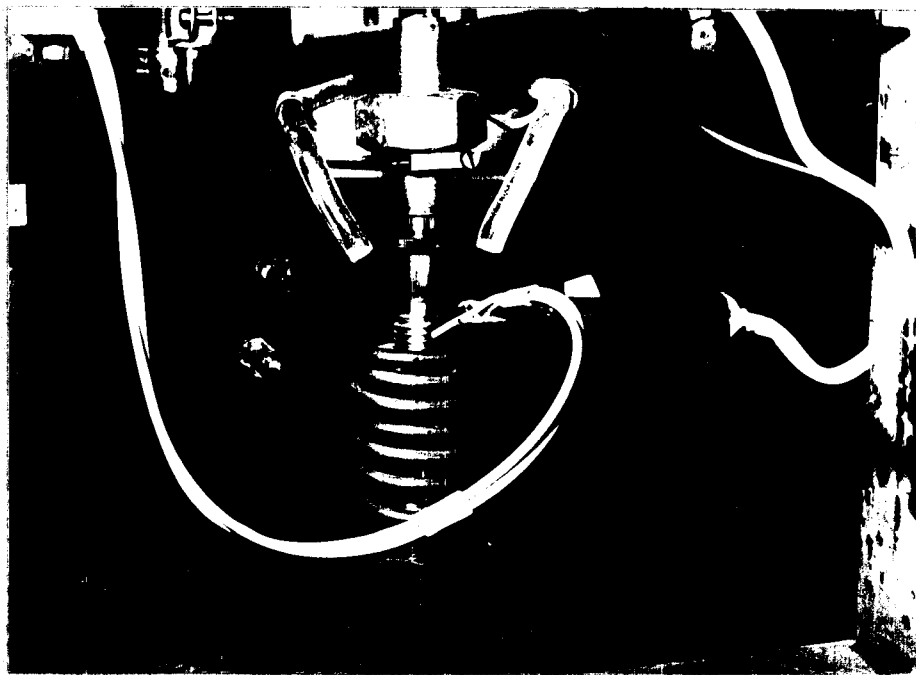
Uchycení vzorku uprostřed smyčky induktoru se děje pomocí dvou křemenných hrotů. Křemen je použit proto, aby se do snímání dilatace, která v našem případě nebyla používána, nepřenese chyba vlivem roztažnosti hrotů. Tyto hroty rovněž zajišťují přesnou polohu vzorku vůči induktoru.

Výšku spodního pevného doteku vzhledem k induktoru lze seřídit stavěcím šroubem. Tím se pochopitelně reguluje i výška umístění vzorku v induktoru. Horní dotek je spojen s jádrem indukčního snímače dilatací. Ve snímači se dilatační změny převádějí na změny napěťové, které se dále vedou do měřicí aparatury.

K ostržení zkušebního vzorku byl použit diferenciální elektromagnetický ventil, který byl řízen časovým spínačem. Takto se kalily vzorky ohřáté na kalící teplotu.

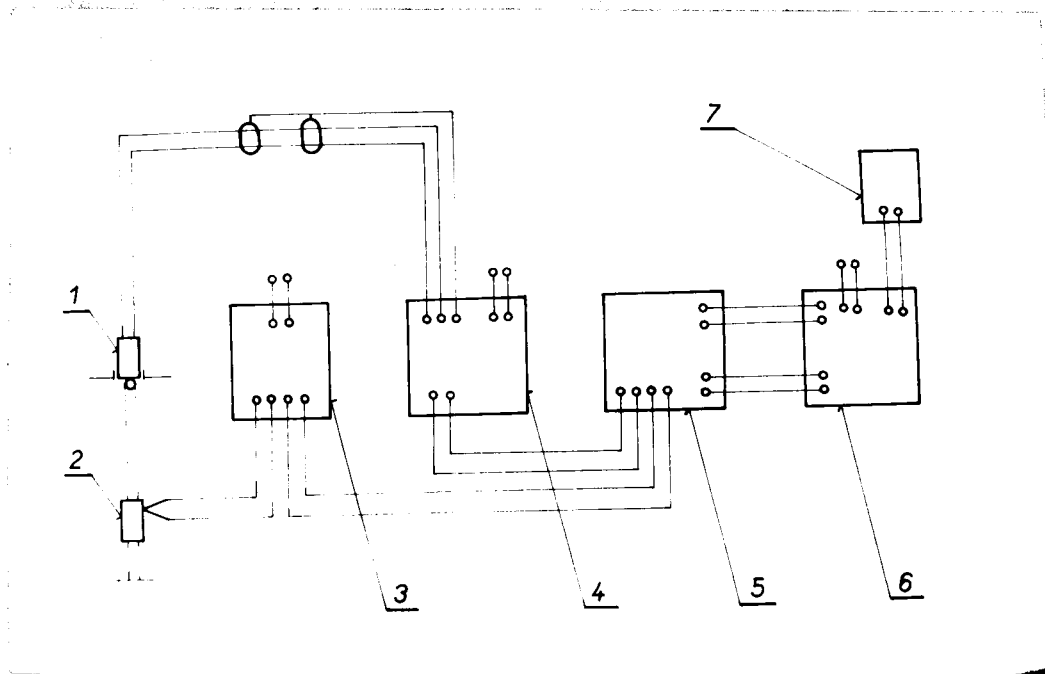


Obr. 3. Celkový pohled na zkušební zařízení



Obr. 4. Zkušební vzorek v induktoru

Signály z indukčního snímače dilatací a z termočlánku jsou vedeny přes lineární zesilovač do třísmyčkového oscilografu 3 SO - 101, výrobku firmy RFT v NDR. Průběh teploty a dilatace vzorku je zaznamenáván na registrační papír. Čas je zde představován časovou základnou, kde jeden dílek odpovídá 1/50 sec. Blokové schéma měřicího zařízení je na obr. 5.

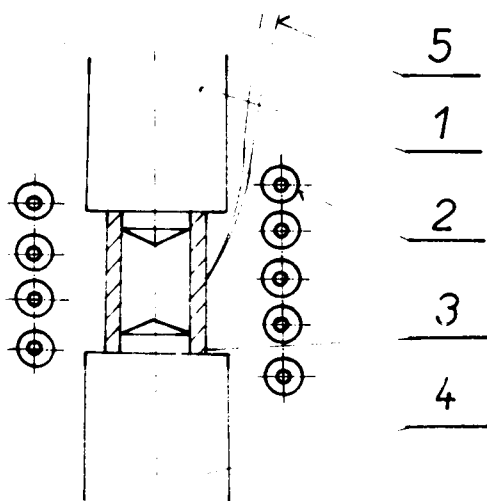


Obr. 5. Blokové schéma měřicího zařízení

- 1 - indukční snímač
- 2 - zkušební vzorek
- 3 - stejnosměrný lineární zesilovač TDA - 1A
- 4 - tenzometrická aparatura TDA - 3
- 5 - regulační odpory
- 6 - oscilograf 3 SO - 101
- 7 - usměrňovač 12 V pro pohon motoru oscilografu

Pro zkoušky v radiálním i axiálním směru byly použity již

dříve indukčně ohřáté a kalené trubičky /obr. 6/. Toto se týká zkoušek prováděných tlakem. U těchto vzorků byly hodnoty kalících teplot a časů použity z vyhodnocení měření prováděných ve výzkumných úkolech na KTM.



Obr. 6. Detail uspořádání uvnitř induktoru

- 1 - křemenná tyčinka
- 2 - induktor
- 3 - zkušební vzorek
- 4 - středící křemenná tyčinka
- 5 - termočlánek