

## DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro Josefa Bártíka

odbor 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: Experimentální zjišťování průběhu napětí v závitových spojích  
fotoelasticimetrickou metodou

### Pokyny pro vypracování:

- 1) Zhodnoťte význam fotoelasticimetrické metody pro určování napětí v závitových spojích
- 2) Navrhněte metodiku zkoušek tak, aby bylo umožněno sledování vlivu vůle mezi šroubem a maticí na vznik a rozložení napětí při statickém zatížení spoje
- 3) Vyhodnoťte výsledky získané experimentálními zkouškami a proveďte závěry, týkající se závitových tolerancí
- 4) Proveďte úvahu o ekonomickém významu metody

Autorské právo se řídí směrnicemi MŠK pro státní závěrečné zkoušky č. j. 31 727/52-11/2 ze dne 13. července 1962-Věstník MŠK VIII, číslo 24 ze dne 31.8.1962 § 19 autorského zákona č. 115/53 Sb.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC I, STUDENTŮ

Rozsah grafických laboratorních prací: výroba vzorků z umělé pryskyřice, fotografie napětí,  
grafy napětí

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 - 50 stran

Seznam odborné literatury:

DP Karel Radostný

Wiegand: Berechnung von Schraubenverbindungen

Návrhy ISO pro závitové tolerance

Milbauer: Fotoelasticimetrie, SNTL

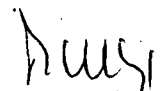
Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Jaroslav Draský CSc

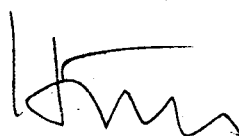
Konzultanti: Ing. Hovorka, Hornický výzkumný ústav, Praha

Datum zahájení diplomové práce: 25. dubna 1969

Datum odevzdání diplomové práce: 10. července 1969



  
Prof. Ing. Jaroslav Draský CSc  
vedoucí katedry

  
Prof. Ing. Cyril Höschl  
děkan

VŠST Liberec

Průběh napětí v závitovém  
spoji - metodou

Katedra

KOE

Fakulta strojní

fotoelasticimetrickou

DP - ST 687 / 69

D I P L O M O V Ý     Ú K O L

Experimentální zjišťování průběhu napětí  
v závitových spojích fotoelasticimetrickou  
metodou

Liberec

10. 7. 1969

|                            |                                                                                                                                                  |                                                                 |                   |     |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|-----|
| VŠST Liberec               |                                                                                                                                                  | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou fotoelasticimetrickou | Katedra           | KCE |
| Fakulta                    | strojní                                                                                                                                          |                                                                 | DP - ST - 687/ 69 |     |
|                            |                                                                                                                                                  |                                                                 |                   |     |
| Obsah.                     |                                                                                                                                                  |                                                                 |                   |     |
| -----                      |                                                                                                                                                  |                                                                 |                   |     |
| Seznam použitých označení. |                                                                                                                                                  |                                                                 | 1                 |     |
| Úvod.                      |                                                                                                                                                  |                                                                 | 2                 |     |
| 1. 0                       | Význam fotoelasticimetrické metody pro určování napětí v závitových spojih.                                                                      | 3                                                               |                   |     |
| 2. 0                       | Metodika fotoelasticimetrických zkoušek pro sledování vlivu vůle mezi šroubem a maticí na vznik a rozložení napětí při statickém zatížení spoje. | 9                                                               |                   |     |
| 2. 1                       | Přehled závitových tolerancí                                                                                                                     | 9                                                               |                   |     |
| 2. 2                       | Fotoelasticimetrické modely                                                                                                                      | 12                                                              |                   |     |
| 2. 3                       | Příprava modelového materiálu - příprava polotovaru                                                                                              | 15                                                              |                   |     |
| 2. 31                      | Požadavky na modelový materiál                                                                                                                   | 15                                                              |                   |     |
| 2. 32                      | Odlévání polotovaru                                                                                                                              | 16                                                              |                   |     |
| 2. 4                       | Výroba vlastního modelu                                                                                                                          | 18                                                              |                   |     |
| 2. 41                      | Výroba šroubu                                                                                                                                    | 18                                                              |                   |     |
| 2. 42                      | Výroba matice                                                                                                                                    | 19                                                              |                   |     |
| 2. 5                       | Proměřování vyrobených modelů                                                                                                                    | 20                                                              |                   |     |
| 2. 6                       | Postup při zmrazování                                                                                                                            | 21                                                              |                   |     |
| 2. 7                       | Postup při vyhodnocování                                                                                                                         | 26                                                              |                   |     |
| 2. 71                      | Postup při vyhodnocování jednotlivých vzorků                                                                                                     | 26                                                              |                   |     |
| 2. 72                      | Fotografování                                                                                                                                    | 30                                                              |                   |     |
| 3. 0                       | Vyhodnocení výsledků získaných experimentálními zkouškami a závěry týkající se závitových tolerancí                                              | 31                                                              |                   |     |
| 3. 1                       | Přehled naměřených rozměrů obou variant a jejich odchylek od jmenovitých rozměrů                                                                 | 31                                                              |                   |     |
| 3. 2                       | Přehled naměřených výsledků fotoelasticimetrického měření                                                                                        | 34                                                              |                   |     |
| 3. 3                       | Vyhodnocení výsledků měření                                                                                                                      | 55                                                              |                   |     |
| 3. 4                       | Závěry z měření týkající se závitových tolerancí                                                                                                 | 56                                                              |                   |     |

|                        |                                                                 |                         |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>VŠST Liberec</b>    | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou fotoelasticimetrickou | <b>Katedra</b> KOE      |
| <b>Fakulta</b> strojní |                                                                 | <b>DP - ST -687/ 69</b> |
| 4. 0                   | Ekonomická úvaha                                                | 57                      |
|                        | Seznam příloh                                                   | 58                      |
|                        | Seznam použité literatury                                       | 58                      |
|                        | Příloha č. 1                                                    | 59                      |

## Seznam použitých označení.

|                      |                                               |
|----------------------|-----------------------------------------------|
| $T_{D1}$             | - tolerance malého průměru matice             |
| $T_{D2}, T_{d2}$     | - tolerance středního průměru                 |
| $d_s$                | - výpočtový střední průměr                    |
| $\gamma$             | - specifická váha ( $\text{kp}/\text{dm}^2$ ) |
| $\sigma$             | - napětí ( $\text{kp}/\text{cm}^2$ )          |
| D                    | - koeficient jakosti plastické hmoty          |
| K                    | - optická citlivost                           |
| E                    | - modul pružnosti v tahu                      |
| v                    | - řezná rychlost                              |
| s                    | - posuv                                       |
| h                    | - hloubka třísky                              |
| $\gamma_1, \gamma_2$ | - hlavní modelová napětí                      |
| $\lambda$            | - vlnová délka                                |
| $\tau$               | - smykové napětí                              |
| t                    | - tloušťka                                    |

|                 |                                                                 |                   |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou fotoelasticimetrickou | Katedra KOE       |
| Fakulta strojní |                                                                 | DP - ST - 687/ 69 |

Úvod.

U šroubového spojení přenáší 30% veškeré síly první závit. Snažíme se dosáhnout rovnoměrnější zatížení všech závitů. Jedním z faktorů ovlivňujících vnitřní napjatost šroubového spojení je vůle mezi závity šroubu a matice. Abychom mohli sledovat její vliv na únosnost spojení, je nutné mít metodu, postup jak se můžeme o rozsahu jejího působení přesvědčit. Proto jsem se v této práci zaměřil hlavně na vypracování podrobné metodiky pro porovnávací způsob ověřování vlivu závitové vůle.

- 2 -

Všechny údaje v této práci byly získány z výsledků  
 experimentů provedených v rámci výzkumu na ústavu  
 pro výzkum a vývoj v oblasti strojního inženýrství  
 VŠST Liberec, listopad 1968, číslo 100/68-69

# 1. 0 Význam fotoelasticimetrické metody pro určování napětí v závitových spojkách.

Velkou budoucnost v průmyslu má automatizace výroby. Je snaha, aby se většina hmotných životních potřeb od suroviny až po hotový výrobek vyráběla v budoucnu automaticky. Nejslabším článkem v automatizaci výrobního procesu je montáž. Příklady z praxe ukazují, že automatizací montáže lze dosáhnout 50 - 70 % úspory na pracovních silách. Je třeba však podotknout, že těchto výsledků lze dosáhnout jen při výrobě velkého počtu výrobků, umožňujících rychle amortizovat pořizovací náklady na zavedení této hromadné výroby, což je z hlediska technologie a hlavně ekonomie rozhodující.

Racionalizace montážních prací si vyžaduje hlubší studium i takových technologií, jejichž problematika se zdála být úplně vyčerpaná. Jednou z těchto technologií je pevné rozebiratelné šroubové spojení, které je jednou z nejrozšířenějších technologií rozebiratelného spojování.

Na průběh napětí ve šroubovém spojení má vliv:

1. dodržení výrobní tolerance šroubu a matice
2. dodržení souososti šroubu a matice (vyosení).
3. dodržení dovoleného úhlu mezi osou matice a šroubu (vyklenění)

Známe-li průběh napětí, můžeme posoudit vhodnost navržené konstrukce (tvaru šroubového spojení). Zkouškami na únavu dynamicky namáhaných předpjatých šroubových spojů bylo zjištěno, že únavou se poruší zpravidla šroub a zřídka kdy spojované části (není-li jejich únavu vyvolána sekundárním vlivem, např. únavou z koroze, nebo vlivem vrubu, otlačením a pod.). Příčinu nutno vidět v tom, že závitová část šroubu je porušena řadou vrubů. Proto je nutné všimnout si blíže napjatosti šroubů. Zvláště je to důležité pro dynamicky namáhané šrouby,

u nichž může dojít v místě špiček napětí k únavovým lomům.

Ze zkušeností je známo a zkuškami bylo potvrzeno, že při dynamickém namáhání dochází k lomům šroubů v prvním závitu v matici u 65 %, ve výběhu závitu do dřívku u 20 %, a v přechodu dřívku do hlavy u 15 % sledovaných šroubů. Příčinou je vrubový účinek změn průřezů.

Rozložení napětí v závitě šroubu se změní v oné části závitu, která je zašroubována do matice, nebo u závrtného šroubu do závitového otvoru pro šroub. U normálních, běžných matic je šroub v matici namáhán tahem a matice tlakem. Šroub se tahem prodlužuje, matice se tlakem zkracuje. Tím se mění i stupání závitu - na šroubu se zvětšuje, v matici se zmenšuje. Rozdíl, který tím vznikne, se vyrovnává ohybem závitu šroubu i matice. U ostrých závitů vyrovnání napomáhá i rozšíření matice vlivem bočních složek tlaku na skloněný bok závitu.

Se zřetelem na dlouhodobé dynamické namáhání šroubů nesmíme připustit, aby docházelo ke střídavé plastické deformaci závitů. Tyto deformace by byly příčinou únavového lomu. S vyrovnáním špiček napětí plastickými deformacemi je možné počítat pouze při statickém namáhání šroubů. Napětí vzniklá při proměnlivém namáhání šroubů a deformace jimi vyvolané nesmějí překročit oblast prázdných deformací. Proto je důležité zjistit velikost špiček napětí i prostředky k jejich snížení.

Tento složitý stav namáhání není možné početně zcela přesně zvládnout. Aby byl výpočet vůbec možný, musíme učinit zjednodušující předpoklady, např.: rozložení tahových napětí v celém průřezu šroubu je stejné; rozložení tahových nebo tlakových napětí v celém průřezu matice je také stejné.

Jednou z dalších možností jak získat poměrně ucelený a velmi názorný obraz o průběhu napětí ve stroji-

|                 |                                                               |                    |
|-----------------|---------------------------------------------------------------|--------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji metodou fotoelasticimetrickou | Katedra KOE        |
| Fakulta strojní |                                                               | DP - ST - 687 / 69 |

ních součástech, je využít výhod zkoumání průběhu napětí metodou fotoelasticimetrickou. Na vhodnost jejího použití poukázal již v roce 1931 Stegharsten, který se sám zabýval matematickou analýzou daného problému.

Základem fotoelasticimetrie je vlastnost některých látek vykazovat dočasný dvojlom ( objeveno 1816 D. Brewsterem a aplikováno na problémy pružnosti 1910 A. Mesnagerem ). Dvojlom je pak dobře viditelný v polarizovaném světle. Chceme-li vyšetřovat průběh a velikost napětí v určité revinné součásti nebo konstrukci, musíme vyrobit průhledný fotoelasticimetrický model, geometricky podobný skutečnému dílu, z ploché desky vhodné, dočasně dvojlomné hmoty. Po zatížení modelu břemeny, působícími obdobně jako na skutečném díle, pozorujeme model v polarizovaném světle. Při použití bílého světla můžeme u opticky dostatečně citlivé hmoty pozorovat řadu jasně ohraničených barevných pruhů. Prosvětlením modelu monochromatickým světlem jeví se tyto pruhy jako tmavé čáry. Jsou to charakteristické pruhy pro fotoelasticimetrii - izochromaty, které můžeme interpretovat jako vrstevnice kvantitativního rozložení rozdílů hlavních napětí.

Izochromaty podávají jasný obraz o místech, kde rozdíly hlavních napětí dosahují maximálních hodnot, i o místech nejméně namáhaných. Známe-li faktor určující velikost rozdílů hlavních napětí podél barevných pruhů ( optickou citlivost umělé hmoty ), můžeme vyjádřit rozdíl hlavních napětí v kterémkoliv bodě modelu, zjistíme-li řád barevného pruhu, který tímto bodem probíhá a násobíme-li ho tímto faktorem. Fotoelasticimetrie je jednou z vhodných a rychlých metod, kterou zjišťujeme okrajová pnutí v dvojdimenzionálních problémech. Izochromaty na okraji nezatíženého modelu určují přímo obvodová napětí. V ostatních bodech modelu zjistíme jednotlivá hlavní napětí různými doplňujícími analytickými nebo experimentálními metodami. Jako příklad analytické metody je integrace Laméových-Maxwellových rovnic podél izostat a experimentální-Tesařova optická metoda.

K dořešení rovinné napjatosti je nutné znát směry hlavních napětí, které jsou charakterizovány obrazem izostat. Fotoelasticimetrie dává podklady ke grafické konstrukci izostat, a to pomocí dalších charakteristických čar - izoklin. Izokliny (vždy tmavé čáry) se tvoří na modelu tam, kde směry hlavních napětí jsou shodné se směry zkřížených polarizačních rovin - polareidů. Jejich zakreslením, při postupném otáčení polareidů, získáme podklady pro konstrukci izostat.

Experimentální metody vyhodnocování napětí v bodech uvnitř modelu vyžadují speciálních přístrojů i značné zkušenosti experimentátora. Dvojdímenzionální fotoelasticimetrie můžeme též použít v některých případech i k řešení problémů trojdímenzionálních. V poslední době byly vyvinuty fotoelasticimetrické metody, které umožňují řešení pružnostních problémů na trojrozměrných modelech.

Využití rovinné fotoelasticimetrie je neocenitelné u těch strojních součástí, které mají nepravidelné obrysy a kde hledáme u tvarových změn velikost koncentrace napětí a vrubové účinky. Zde fotoelasticimetrie tvoří tedy článek mezi matematickou teorií pružnosti a pevnosti a mezi elastickými napětími v nepravidelných tvarech. Matematické analýzy můžeme použít v těch případech, kdy konstrukce nebo součásti nejsou tvarově příliš složité. Fotoelasticimetrickým měřením můžeme dále velmi přesně zjistit průběh a velikost napětí hlavních na modelech různých konstrukcí, lišících se svojí stavbou od soustav prutových. Jsou to zejména v oboru strojním: kola, ozubená kola, drážky, ojnice, oka a jiné tvarově komplikované součásti, jejichž statický výpočet i když přibližný, bývá pracný a obtížný. Fotoelasticimetrie má své výhody i nevýhody. K jejím výhodám můžeme počítat:

1. Pozorováním modelu v kruhově polarizovaném světle získáme po celém rozsahu modelu obraz izochromat. Isochromaty jsou geometrická místa bodů stejně zbarvených následkem konstantního dvojlehu a určují nám

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                 |                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------|
| VŠST Liberec                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou fotoelasticimetrickou | Katedra KOE        |
| Fakulta strojní                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                 | DP - ST - 687 / 69 |
| <p>geometrická místa bodů stejných rozdílů hlavních napětí. Protože rozdíl hlavních napětí je úměrný, představují izochromaty též obraz rozložení maximálních smykových napětí po celé ploše zkoumaného modelu.</p> <p>2. V přímkově polarizovaném světle získáme izokliny, které definují geometrická místa bodů v nichž směry hlavních napětí jsou rovnoběžné nebo kolmé ke směru zkřížených polarizačních rovin polaroidů. Definicí izoklin je dána grafická konstrukce izostat, t. j. dvou vzájemně ortogonálních systémů čar, podél nichž jsou smyková napětí nulová. Izostaty jsou charakteristické čáry pro vnitřní stav napětí. Jejich tangenty udávají směry hlavních napětí v každém bodě modelu. Izostaty poskytují velmi přesná data o kvantitativním rozložení napětí na zkoušeném předmětu.</p> <p>3. Tato optická metoda ukáže okamžitě místa největších obvodových napětí a to i při velmi složitých tvarech, u nichž není možné dostatečně přesné analytické stanovení vnitřního a obvodového napětí. Výsledky měření mohou být srovnány například s měřeními tenzometrickými.</p> <p>4. Fotoelasticimetrickou analýzou získáme přehled jak po stránce hospodárnosti, tak i bezpečnosti navržených konstrukcí. Při malých změnách v obrysu modelu můžeme vyšetřit vliv změny tvaru na průběh napětí a napětí na vrubech.</p> <p>5. U dvojrozměrných problémů jejichž analytické řešení by bylo velmi obtížné, je metoda fotoelasticimetrického zjištění napětí nepostradatelným pomocníkem.</p> <p>Její nevýhody jsou:</p> <p>1. Fotoelasticimetrická metoda, jako nepřímá metoda zjišťování napětí, vyžaduje výrobu přesných modelů bez vnitřních pnutí, správný experimentální postup a jako konečnou fázi, správnou interpretaci zjištěných dat na skutečnost. Též vyhodnocování napětí uvnitř modelu grafickými nebo početními metodami i do-</p> |                                                                 |                    |
| - 7 -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                 |                    |

|                 |                                                                 |                   |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou fotoelasticimetrickou | Katedra KOE       |
| Fakulta strojní |                                                                 | DP - ST - 687/ 69 |

datečným doměřováním je v některých případech komplikované a pracné.

- Realizace skutečného zatížení na modelu bývá někdy obtížná. Rovnoměrné zatížení se často nahrazuje osamělými břemeny, která vyvozují místní koncentrace napětí a částečně zkreslují skutečnost v blízkém okolí jejich působišť. Použití této metody je do určité míry omezeno nařešení napětí v mezích Hookeva zákona.
- Fotoelasticimetrické měření můžeme použít při hledání povrchových napětí jako např.: modelového vyjádření napětí vzniklého v materiálu při válcování, napětí vzniklých tepelným zpracováním i svařováním atd.
- Je nutné přesné provedení zatěžovacího systému, aby případné neznámé třecí síly zatěžovacího mechanismu neovlivňovaly napětí. Též způsob přímého zatížení modelu břemeny může mít vliv na napjatost.

Závitové spojení je jeden z případů, kde bude pevnost hlavně ovlivněna vrubovými účinky ( což plyne z tvaru závitu), přičemž řešení napjatosti pod účinkem vrubu, z hlediska matematické teorie pružnosti a pevnosti je velmi obtížné, je fotoelasticimetrie zatím jediným způsobem, jak se dá odpovědně posoudit napjatost v těchto součástkách s hlavním zaměřením na maxima napětových špiček, které rozhodují o pevnosti celého spojení. Můžeme tedy říci, že fotoelasticimetrie je jediný experimentální způsob pro posuzování tvarů navržených konstrukcí závitových spojení.

2. 0 Metodika fotoelasticimetrických zkoušek pro sledování vlivu váhy mezi šroubem a maticí na vznik a rozložení napětí při statickém zatížení spoje.

### 2. 1 Přehled závitových tolerancí.

Naše strojírenství užívá dvou druhů uložení a to hybné a přechodné. Předmětem našich zkoušek je hybné uložení, na které je zaměřen následující přehled. Nejuzívanější závitový profil používaný u nás je metrický závit podle soustavy ISO. Jeho základní profil a označení rozměra je zobrazen v příloze č. 1. Odchyly od tohoto základního profilu vyjadřují toleranční značky se stupni přesnosti.

Příklady: toleranční značka závitu matice

5 H      6 H

toleranční značky malého průměru závitu matice  $[T_{D1}(6)]$

→ toleranční značka středního průměru závitu matice  $[T_{D2}(5)]$

Jsou-li obě toleranční značky shodné stačí jednoduchý zápis např. 6 H.

toleranční značka závitu šroubu

4 h      5 h

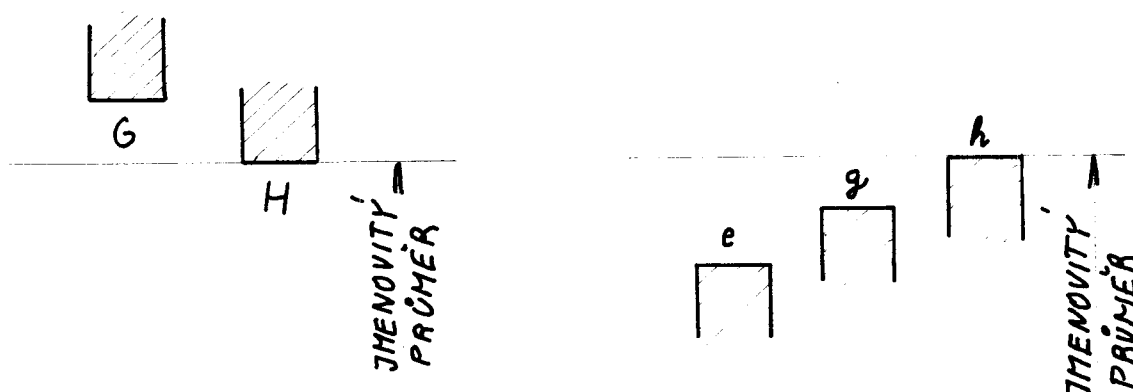
toleranční značka velkého průměru závitu šroubu -  $T_{d1}(5)$

↓ toleranční značka středního průměru závitu šroubu -  $T_{d2}(4)$

Za závit matice považujeme každý vnitřní závit a za závit šroubu každý vnější závit.

Uložení závitového spoje označujeme zlomkem jehož čitatel udává toleranci matice a jmenovatel toleranci šroubu.

Mezní úchytky jsou dány základní úchytkou a přidruženou úchytkou. Základní úchytky určuje polohu tolerančního pole pro matici a šroub, což je přehledně zobrazeno na obr. č. 1.



obr.č.1

Její velikost t.j. vzdálenost tolerančního pole od nulové čáry se vypočte podle tabulky č.1.

| Značka základní úchytky | Základní úchytky $\mu m$ | Poznámka                           |
|-------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| G                       | $+15 + 11 t$             | Základní úchytky je dolní úchytkou |
| H                       | 0                        |                                    |
| e                       | $-(50 + 11 t)$           | Základní úchytky je horní úchytkou |
| g                       | $-(15 + 11 t)$           |                                    |
| h                       | 0                        |                                    |

tab.č.1

Kde -  $t$  je rozteč závitu v mm.

Užívané rozteče závitů: 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,6; 0,7; 0,75; 0,8; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2,-; 2,5; 3,-; 3,5; 4,-; 4,5; 5,-; 5,5; 6 mm.

#### Tolerance

-----

Tolerance závitu šroubu:

Tolerance velkého průměru závitu šroubu je dána dle tab.2.

Tolerance středního průměru závitu šroubu nezávisí jen na rozteči, ale i na velikosti závitu, tedy na velkém průměru.

| Stupeň<br>přesnosti<br>tolerance | značka tolerance | Tolerance v $\mu m$                    |
|----------------------------------|------------------|----------------------------------------|
| 4                                | $T_d (4)$        | $0,63 T_d (6)$                         |
| 6                                | $T_d (6)$        | $180 \cdot 3 \cdot t^2 - 3,15 \cdot t$ |
| 8                                | $T_d (8)$        | $1,6 T_d (6)$                          |

Tab.č.2

Pro praktické použití jsou velké průměry závitu rozděleny do určitých rozsahů a pro každý z nich je stanoven jediný výpočtový rozměr  $d_s$ . Tím jsou tolerance určitého stupně přesnosti pro určitou rozteč závitu a pro určitý rozsah velkých průměrů závitu konstantní. Výpočtový rozměr je geometrický průměr dvou sousedních velkých průměrů, které jsou sestaveny v následující řadě: 0,99; 1,4; 2,8; 5,6; 11,2; 22,4; 45,-; 90,-; 180,-; a 355,- mm. T.zn. že např. výpočtový průměr pro rozsah velkých průměrů 22,4 až 45,- mm je

$$d_s = \sqrt{22,4 \cdot 45} = 31,7 \text{ mm}$$

Z vypočteného středního průměru pak určuje vzorec

$$T_{d2} (6) = 90 \cdot t^{0,4} \cdot d_s^{0,1} \quad [\mu m]$$

základní toleranci středního průměru závitu šroubu. Tento vzorec určuje toleranci šestého stupně přesnosti, tolerance pro ostatní stupně přesnosti se získají násobením  $T_{d2} (6)$  příslušným koeficientem viz tab.č.3.

| Stupeň<br>přesnosti<br>tolerance | 3   | 4    | 5   | 6   | 7    | 8   | 9   |
|----------------------------------|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|
| koeficient                       | 0,5 | 0,63 | 0,8 | 1,- | 1,25 | 1,6 | 2,- |

Tab.č. 3

Tolerance malého průměru závitu se běžně neurčuje. Poloměr dna závitu  $r = H/6$  až  $H/8$ .

## Tolerance závitu matice:

Velké průměry závitu matice nejsou tolerovány. Tolerance středního průměru matice vychází z tolerance středního průměru závitu šroubu v šestém stupni přesnosti  $T_{d2} (6)$ , a to tak, že  $T_{d2} (6)$  násobíme příslušnými koeficienty dle jednotlivých stupňů přesnosti viz tab.č. 4.

| Stupeň tolerance | 4    | 5    | 6    | 7   | 8    |
|------------------|------|------|------|-----|------|
| koeficient       | 0,85 | 1,06 | 1,32 | 1,7 | 2,12 |

Tab.č.4

Tolerance malého průměru závitu matice viz.tab.č.5.

| Stupeň přesnosti tolerance | Značka tolerance | Tolerance v $\mu m$<br>při rozteči $t$ v mm |              |
|----------------------------|------------------|---------------------------------------------|--------------|
|                            |                  | 0,2 až 0,8                                  | 1 a více     |
| 4                          | $T_{D1} (4)$     | 0,63 $T_{D1} (6)$                           |              |
| 5                          | $T_{D1} (5)$     | 0,8 $T_{D1} (6)$                            |              |
| 6                          | $T_{D1} (6)$     | $433t-190t^{1,22}$                          | $230t^{0,7}$ |
| 7                          | $T_{D1} (7)$     | 1,25 $T_{D1} (6)$                           |              |
| 8                          | $T_{D1} (8)$     | 1,6 $T_{D1} (6)$                            |              |

tab.č. 5

## Zaokrouhlování:

Veškeré vypočtené hodnoty v odstavci 2. 1 se zaokrouhlují na nejbližší hodnoty R 40.

## 2. 2 Fotoelasticimetrické modely.

Výsledky získané při vyšetřování napjatosti na zmenšených nebo zvětšených modelech je nutno aplikovat na skutečné dílo. Máme-li řešit úlohu napjatosti ve šroubovém spoji musíme uvažovat o všech veličinách na nichž je problém závislý.

V úlohách pružnostních vystupuje celá řada veličin. Omezíme-li se na případy statické, pak všechny fyzikální veličiny v jejichž rozměrech se vyskytuje čas, se na problému nezúčastňují.

Z teorie pružnosti vyplývá, že problémy napjatosti, jsou-li hmotové díly konstantní nebo nulové, nezávisí na elastických konstantách materiálu. Počet fyzikálních veličin na problému se zúčastňujících se tedy podstatně zjednodušuje, takže zde budou pouze:

geometrické rozměry

 $a, b, c, \text{ (cm)}$ 

povrchové síly

 $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3 \text{ (kp)}$ konstantní hmotové síly na jednotku objemu, spc. váha  $\gamma \left[ \frac{\text{kp}}{\text{cm}^3} \right]$ vnitřní síly - napětí  $\sigma \left[ \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \right]$ 

Z uvedených fyzikálních veličin lze sestavit rovnice, které popisují vyšetřovaný fyzikální stav, přičemž vztah mezi  $\sigma$  veličinami musí být dimenzionálně homogenní, t.j., že rozměry všech členů v této rovnici musí být stejné.

Z teorie fyzikální podobnosti je známo, že problémy téhož druhu, jejichž bezdimenzionální argumenty jsou stejné jsou fyzikálně podobné.

Napětí  $\sigma$  je na konstrukci funkcí uvedených fyzikálních veličin a můžeme proto napsat

$$\sigma = \varphi(a, b, c, \dots, \bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3, \dots, \gamma)$$

nebo implicitně

$$\Phi(a, b, c, \dots, \bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3, \dots, \gamma, \sigma) = 0$$

Pro bezdimenzionální argumenty pak nalezneme obecnou souvislost:

$$f\left(\frac{b}{a}, \frac{c}{a}, \dots, \frac{\bar{P}_2}{\bar{P}_1}, \frac{\bar{P}_3}{\bar{P}_1}, \dots, \frac{a^3 \sigma}{\bar{P}_1}, \frac{a^3 \gamma}{\bar{P}_1}\right) = 0$$

z níž vyplývají pro fyzikální podobnost modelu a díla. Bezrozměrné argumenty pro model a dílo musí být stejné, musí být proto splněny vztahy:

$$1. \quad \frac{b_m}{a_m} = \frac{b_d}{a_d} \quad ; \quad \frac{c_m}{a_m} = \frac{c_d}{a_d}$$

$$2. \quad \frac{\bar{P}_{2m}}{\bar{P}_{1m}} = \frac{\bar{P}_{2d}}{\bar{P}_{1d}} \quad ; \quad \frac{\bar{P}_{3m}}{\bar{P}_{1m}} = \frac{\bar{P}_{3d}}{\bar{P}_{1d}}$$

$$3. \quad \frac{a_m^2 \cdot \bar{G}_m}{\bar{P}_m} = \frac{a_d^2 \cdot \bar{G}_d}{\bar{P}_d}$$

$$4. \quad \frac{a_m \cdot \gamma_m}{\bar{G}_m} = \frac{a_d \cdot \gamma_d}{\bar{G}_d}$$

První podmínka vyjadřuje, aby geometrické rozměry díla a modelu byly ve stejném poměru, t.j. aby model byl dílu geometricky podoben.

Druhá podmínka vyžaduje, aby síly působící na model byly úměrné silám na díle a s nimi rovnoběžné a působily v odpovídajících bodech.

Z třetí podmínky vyplýne při zvolených geometrických poměrech rozměrů a sil díla a modelu, měřítko pro velikost napětí. Zvolíme-li poměr geometrických rozměrů díla a modelu  $\frac{a_d}{a_m} = n$  a poměr osamělých sil působících na díle a model  $\frac{\bar{P}_d}{\bar{P}_m} = n_1$ , pak napětí  $\bar{G}_d$  a  $\bar{G}_m$  budou v poměru

$$\frac{\bar{G}_d}{\bar{G}_m} = \frac{a_m^2 \cdot \bar{P}_d}{a_d^2 \cdot \bar{P}_m} = \frac{1}{n^2} \cdot n_1 = \frac{n_1}{n^2}$$

a síly na jednotku plochy díla a modelu v poměru

$$\frac{\bar{P}_d}{a_d^2} : \frac{\bar{P}_m}{a_m^2} = \frac{n_1}{n^2}$$

Z e čtvrté podmínky vychází vztah pro poměr specifických vah

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_m} = \frac{a_m \cdot \bar{G}_d}{a_d \cdot \bar{G}_m} = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot n_1 = \frac{n_1}{n^3}$$

Jestliže napětí mají být stejná na modelu i na konstrukci, pak měřítko pro velikost sil na modelu je vázáno na jeho geometrické rozměry; ze vztahu  $\frac{\bar{P}_d}{\bar{P}_m} = n_1$  dostaneme:

$$\frac{\bar{G}_d}{\bar{G}_m} = 1 = \frac{a_m^2 \cdot \bar{P}_d}{a_d^2 \cdot \bar{P}_m} = \frac{1}{n^2} \cdot n_1 \quad \text{z čehož} \quad n_1 = n^2$$

Bude-li tedy model proti dílu zmenšen v poměru 1: n, musíme:

osamělé síly zmenšit 1: n<sup>2</sup>

síly působící na jednotku délky zmenšit v poměru 1: n

síly působící na jednotku plochy ponechat nezměněné 1:1

specifickou váhu modelu zvětšit v poměru n:1

V případech, ve kterých má specifická váha zanedbatelný vliv na rozložení napětí nemusíme 4 podmínku fyz. podobnosti uvažovat.

|                 |                                           |                    |
|-----------------|-------------------------------------------|--------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou | Katedra KOE        |
| Fakulta strojní | fotoelasticimetrickou                     | DP - ST - 687 / 69 |

## 2. 3 Příprava modelového materiálu - příprava polotovaru.

### 2.31 Požadavky na modelový materiál

Fotoelasticimetrie požaduje na výrobu modelu Materiály, které mají vhodné mechanické vlastnosti ( vysoký modul pružnosti E, vysokou mez pružnosti a pevnosti, malý creep, malou relaxaci, schopnost zmrazování, dobrou slévatelnost a opracovatelnost atp.) a současně dobré optické vlastnosti (t.j. vysoká optická citlivost, průhlednost, žádný nebo nanejvýše malý okrajový efekt a optický creep, minimální vnitřní pnutí, lineární závislost dvojlehu na napětí stejnou pro tah i tlak atp.). Je zaveden t.zv. koeficient jakosti D plastické hmoty, zahrnující modul pružnosti E a optickou citlivost K:  $D = \frac{E}{K} \cdot 10^{-3} \text{ (cm}^{-1}\text{)}.$

Materiál vhodný pro zhotovení modelu má mít  $D = 1$ . Z hmot u nás vyráběných našemu účelu nejlépe vyhovuje epoxydová pryskyřice CHS 110, vytvrzovaná anhydridy kyseliny ftalové a kyseliny maleinové.

Modely používané ve fotoelasticimetrii můžeme v podstatě rozdělit do tří skupin podle složitosti tvaru:

1. jednoduché modely, které se dále neopracovávají. Požadujeme hladký povrch bez trhlin a bublin.
2. Složitě modely, které se dále opracují. Nezáleží zpravidla na jakosti povrchu. Musí se však dbát na homogenost a stejnorodost materiálu.
3. Složitě modely, které nelze opracovat. Jsou to modely s tvarevě komplikovaným povrchem. Zde je kritérium jakosti povrchu i vnitřku modelu nejpřísnější.

Protože epoxydová pryskyřice CHS 110, kterou budeme pro naše pokusy používat, je litým materiálem a odlitý polotovar můžeme zařadit do skupiny složitých modelů, které se dále opracují, zabýváme se nyní problematikou odlévání polotovaru.

|                 |                                                                 |                    |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou fotoelasticimetrickou | Katedra KOE        |
| Fakulta strojní |                                                                 | DP - ST - 687 / 69 |

2. 32 Odlévání polotovaru.

Požadavky kladené na lité materiály:

malá viskozita, vysoká adheze, zvýšená teplota polymerace, vyšší měrná váha a toxicita tužidel.

Požadavky na kvalitu povrchu jsou základem požadavků na formu; forma má být:

- a/ neprotýšná
- b/ opatřena vhodnou antiadhezní vrstvou
- c/ odolná proti teplotě ( 70-120°C)
- d/ dostatečně pevná a tuhá
- e/ chemicky netečná

Materiály přicházející v úvahu pro výrobu forem jsou: akryl, ocel, mosaz, sádra, modelit, silikonový kaučuk a.j.

Polotovary pro výrobu šroubu a matice jsou válcového charakteru, je vhodné tedy jako formu využít skleněné válcové nádoby.

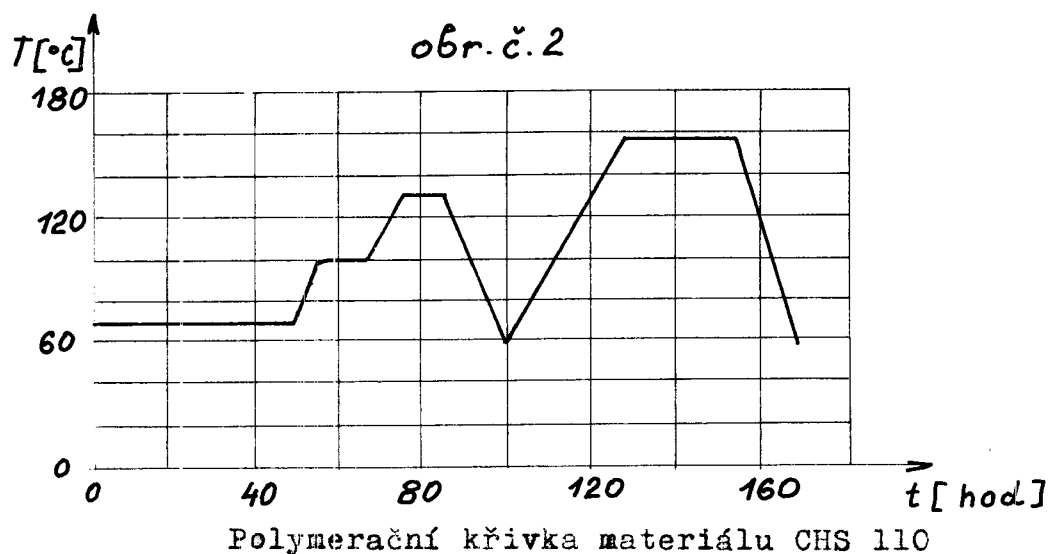
Příprava skleněné formy:

Sklo zbavíme před nanášením separační vrstvy mastnoty teplým vodním roztokem alkalického hydroxydu a opláchneme čistou vodou. Nanášení separační vrstvy se provádí namáčením skla v roztoku separátoru. Jako separátor se používá silikonového vypalovacího laku M 115, který se ředí v poměru 1:2 acetonem. Separátor se nechá odkapat a nechá se zaschnout asi 30 min. a poté se vrstva vypaluje při 200°C 1 hodinu. Musí se dbát, aby vzestup teploty byl pozvolný, protože je nebezpečí popraskání skla.

Odlévání a polymerace se provádí takto:

Přisýkací se předehřeje na 70 - 73°C. Zvlášť se roztaví odpovídající množství anhydridu kyseliny maleinové převrstvené určitým množstvím anhydridu kyseliny ftalové. Směs se roztaví při 140°C. Tavenina se nechá volně ochladnout na 93°C. Poté se za míchání přelije do předehřáté epoxydové přisýkací. Teplota směsi je asi 80°C. Směs se za míchání chladí na 65 °C a při této teplotě se odlévá. Míchání připravené směsi provádíme přiměřeným

tempem, abychom zbytečně nevytvářeli v objemu směsi shluky vzduchových bublin. S rostoucí teplotou se snižuje průhlednost modelu. Odlévá se do formy předehřáté na  $60^{\circ}\text{C}$  rovnoměrným proudem po stěně formy, přičemž se musí forma naklonit tak, aby mohl dobře unikát vzduch a při lití se netvořily bubliny. Plná forma se vloží do glycerinové lázně, nebo se zalije silikonovým olejem Lukoöl MF,  $60^{\circ}\text{C}$  teplé. Tato lázeň má za úkol vyrovnat hydrostatický tlak nalité pryskyřice, stejnoměrně přenášet teplo a slouží jako zásobník tepla při eventuálním vypnutí proudu. Teplota  $60^{\circ}\text{C}$  se ponechá tak dlouho, až epoxydová pryskyřice ve formě zgelovatí, což potrvá 48 - 70 hod. Na obr.č.2 je polymerační křivka pro materiál CHS 110. Po skončení polymerace a ochlazení se odlitek vyjme z formy a provede se vyžihání materiálu po dobu 20 hod. při  $160^{\circ}\text{C}$ . Žihání se provádí v olejové lázni Lukoöilu MF, který též částečně separuje. Po uplynutí žihací doby je nutný pomalý pokles teploty ( $2-5^{\circ}\text{C}/\text{hod.}$ ) až na  $50^{\circ}\text{C}$ . Vyžiháním se odstraní nejen pnutí, které vzniklo při polymeraci, ale též se zlepší mechanicko-optické vlastnosti materiálu.



Tímto je připraven poltovar k dalšímu zpracování. Počáteční teplota má podstatný vliv na zbarvení výsledného produktu. Čím je nižší teplota lití, tím světlejší je materiál a mění se jeho mechanické vlastnosti.

|                 |                                                                 |                    |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou fotoelasticimetrickou | Katedra KOE        |
| Fakulta strojní |                                                                 | DP - ST - 687 / 69 |

Čím nižší teplota, tím vyšší pevnost, houževnatost, atp. Je třeba dbát toho, aby počáteční teplota polymerace a teplota lití byly co nejnižší.

2. 4 Výroba vlastního modelu.

Chceme-li sledovat vliv vřele na rozložení napětí v závitovém spoji, musíme vyrobit řadu modelů naprosto shodných tvarů a vnějších rozměrů. Jednotlivé modely se budou od sebe lišit pouze velikostí předepsané vřele v rámci zkoumaných tolerancí. Vyrobit tak přesné modely, znamená zvýšenou pracnost a větší náklady s tím spojené. Z výrobních důvodů a z důvodů přesnějšího vyhodnocení je výhodné volit základní jmenovitý rozměr závitů co největší, aby se daly nepatrné rozdíly jednotlivých vřel co nejlépe postihnout.

2. 41 Výroba šroubu.

Šroub vyrábíme z válcového polotovaru s přírůstkem na obrábění 5-10 mm. Velikost přírůstku závisí na přesnosti polotovarového odlitku. Poměrně značný přírůstek je také z toho důvodu, že při povrchu odlitku se často zachycují vzduchové bubliny, které jsou při vyhodnocování patrné jako místa zvýšené koncentrace napětí a mohly by zkreslit průběh napětí v jejich okolí.

Pro soustružení se nejlépe hodí soustružnické nože s destičkami ze slinutých karbidů typ P 10, P 20 ( S1, S2 ). Soustružení provádíme za intenzivního chlazení hydrolem. Osvědčené řezné podmínky pro soustružení:

řezná rychlost  $v = 50 \text{ m/min.}$   
posuv  $s = 20-25 \text{ mm/min.}$   
hloubka třísky  $h = 0,5 - 1 \text{ mm}$

Poměrně vysoká řezná rychlost, malý posuv a malá hloubka třísky jsou dány křehkostí materiálu CHS 110, který při nízkých řezných rychlostech se snadno vytrhává a tvoří velmi hrubý povrch. Tento hrubý povrch zvláště nepříznivě ovlivní pevnost materiálu při zmrazování ( kolem  $160^{\circ}\text{C}$  ) a průběh izochromat v blízkosti povrchu modelu. Proto jako dokončovací operaci pro obrobek povrchu šroubu volíme broušení, které nám zajistí daleko kvalitnější

|                 |                                           |                    |
|-----------------|-------------------------------------------|--------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou | Katedra KCE        |
| Fakulta strojní | fotoelasticimetrickou                     | DP - ST - 687 / 69 |

povrch než soustružení. Při tomto broušení se nejlépe osvědčil brusný kotouč A 99 - 60 K, rychlost brusného kotouče 30 m/s, rychlost obrobku 8 m/min. Broušení provádíme na hrotové brusce. Výrobu vlastních závitů provádíme na přesné brusce, např. typu Reishauer, brusným kotoučem EK 3,  $\phi$  350-160 x 10 (švýcarské výroby).

Řezné podmínky:

rychlost obrobku                      kolem 1 m/min.

rychlost závitového brusného kotouče    65 m/s

hloubka třísky                      h = 0,2 mm

Brousíme za stálého chlazení olejovou emulzí.

**2. 42 Výroba matice.**

Matici vyrábíme opět z válcového polotovaru, s přibližně stejnými přídávky na obrábění jako u šroubu. Je výhodné volit vnější průměr matice co největší, aby se co nejvíce odstranily okrajové vlivy na průběh napětí v závitě. Vnější průměr matice volíme asi jako trojnásobek průměru šroubu. Nejdříve obrábíme matici soustružením nahrube jako šroub a v poslední třísce volíme h do 0,5 mm, abychom nemuseli již povrch matice brousit. Soustružením dostaneme sice hrubší povrch než broušením, ale tento povrch je pro matici zcela dostačující. Otvar v matici předvrtáváme stupňovitě od průměru díry 10 mm do požadovaného průměru asi po 5 mm. Kdybychom vrtali do tělesa matice větší otvor napoprvé nebo volili příliš malý vnější průměr matice, hrozí nebezpečí, že vlivem teplot vznikajících při obrábění vznikne silné pnutí v obrobku vlivem tepla způsobeného obráběním, že dojde k roztržení tělesa matice (roztržené těleso matice viz vzorkovnice). Osvědčilo se vrtat díru pro závit v matici na soustruhu při 700 ot./min.. Závit řežeme maticovým závitníkem ručně, nevytáčíme jej zpět, řežeme pouze jedním směrem (bez vracení). Při řezání mažeme strojním olejem. Obzvláště je nutno bedlivě dbát na odchod třísek při řezání závitu. Dostane-li se tříska na bok nebo vrchol závitu, závitník ji lehce zatlačí mezi hřbet závitníku a již vyřiznutý závit. Materiál je velmi tvrdý a křehký,

|              |         |                                                               |                    |
|--------------|---------|---------------------------------------------------------------|--------------------|
| VŠST Liberec |         | Průběh napětí v závitovém spoji metodou fotoelasticimetrickou | Katedra KOE        |
| Fakulta      | strojní |                                                               | DP - ST - 687 / 69 |

tříska se do materiálu nezatlačí a dochází v tomto místě k velkému stoupnutí měrného tlaku a materiál se vydrolí.

V případě, že budeme vyrábět závity o vnitřním průměru matice větším jak 30 mm, bylo by výhodné vyrábět vlastní závit broušením na již zmíněné závitové brusce, čímž by se dosáhlo daleko kvalitnějšího povrchu závitů matice a přesnějšího provedení závitového profilu matice.

Problém třískového obrábění materiálu 2521 a ostatních materiálů z epoxy CHS 110 je velmi ožehavý a málo prozkoumaný (řezné podmínky, geometrie břitu, materiál nástroje atp.). Bylo by vhodné a pro fotoelasticimetrické laboratoře velmi účinné samostatné řešení třískového obrábění tohoto materiálu. Řezné podmínky a způsoby obrábění pro naše modely závitového spojení byly získány víceméně náhodně, takže mohou existovat i jiné řezné podmínky pomocí nichž dosažené výsledky kvality povrchu budou lepší.

**2. 5 Proměřování vyrobených modelů.**

Při zkoumání vlivu vále je nejdůležitější před vlastním fotoelasticimetrickým pokusem mít jednotlivé modely přesně změřeny a patřičně očíslovány, protože jde o malé rozdíly ve velikostech průměrů závitového profilu a mohlo by dojít snadno, při montáži před zmrazováním a před preparací vzorků pro vyšetřování napětí, k záměně jednotlivých kombinací šroubu a matice.

Postup označování a proměřování šroubu a matice.

Vyrobený šroub označíme na dřívku dvěma ryskami, rovnoběžnými s osou šroubu a vzájemně ležících ve dvou rovinách na sebe kolmých, jež procházejí osou šroubu. Tyto rysky popíšeme např. malými psacími písmeny. Dále šroub očíslováme na jeho čele, nejlépe římským číslem, případně velkým tiskacím písmenem abecedy. Takto označený šroub upneme do optického měřícího přístroje a v označených řezech provedeme měření středního průměru, velkého průměru, úhlu profilu a stoupání závitů, přičemž naměřené hodnoty sestavujeme do tabulky.

Při měření postupujeme od přechodu závitu do dřívku směrem k volnému konci šroubu, taktéž číslování jednotlivých závitů provádíme v tomto směru.

Matice označíme písmeny velké abecedy na vnějším průměru tělesa matice a změříme, kuličkovým mikrometrem na měření středního průměru závitu, střední průměr, dále změříme vnitřním mikrometrem malý průměr závitu matice, případně můžeme proměřit stoupání jednotlivých závitů matice. Závity matice počítáme od označeného čela (čela, na jehož vnějším průměru je písmenný znak).

Po tomto důkladném proměření máme přesný přehled o skutečných rozměrech vyrobených modelů. Protože výroba většinou nezajistí výrobu jednotlivých součástí v tak přesných rozměrech jaké požadujeme, je nutné vybrat teprve nyní jednotlivé dvojice šroubu a matice tak, aby velikosti jejich vzájemných závitových vřtů co nejlépe pokryly zkoumaný toleranční interval. Výběrem získané dvojice sešroubujeme o přesně stejný počet závitů a označíme ryskou jejich vzájemnou polohu (polohu šroubu vzhledem k matici). K označování poloh a k popisu jednotlivých součástí se hodí keřová rýsovací jehla, kterou značky vyryjeme do materiálu modelu.

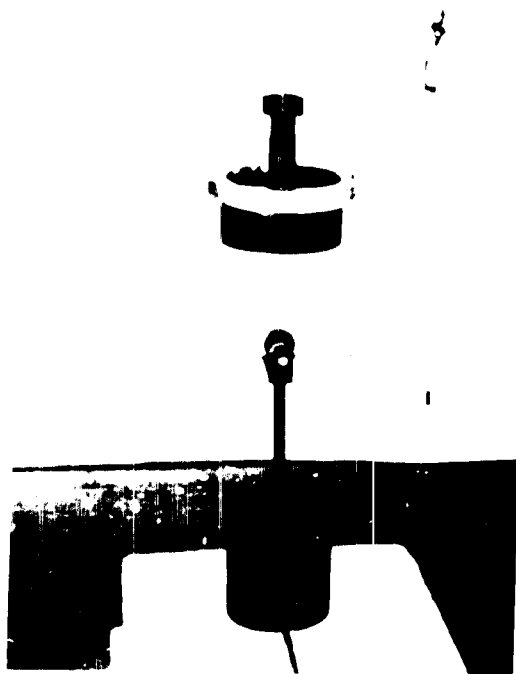
## 2. 6 Postup při zmrazování.

Zmrazování modelů spočívá v tom, že se v modelech zachytí trvale orientační dvojčlennost. Abychom ho vyvolali, musíme model vyrobený z vhodné hmoty zatížit tak, aby byly zachovány zákony fyzikální podobnosti (viz úvodní teorie modelů - část 2.1, podrobněji pak v listě č.2.), a vyhrát na zmrazovací teplotu, t.zn. na bod přechodu druhého řádu nebo model vyhrát a pak zatížit. Předepsanou dobu (1 hod.) se nechá model zatížený na zmrazovací teplotě, poté zvolna ochladí na normální teplotu a odlehčí. Vyjme se z komory a z vychladlého se vyříznou potřebné destičky, na kterých se pak bude provádět měření.

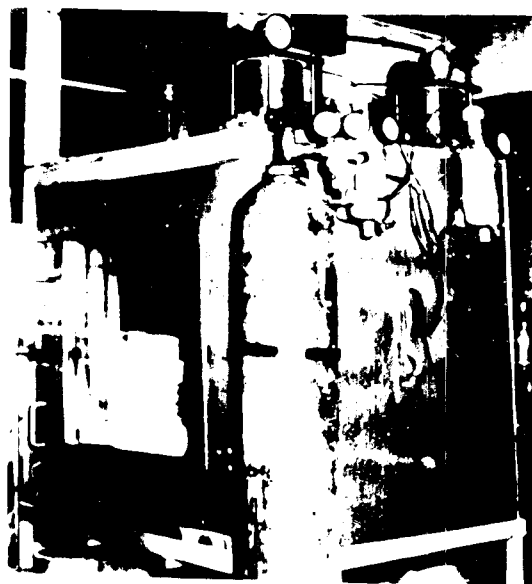
|                 |                                                                   |                   |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou fotoelastické metrickou | Katedra KOE       |
| Fakulta strojní |                                                                   | DP - ST - 687/ 69 |

Při přípravě je třeba dbát na to, aby závěs byl dostatečně dlouhý. Docílí se tím minimální odchylka působící síly mimo osu šroubu. U zkoušky šroubu, zvláště při sledování vlivu vále, je nutné dodržet přesně polohe ( souosost ) působící síly v podélné ose modelu.

Zatěžovací zařízení s jeho detaily provedení je patrné z obr.č. 3(a podrobné konstrukční provedení závěsu je v příloze č.3) , kde je vyobrazen šroub s maticí a kruhový prstenec navlečený na matici s patřičným zatěžovacím závažím. Šroub je z opačné strany uchycen kovovou matkou s ohebným závěsem, který je upevněn na stropu zmrazovací komory. Vlastní zmrazovací komora je znázorněna na obr.č. 4.



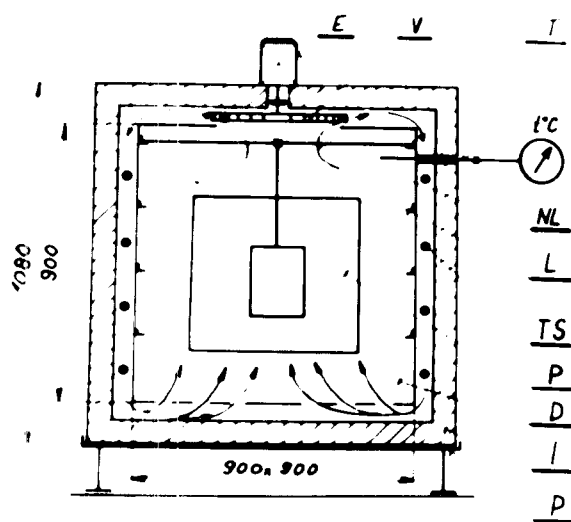
obr.č. 3



obr.č.4

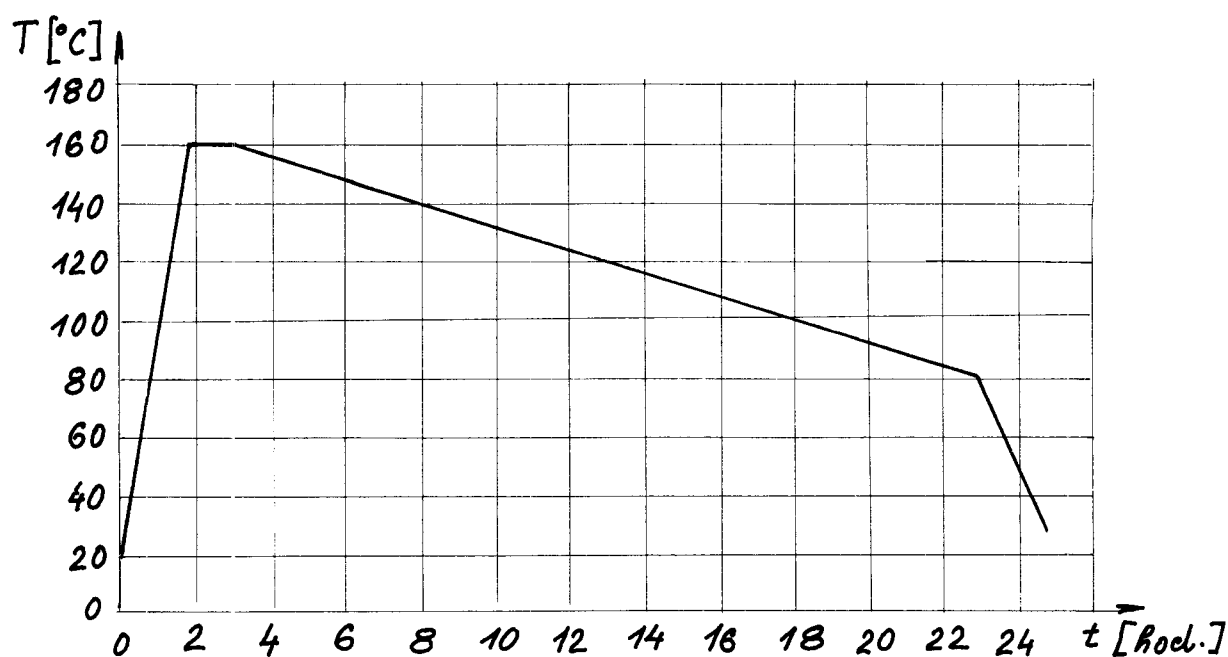
Model se zavěsí na závěs do zmrazovací komory a položí tak, aby při případném porušení závěsu nebo modelu nedošlo jeho pádem na dno komory k dalšímu porušení modelu. Komora se neprodyšně uzavře a začne se vyhřívat.

Při našich měřeních použijeme zmrazovací komory konstrukce ing. M. Perly CSc, která je ve vlastnictví HÚ ČSAV v Holešovičkách v Praze. Příkon této komory je 6 kW, napětí 3x 380 V, maxim. dosažitelná teplota 200°C. Případně je možné užít jakékoli jiné pece, kterou lze neprodyšně uzavřít a opatřit citlivým termostatem a plynulou regulací vnitřní teploty pece v rozsahu do 200°C. Popis komory ing. M. Perly: schema je na obr.č.5. Podél svislých stěn komory jsou uloženy topné spirály ( TS ). Pro dosažení rovnoměrné teploty ve všech částech komory je v horní části zabudován odstředivý ventilátor ( V ), který zaručuje proudění vzduchu z vnitřního prostoru přes topné spirály a otvory ve dně komory zpět do vnitřního prostoru ( vyznačeno na obr.č.5 šipkami ). Vnitřní rozměry jsou 900x900x900 mm, vnější 1080x1080x1000 mm. Jako tepelné izolace ( I ) je užito skelné vaty. V boku komory je úzký svislý zářez, sloužící pro páku při vnějším zatěžování modelu. Komora má dvoje dveře proti sobě, ve kterých jsou zasklené průhledy pro pozorování a fotografování modelu. U stropu komory je tenzometrický snímač teploty ( T ). Pro kontrolu se zavěšuje vedle modelu rtuťový teploměr (viz obr.č.3).



obr.č. 5

Dvě hodiny po zapnutí komory bývá dosaženo zmrazovací teploty  $160^{\circ}\text{C}$ . Aby došlo k rovnoměrnému prohřátí modelu v každém jeho bodě, setrvává se jednu hodinu na zmrazovací teplotě. Poté se, zapnutím programového regulátoru teploty, snižuje teplota o  $4^{\circ}\text{C}$  za hodinu na  $80^{\circ}\text{C}$ , po jejím dosažení se komora vypne a model se nechá v komoře chladnout na normální teplotu. Celá operace zmrazování trvá 24 - 30 hodin. Záleží to, mimo jiné, na velikosti modelu. Průběh zmrazovací teploty je na obr.č.6



obr.č.6

## Průběh zmrazovací teploty.

Po ochlazení na normální teplotu se model sundá ze závěsu a vyjme z komory. Na šroubu i matici se kontroluje podle předem provedené rysky nedošlo-li během zmrazování k vzájemnému potočení šroubu a matice. V případě potočení by se musel zmrazovací proces opakovat. Po rozšroubování šroubu a matice můžeme přikročit k preparaci destiček. Chceme-li dosáhnout přesného obrazu rozložení napětí, ve styku šroubu a matice, musíme provést řez přesně na stejných místech šroubu a matice.

Pro řezání destiček platí stejné zásady jako pro soustružení. Řezání provádíme na fréze, kotoučovou pilou

dostatečného průměru, aby pila prošla celou současně odřezávanou plochou najednou, v jednom směru. Tloušťku kotouče volíme podle možnosti co nejmenší, k dispozici bývají obyčejně kotouče tloušťky 2 mm. Osvědčila se řezná rychlost kolem 900 m/min.. Posuv volíme nejmenší možný na dané fréze. Z hlediska teoretického by bylo ideální rozřezat model na co největší možný počet destiček, abychom dostali co nejvíce naměřených hodnot, a tím i lepší přehled o průběhu napětí v jednotlivých částech šroubu nebo matice. Destička musí být ve všech místech stejně silná. Otázka preparace destičky z modelu není bez problému. Dosud není spolehlivě zajištěno dosažení stejné síly destičky ve všech místech. Žádá se co nejtenší řezný nástroj. Sníží se odpad a získá se tím hlavně více destiček, jejichž proměřením dostaneme jasnější obraz průběhu napětí v prostorovém modelu. Běžně se volí tloušťka destiček od 1 do 2 mm. Při řezání destiček z matice, rozpálíme nejdříve celou matici jedním souvislým řezem a ostatní řezy provádíme tak, aby postupující kotoučová pila rozřezávala nejdříve závitový profil a pak materiál tělesa matice. Řežeme-li těleso matice od vnějšího průměru k vnitřnímu, pak zuby kotoučové pily, vycházející z řezu, strhávají sebou velké částičky materiálu závitového profilu, který je pro naše měření důležitý. Stejně jako při preparaci vzorku matice se snažíme postupovat u šroubu. Na obr.č.7 je vyobrazena upnutá matice před preparací prvního vzorku.



obr.č.7

Upnutá matice  
ve frézce.

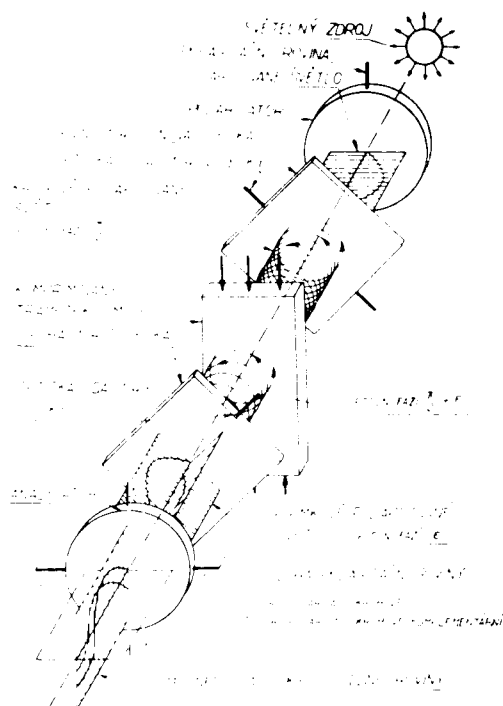
|                 |                                           |                    |
|-----------------|-------------------------------------------|--------------------|
| VŠST liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou | Katedra KOE        |
| Fakulta strojní | fotoelasticimetrickou                     | DP - ST - 687 / 69 |

## 2. 7 Postup při vyhodnocování.

Předběžné vyhodnocování provádíme již při preparaci vzorků z matice jednotlivých zkoumaných dvojic. Před preparací vzorků zvolíme na matici několik řezů, z nichž vypreparované destičky ihned po vyříznutí pečlivě očíslováme, a to vždy na vnějším průměru matice asi uprostřed její výšky. ( Z matice je možné získat nepoměrně víc kvalitních vzorků než z tělesa šroubu). Jednotlivé řezy matice okamžitě vyhodnotíme, nejlépe kompenzační metodou, kterou zjistíme v každém řezu maxim. hodnoty koncentrace napětí v nejexponovanějších místech každého řezu. Tyto předběžné hodnoty relativního dvojlohu podělíme příslušnými tloušťkami destiček, čímž získáme srovnatelné hodnoty pro všechny řezy matice. Nyní sestrojíme graf, na jehož jednu osu vynášíme vzájemnou polohu jednotlivých řezů v obloukové míře a na druhou osu pravoúhlého systému vynášíme již zmíněné porovnávací hodnoty. Po sestrojení této grafické závislosti lehce zjistíme maximum a minimum zobrazené funkce. Poloha extrému této funkce nám ukazuje poměrně přesně řez, v kterém je největší koncentrace napětí. Tomuto řezu matice bude odpovídat nejexponovanější řez šroubu, proto stačí ze šroubu vyříznout menší počet řezů, přičemž začneme vyříznutím destičky nejexponovanějšího řezu, která je pro náš účel nejdůležitější. Jestliže jsme vyrobili všechny modely ze stejného materiálu a dodrželi při montáži stejné vzájemné polohy u všech zkoumaných dvojic, můžeme na zbývajících dvojicích šroubů a matic přímo označit nejdůležitější dva řezy. Zkrátíme si tak práci s vyhledáváním nejnamáhavějšího řezu.

## 2. 71 Postup při vyhodnocování jednotlivých vzorků.

K tomuto účelu použijeme přístroje pracujícího na principu kruhové polarizace (schéma principu kruhové polarizace viz obr.č.8.), který je vybaven: monochromatickým světlem (rtuťová výbojka), monochromatickým zeleným filtrem, polarizátorem s dvěma čtvrtvlnnými deskami, analyzátozem a optickou zvětšovací soustavou.



obr.č. 8

Schema kruhové a kruhově komplementární polarizace.

Za analyzátozem přístroje je umístěna skleněná deska, na kterou položíme pauzovací papír, vložíme mezi analyzátor a polarizátor zkoumaný vzorek, a pečlivě obkreslíme jeho obrysy na pauzovací papír. Nyní nastavíme analyzátor a polarizátor do zkřížené polohy, před polarizátor vložíme zelený filtr a do nakresleného obrysu na pauzovacím papíře zakreslíme průběh izochromat, které se nám jeví jako černé čáry. Tím máme zachyceny izochromaty celých řádů po celé ploše vzorku. Zakreslíme-li tytéž čáry při polarizaci kruhově komplementární, t.j. polarizační roviny polarizátoru a analyzátoru jsou rovnoběžné, dostaneme izochromaty pátřádkové. Pátřádkové izochromaty zakreslujeme slabou nebo čárkovanou čarou. Dále označujeme řády jednotlivých izochromat a to tak, že postupujeme od vnitřní části směrem k obrysu a každý přechod přes izochromatu celého řádu očíslovujeme 1,2,3 atd. Protože nás zajímají při zkoumání vlivu vřele na napjatost v závitovém spoji hlavně místa s největší koncentrací napětí, která jsou rozhodující pro pevnost závitového spoje, můžeme nyní zjistit kompenzací přímo napětí ve vrubech závitového

profilu. Do připraveného nákresu, z kterého je již patrné, kde jsou napěťové špičky, doměříme maximální hodnoty relativního dvojhlomu v jednotlivých nejexponovanějších bodech takto: pauzovací papír nahradíme matnicí, analyzátor pootočíme do výchozí polohy a na matnici vidíme obraz průběhu izochromat celých řádů. Nyní otáčíme analyzátozem a zjišťujeme přesně místo, ve kterém izochromata nejvyššího řádu přejde okrajem obrysu. V tomto místě sestrojíme pomyslnou tečnu k obrysu řezu a vzorkem pootočíme tak, aby tato tečna byla rovnoběžná s polarizační rovinou polarizátoru. Nastavíme analyzátor opět do výchozí polohy a pootočíme jím z této polohy tak dlouho, až izochromata nejvyššího řádu přejde přes okraj vzorku. Pak na stupnici analyzátoru odečteme setiny relativního dvojhlomu. Takto postupujeme od jednoho závitu k druhému a naměřené hodnoty připisujeme k čarám, které se dotýkají obrysu nákresu v místech kde zanikly izochromaty, t. j. v místech napěťových špiček.

Stanovení izochromat a jejich vyhodnocení je nejdůležitější částí fotoelasticimetrického výzkumu. Pro stanovení rozdílu napětí v modelu použijeme rovnice

$$(\nu_1 - \nu_2) = \frac{2\pi m}{\rho c'}$$

p, které je úměrné frekvenci, můžeme nahradit výrazem

$$\rho = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

v = rychlost světla

konstanta  $c'$  je závislá na fyzikálních vlastnostech modelové hmoty. Vyjádřením  $c' = c \cdot t$  a dosazením do uvedené rovnice za  $\rho$  a  $c'$  jejich příslušné hodnoty obdržíme

$$(\nu_1 - \nu_2) = m \cdot \frac{1}{t} \cdot \frac{\lambda}{r \cdot c''}$$

označíme-li  $\frac{\lambda}{c'' \cdot r} = K$ , bude rozdíl hlavních napětí dán výrazem

$$(\nu_1 - \nu_2) = m \cdot \frac{K}{t} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

kde  $m$  = řád izochromaty. Z Moorovy kružnice pro napětí vyplývá, že rozdíl hlavních napětí  $(\nu_1 - \nu_2)$  se rovná

$$2\tau_{\max} = (\nu_1 - \nu_2) = m \frac{K}{t}$$

|                 |                                           |                    |
|-----------------|-------------------------------------------|--------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou | Katedra KOE        |
| Fakulta strojní | fotoelasticimetrickou                     | DP - ST - 687 / 69 |

Řády jednotlivých izochromat zjistíme tak, že je spočítáme, přičemž vycházíme od singulárního bodu nebo linie jako izochromaty nulového řádu. Polohu singulárních bodů, t.j. bodů v nichž jsou obě hlavní napětí stejně velká a jejich rozdíl je roven 0

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = 0 \cdot \frac{1}{E} \cdot K = 0;$$

zjistíme nejlépe v bílém kruhově polarizovaném světle. Zde obraz izochromat není rušen izoklinami; singulární body nebo linie jakožto izochromaty nultého řádu se jeví jako tmavé body nebo čáry, zatímco všechny ostatní izochromaty jsou duhově zbarvené. U modelů souměrných a souměrně zatížených jsou singulární body buď na ose symetrie nebo jsou k ní souměrně položeny.

Největší namáhání modelů bývá zpravidla v malé vzdálenosti od kraje; t.zn., že o pevnosti modelu a tím i konstrukci rozhoduje ve většině případů namáhání krajních vláken. Stačí tedy mnohdy, pro předběžnou orientaci o rozdělení napjatosti a o místech nejvíce namáhaných, pohled na obraz izochromat, abychom si učinili představu o vhodnosti navržené konstrukce. Protože při našich pokusech vycházejí napěťové špičky v kořenech vrubů, které nejsou zatíženy vnějšími silami, můžeme po zjištění optické citlivosti modelového materiálu, vypočítat ze zjištěných hodnot relativního dvojlomu, přímo hodnoty obvodového napětí. Jak z výše uvedené teoretické úvahy vyplývá, dostaneme velikost obvodového napětí podělením hodnot relativního dvojlomu, příslušnou tloušťkou vzorku v cm a vynásobením optickou citlivostí K. Zjištění optické citlivosti modelového materiálu je podrobně popsáno v literatuře č. 2,4.

Na závěr celého vyhodnocování sestavíme tabulky, od kterých zaznamenáváme k jednotlivým závitům v daných řezech velikosti relativního dvojlomu příslušné tloušťky destiček a hodnoty vypočítaného obvodového napětí. Tabulkové údaje vypracujeme ještě graficky a připojíme k hodnotícím údajům každého vzorku ještě příslušnou fotografii daného řezu, buď v barevném provedení nebo v černobílém provedení, a to při zkřížených polarizačních rovinách (v prvním případě budou černé čáry na fo-

tografií vyjadřovat průběh izochromat celých řádů a na druhé fotce půlřádů).

## 2. 72 Fotografování.

Ke zhotovování fotografií používáme černobílý materiál citlivosti  $10^0$  DIN. Popis problematiky zhotovování snímků při fotoelasticimetrických měřeních je podrobně popsán v literatuře č.2. Uvedme zde pouze praktický vyzkoušený příklad. Užijeme fotoaparátu Exakta s kinofilmem šířky 36 mm + teleobjektiv. Fotoaparát připevníme na přestavovatelný stojan a jako zdroje světla použijeme sodíkovou výbojku. Na čelo výbojky nasadíme polarizační filtr, na který přímo pomocí jemného silikonového oleje přilepíme destičku. Od této destičky ve vzdálenosti 13 cm umístíme analyzátor a o dalších 50 cm dále umístíme čočku teleobjektivu, takže film je vzdálen od analyzátoru asi o 70 cm. Expoziční doba 6 vt., clona 8.

3. 0 Vyhodnocení výsledků získaných experimentálními zkouškami a závěry týkající se závitových tolerancí.

Pro experiment jsem vybral závit M 24 ( jeho velikost je volena s ohledem na výsledky DP - ing. Radostného) a tolerance matice H 6 a šroubu g 6, které odpovídají středním hodnotám z přehledu uvedeného v odstavci 2.1. Těž z hlediska praxe se jeví tyto tolerance jako jedny z nejužívanějších.

Pro experiment byla vyrobena dvě šroubová spojení s různými tolerancemi závitů v mezích H 6 / g 6.

3. 1 Přehled naměřených rozměrů obou variant a jejich odchylek od jmenovitých rozměrů:

Varianta A - šroubové spojení s velkou válí

Šroub - označení vzorků A

$$\varnothing d = 24 - 0,420 = 23,58 \text{ mm} \quad \Delta d = 420 \mu\text{m}$$

$$\varnothing d_2 = 22,051 - 0,199 = 21,852 \text{ mm} \quad \Delta d_2 = 199 \mu\text{m}$$

$$t = 3 - 0,001 \text{ mm} \quad \Delta t = 1 \mu\text{m}$$

Matice - označení vzorků A

$$\varnothing D_1 = 20,752 + 0,001 = 20,753 \text{ mm} \quad \Delta D_1 = 1 \mu\text{m}$$

$$\varnothing D_2 = 22,051 + 0,23 = 22,281 \text{ mm} \quad \Delta D_2 = 230 \mu\text{m}$$

Varianta B - šroubové spojení s menší válí

Šroub - označení řezu B

$$\varnothing d = 24 - 0,390 = 23,610 \text{ mm} \quad \Delta d = 390 \mu\text{m}$$

$$\varnothing d_2 = 22,051 - 0,099 = 21,952 \text{ mm} \quad \Delta d_2 = 99 \mu\text{m}$$

$$t = 3 + 0,003 \text{ mm} \quad \Delta t = 3 \mu\text{m}$$

Matice - označení řezu B

$$\varnothing D_1 = 20,753 + 0,060 = 20,813 \text{ mm} \quad \Delta D_1 = 60 \mu\text{m}$$

$$\varnothing D_2 = 22,051 + 0,185 = 22,236 \text{ mm} \quad \Delta D_2 = 0,185 \text{ mm}$$

Pro názornější představu jsou na obr.č.9 porovnány jednotlivé rozměrové odchylky s velikostí tolerančních polí H6 a g5.

Na obr.č.10 je zachycen jmenovitý profil závitů M 24, oblasti tolerančních polí. Na obr.č.11 jsou zakresleny polohy řezů a jejich číslování, pro obě varianty zkoumaných spojů.

## Odchyšky středních průměrů závitů.

## Vysvětlivky:

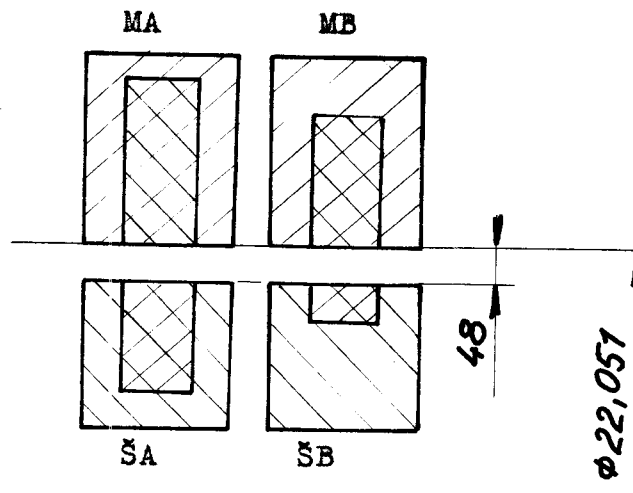
-  toleranční  
pole H6  
 toleranční  
pole g6  
 skutečně  
vyrobené  
odchyšky

$M_A$  - odchyšky  
matice A

$M_B$  - odchyšky  
matice B

$\bar{S}_A$  - odchyšky  
šroubu A

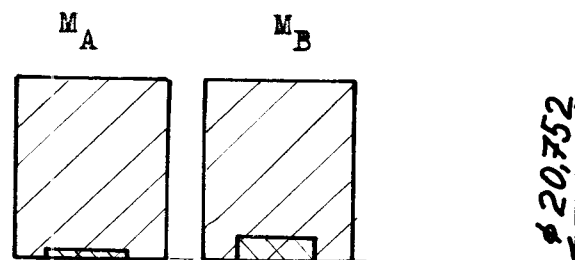
$\bar{S}_B$  - odchyšky  
šroubu B



obr.č.9a

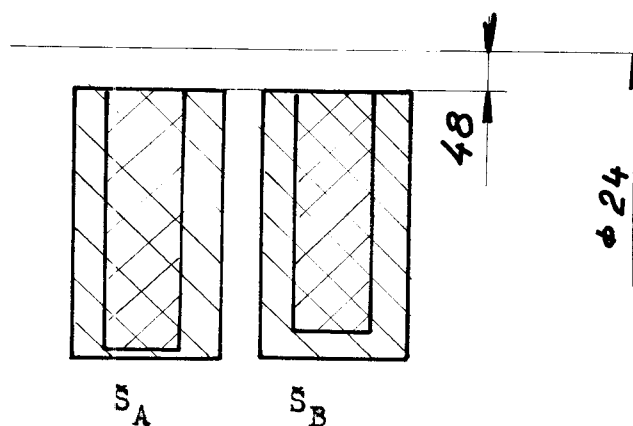
## Odchyšky malých průměrů matic.

obr.č.9b



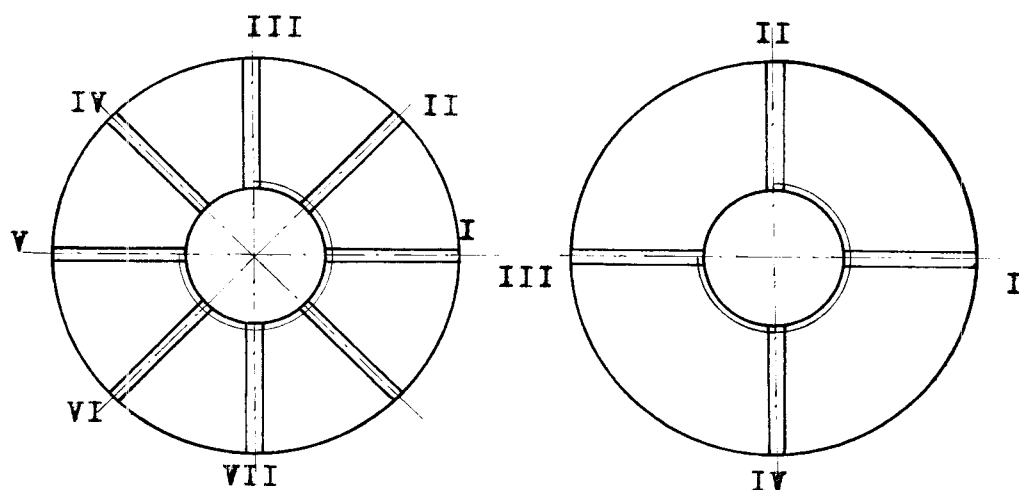
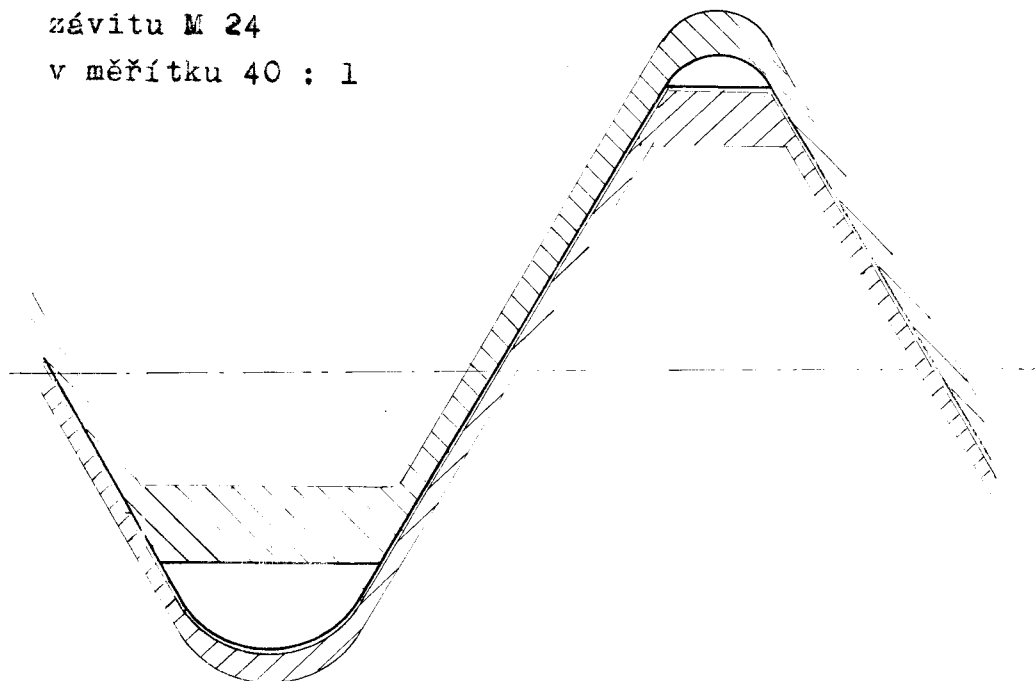
## Odchyšky velkých průměrů šroubů.

obr.č.9c



Obr.č.10

Toleranční pole H6 - g6  
závitu M 24  
v měřítku 40 : 1



Varianta A

Varianta B

Obr.č. 11

Označení řezů šroubů a matic.

|                 |                                                                   |                    |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------|
| VŠSE Liberec    | Průběh napětí v závitovém spojení - metodou fotoelastocimetrickou | Katedra MCE        |
| Fakulta strojní |                                                                   | DP - ST - 681 / 69 |

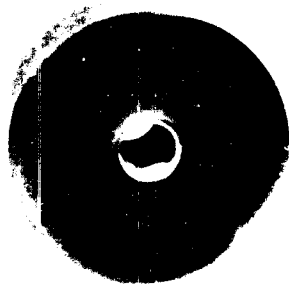
### 3. 2 Přehled naměřených výsledků fotoelastocimetrického měření.

Na následujících stránkách je uveden pro obě varianty ucelený přehled naměřených hodnot maximálního dvojzlomu, vypočtena příslušná napětí a zaznamenány údaje o tloušťkách do tabulek pro jednotlivé řezy.

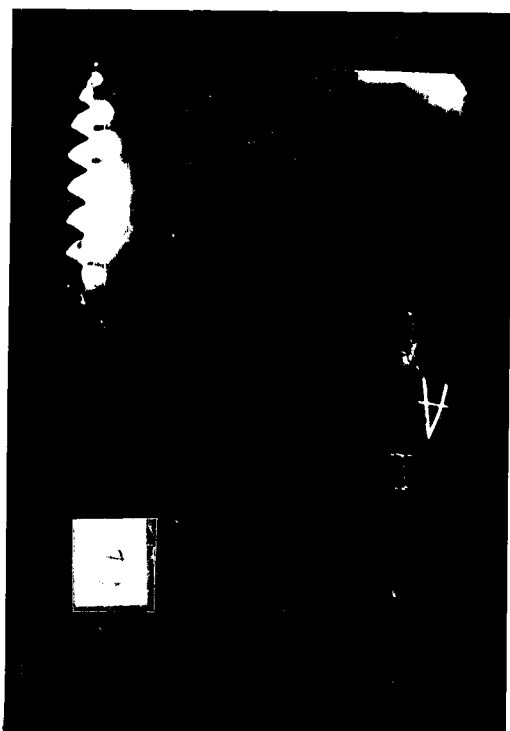
Obr. č. 31 je ukázkou přímého záznamu měření.

Každá stránka následujícího přehledu obsahuje, mimo již zmíněného tabelárního vyhodnocení, graf průběhu napětí a dvojici fotografií, z nichž levá fotografie ukazuje průběh izochromat v kruhově polarizovaném světle a pravá při polarizaci doplňkové.

Při vyhodnocování je užito této orientace číslování závitů: čísla matice začínají od prvního zatíženého závitu; a závity šroubu mají počátek číslování v přechodu závitového profilu do dřívku šroubu.



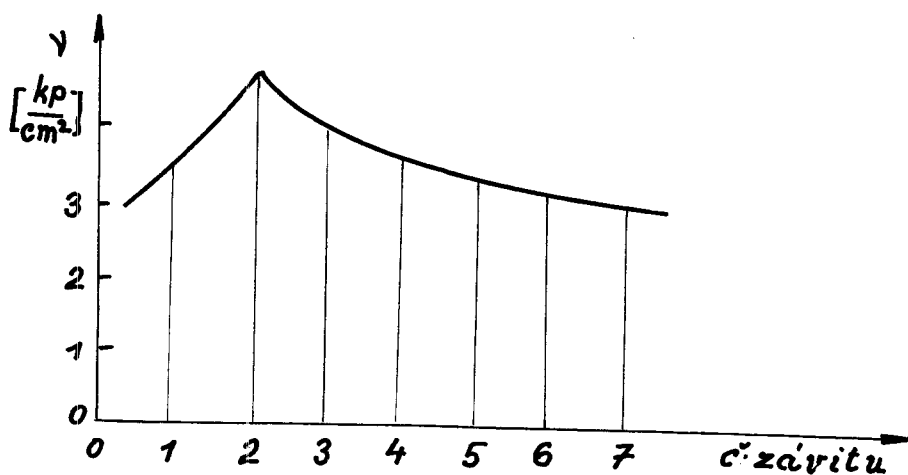
Obr.č. 11a  
Rozebrané závitové spojení  
před preparací vzorku.



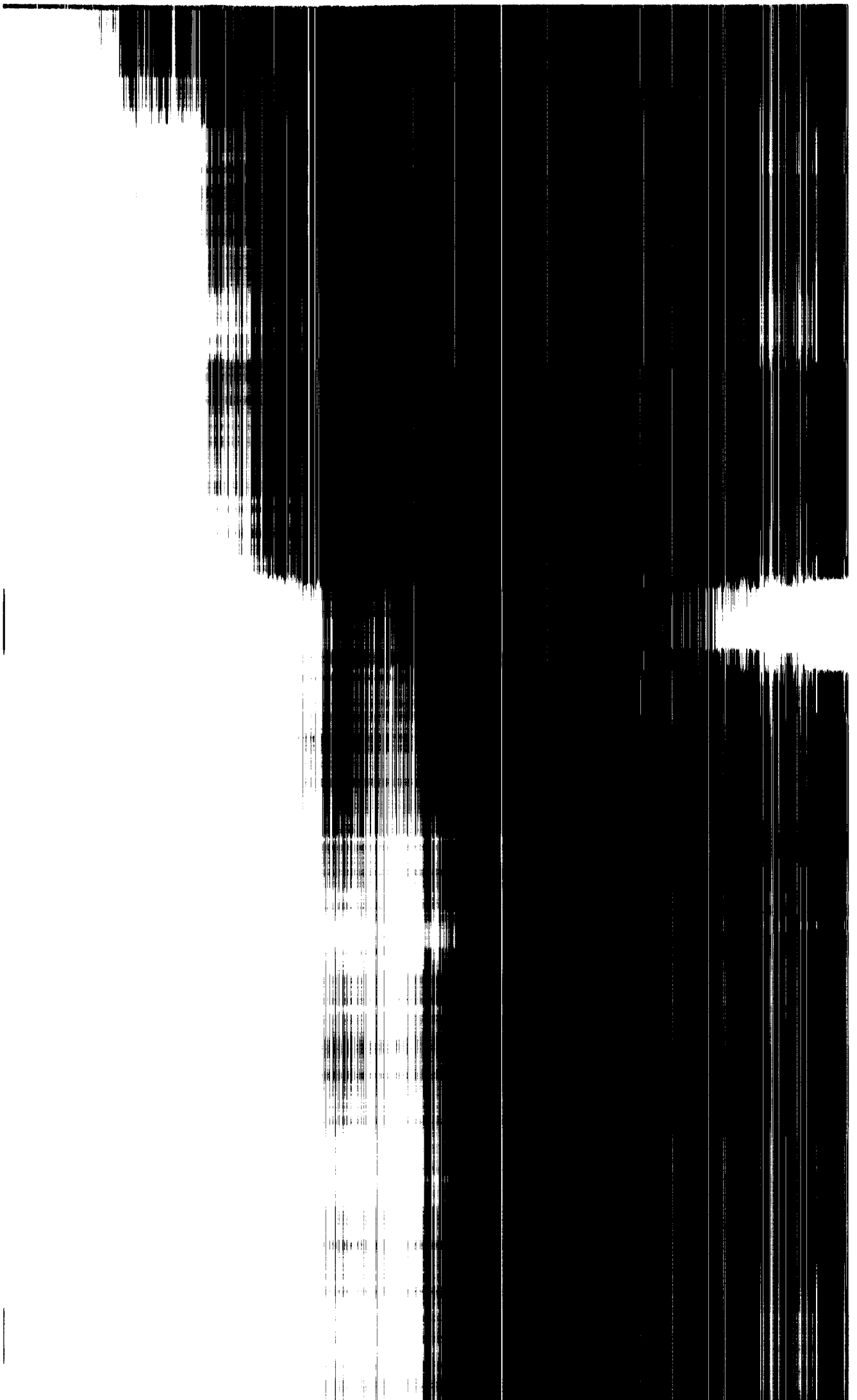
Obr.č.12a

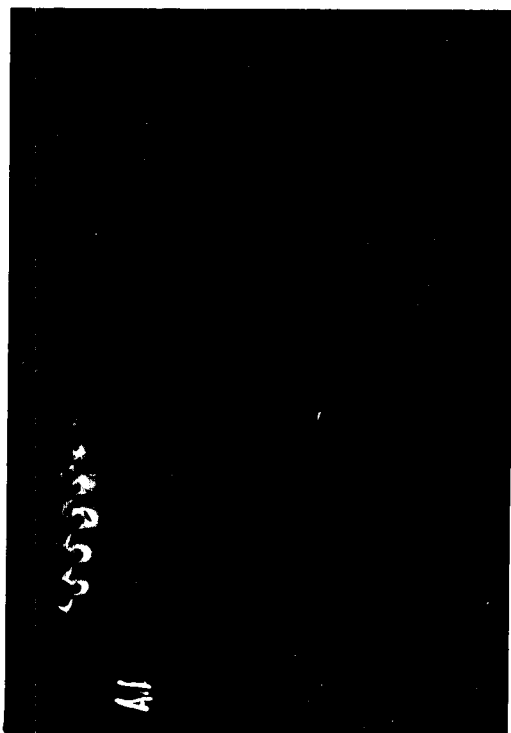


Obr.č.12b

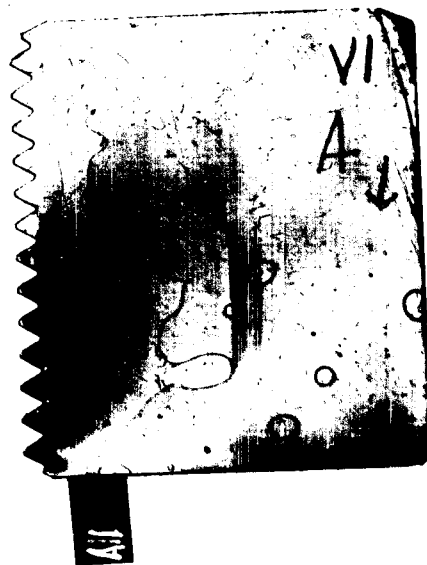


|                                                                                                           |      |     |      |      |      |     |     |   |   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|------|------|------|-----|-----|---|---|----|
| $\frac{K}{t} = 3,2$<br>VZOREK A I ; $\gamma = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}$ ; $K=0,4$ ; $t= 0,125$ |      |     |      |      |      |     |     |   |   |    |
| závit matice                                                                                              | 1    | 2   | 3    | 4    | 5    | 6   | 7   | 8 | 9 | 10 |
| řád m                                                                                                     | 1,1  | 1,5 | 1,1  | 1,1  | 1,1  | 1   | 0,9 | - | - | -  |
| $\gamma$                                                                                                  | 3,52 | 4,8 | 3,52 | 3,52 | 3,52 | 3,2 | 3   | - | - | -  |

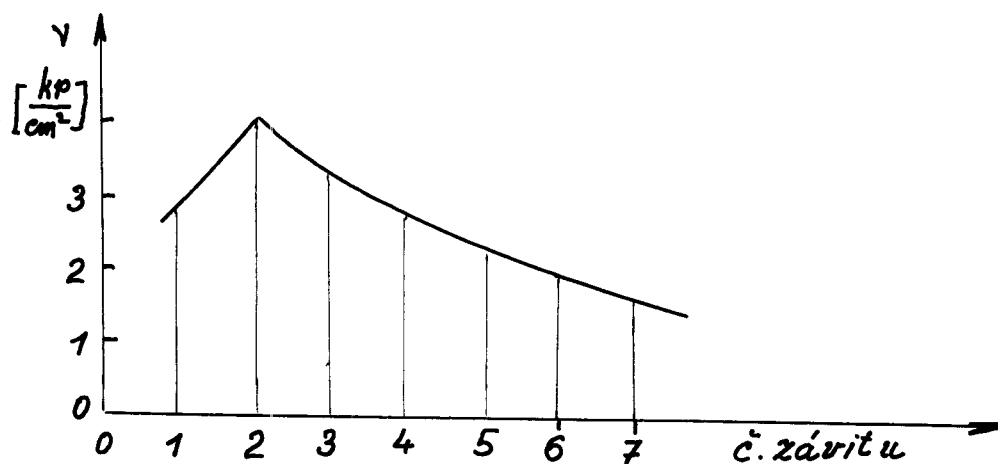




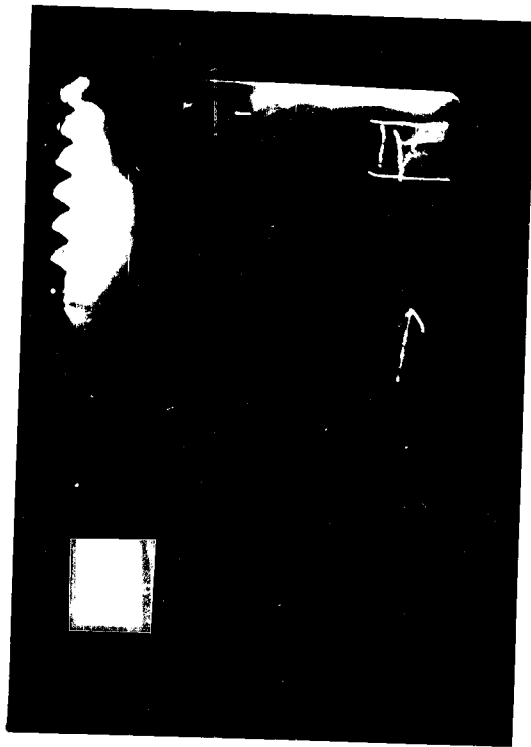
Obr.č.13a



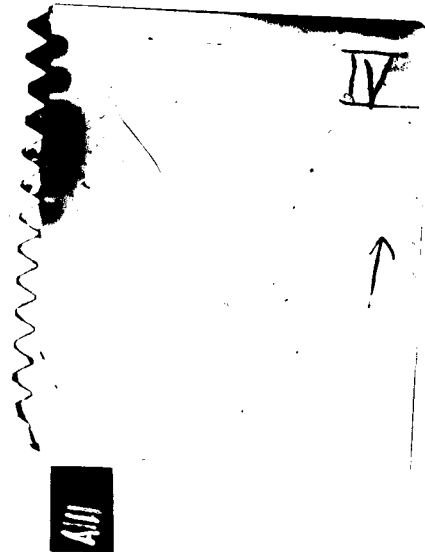
Obr.č.13b



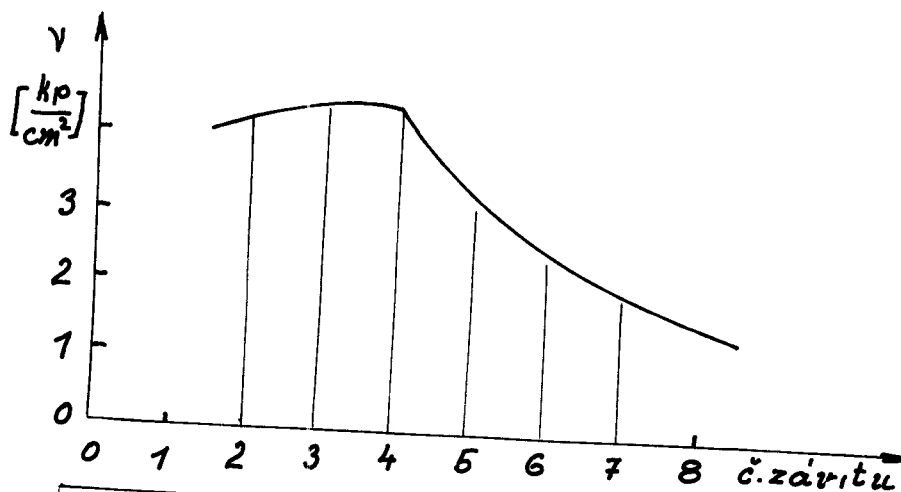
|                                                                                                    |     |     |     |     |     |     |   |   |   |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|---|----|
| VZOREK A II; $\nu = \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}$ ; $\frac{K}{t} = 2,28$<br>$K = 0,4$ ; $t = 0,175$ |     |     |     |     |     |     |   |   |   |    |
| závit<br>matice                                                                                    | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7 | 8 | 9 | 10 |
| řád m                                                                                              | 125 | 176 | 142 | 125 | 105 | 0,9 | - | - | - | -  |
| $\gamma$                                                                                           | 285 | 401 | 324 | 285 | 232 | 2   | - | - | - | -  |



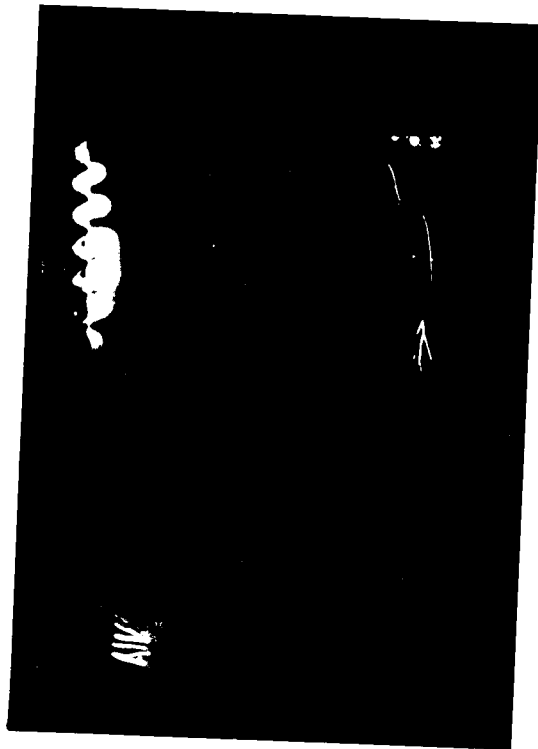
Obr.č.14a



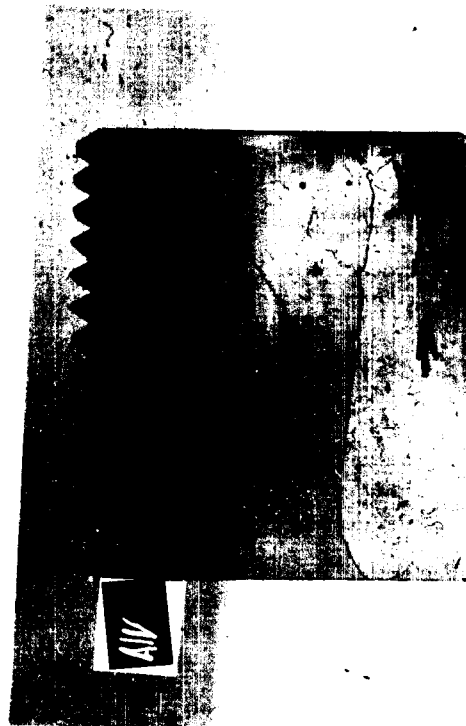
Obr.č.14b



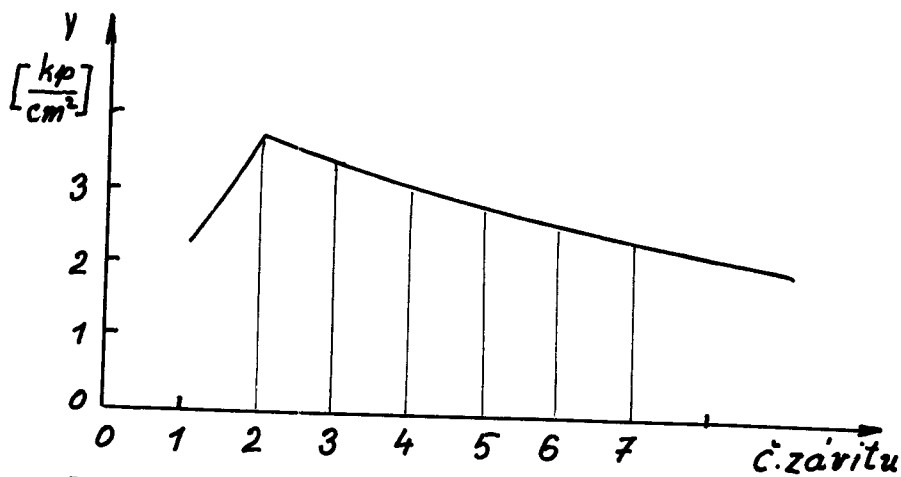
| $VZOREK AIII; v = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}; \quad \frac{K}{t} = 2,96$<br>$K = 0,4; t = 0,135 cm$ |   |     |     |     |     |        |   |   |   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-----|-----|-----|-----|--------|---|---|---|----|
| závit<br>matice                                                                                             | 1 | 2   | 3   | 4   | 5   | 6      | 7 | 8 | 9 | 10 |
| řád m                                                                                                       | - | 142 | 148 | 148 | 1,1 | 0,80,7 | - | - | - | -  |
| v                                                                                                           | - | 42  | 438 | 438 | 326 | 237    | 2 | - | - | -  |



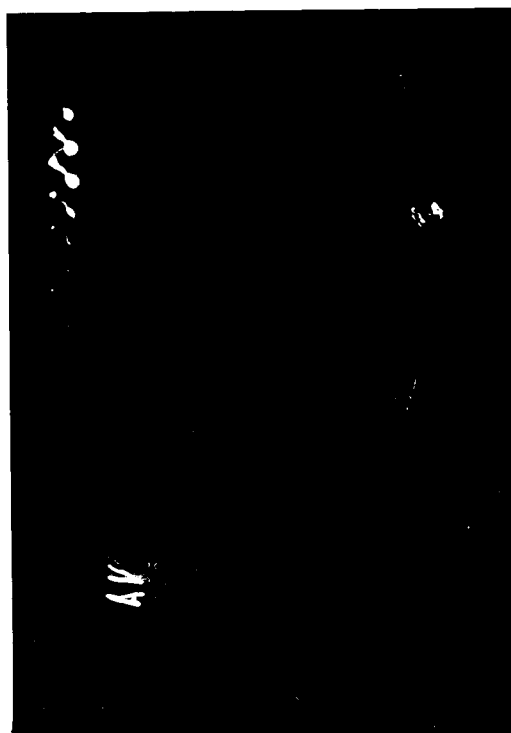
Obr.č.15a



Obr.č.15b



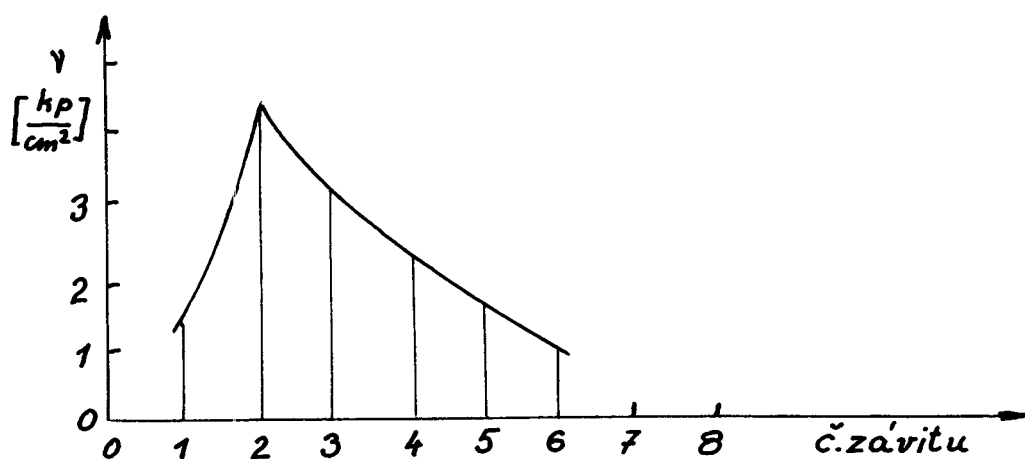
|                                                                                                           |   |      |      |     |     |     |      |     |   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|------|------|-----|-----|-----|------|-----|---|----|
| VZOREK A IV: $\psi = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp_2}{cm^2}$ ; $\frac{K}{t} = 2,9$<br>$K=0,4$ ; $t=0,13cm$ |   |      |      |     |     |     |      |     |   |    |
| závit<br>matice                                                                                           | 1 | 2    | 3    | 4   | 5   | 6   | 7    | 8   | 9 | 10 |
| řád m                                                                                                     | - | 1,28 | 1,22 | 1,1 | 1   | 0,9 | 0,85 | 0,5 | - | -  |
| $\psi$                                                                                                    | - | 3,71 | 3,54 | 3,1 | 2,9 | 2,6 | 2,5  | 1,5 | - | -  |



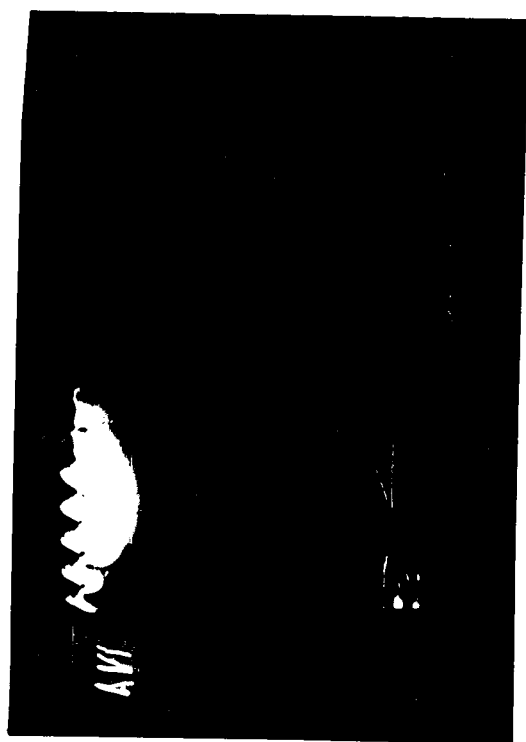
Obr.č.16a



Obr.č.16b



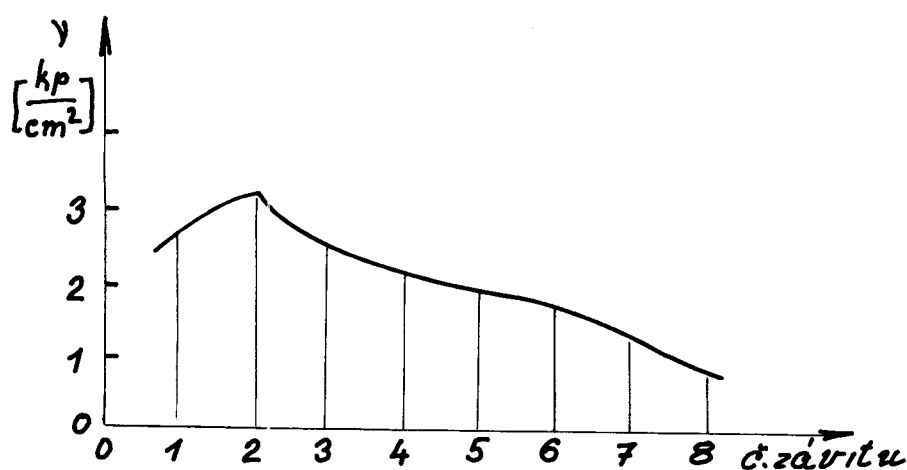
|                                                                                                                     |     |      |      |      |     |      |   |   |   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|------|------|-----|------|---|---|---|----|
| VZOREK A V; $\gamma = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}$ ; $\frac{K}{t} = 4,35$<br>$K=0,4$ ; $t=0,092 \text{ cm}$ |     |      |      |      |     |      |   |   |   |    |
| závit<br>matice                                                                                                     | 1   | 2    | 3    | 4    | 5   | 6    | 7 | 8 | 9 | 10 |
| řád m                                                                                                               | 0,3 | 1    | 0,75 | 0,55 | 0,3 | 0,2  | - | - | - | -  |
| $\gamma$                                                                                                            | 1,3 | 4,35 | 3,1  | 2,39 | 1,3 | 0,87 | - | - | - | -  |



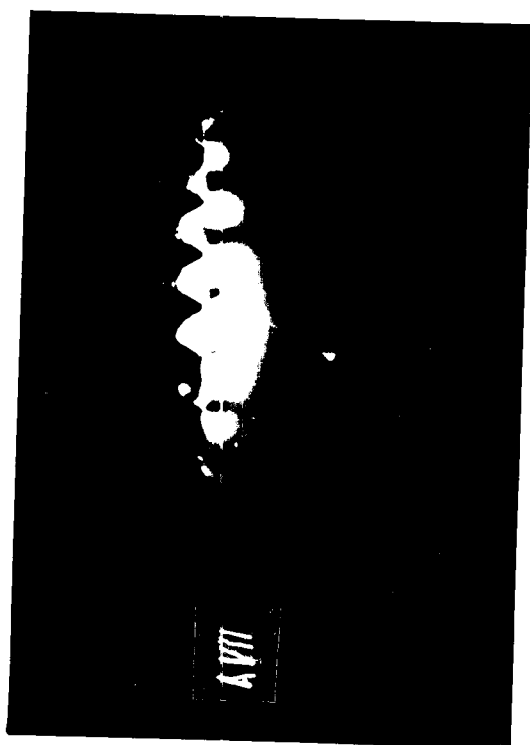
Obr.č.17a



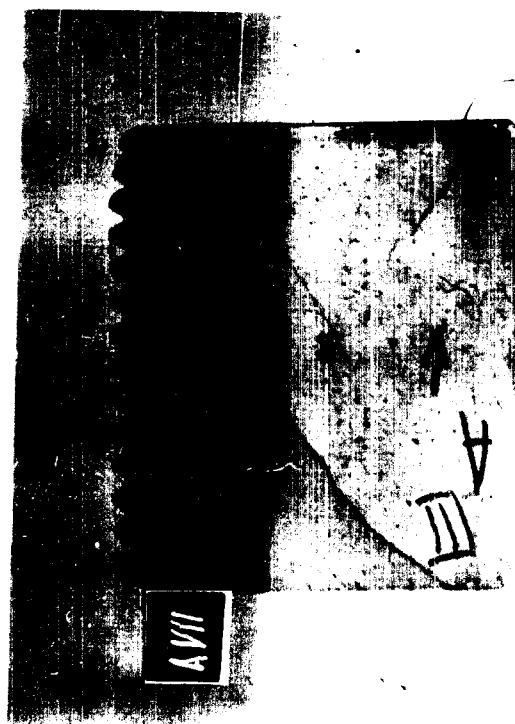
Obr.č.17b



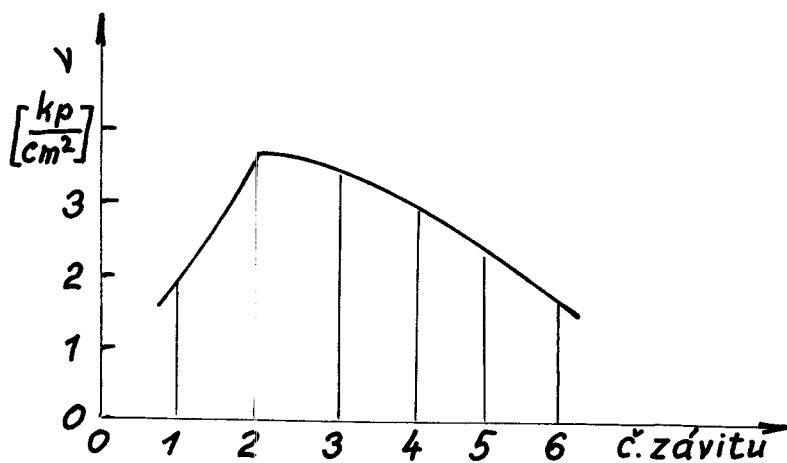
| VZOREK A VI; $\nu = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}$ ; $\frac{K}{t} = 2,02$<br>$K=0,4$ ; $t=0,198cm$ |     |     |     |     |     |     |     |     |   |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|----|
| závit<br>matice                                                                                          | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9 | 10 |
| řád m                                                                                                    | 138 | 154 | 125 | 105 | 1   | 09  | 06  | 01  | - | -  |
| $\nu$                                                                                                    | 279 | 311 | 252 | 212 | 202 | 181 | 121 | 0,2 | - | -  |



Obr.č.18a

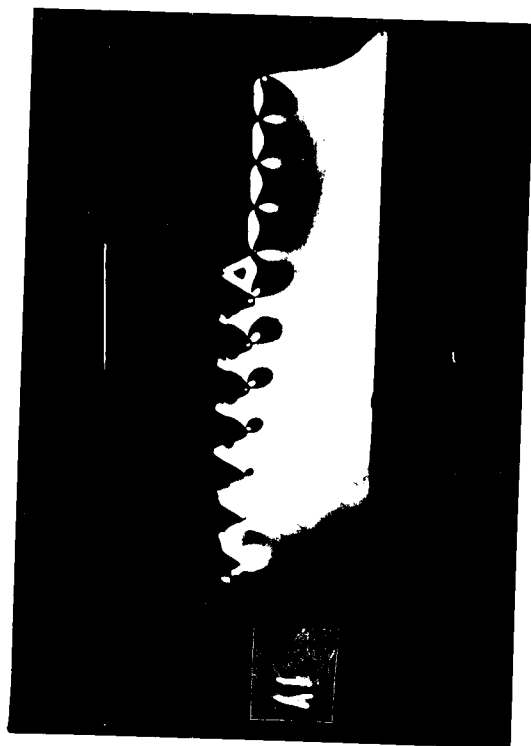


Obr.č.18b



VZOREK A VII;  $v = m \cdot \frac{K}{t} \cdot \frac{kp}{cm^2}$ ;  $\frac{K}{t} = 3$   
 $K = 0,4$ ;  $t = 0,1333 \text{ cm}$

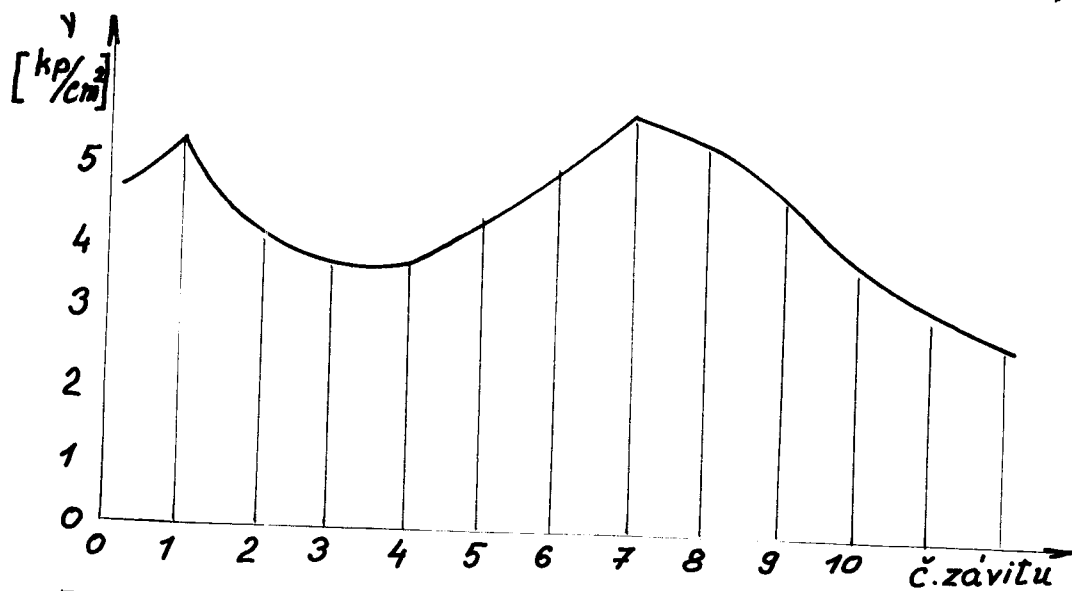
| závit matice | 1  | 2   | 3  | 4 | 5  | 6  | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------|----|-----|----|---|----|----|---|---|---|----|
| řád m        | 06 | 124 | 12 | 1 | 08 | 02 | - | - | - | -  |
| v            | 18 | 372 | 36 | 3 | 24 | 06 | - | - | - | -  |



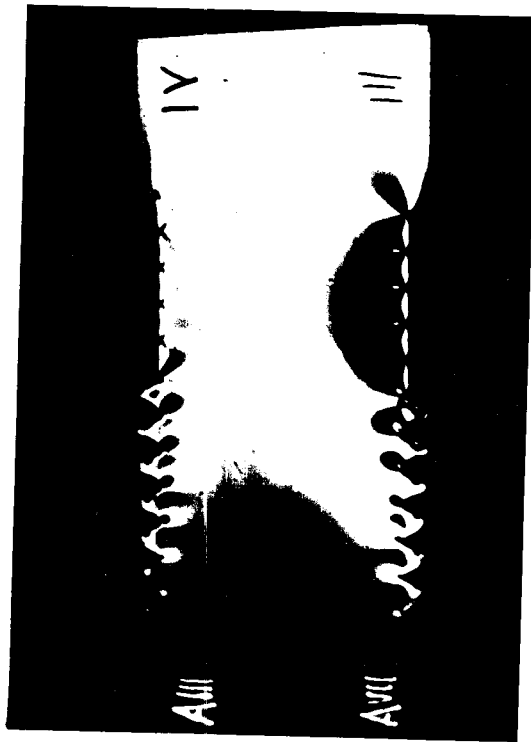
Obr.č.19a



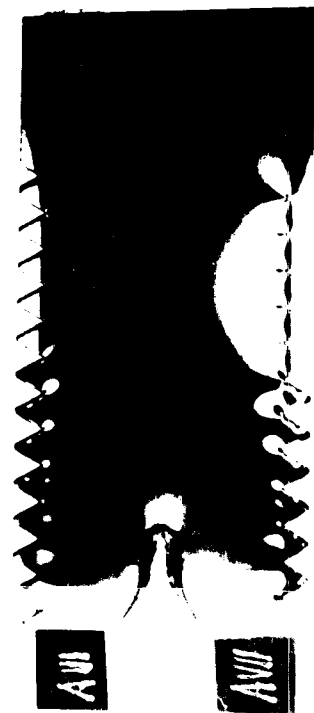
Obr.č.19b



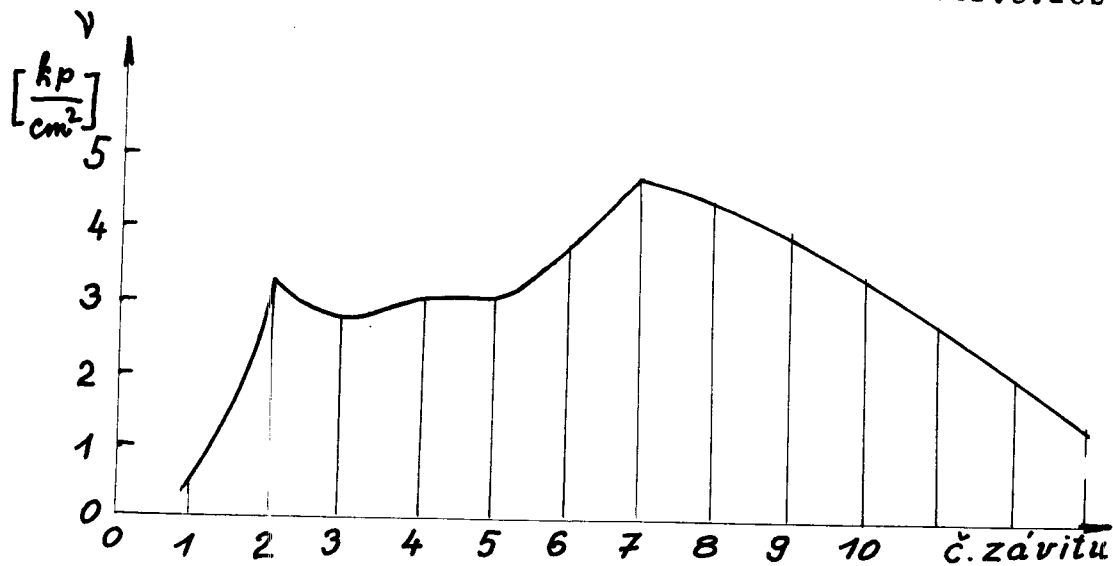
| VZOREK A I ; $\nu = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}$ ; $\frac{K}{t} = 2,4$<br>$K = 0,4$ ; $t = 0,167 \text{ cm}$ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| závit<br>šroubu                                                                                                      | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13 |
| řád m                                                                                                                | 22  | 16  | 152 | 152 | 18  | 225 | 238 | 225 | 211 | 128 | 12  | 12  | -  |
| $\nu$                                                                                                                | 528 | 384 | 365 | 365 | 432 | 54  | 57  | 54  | 507 | 307 | 288 | 288 | -  |



Obr.č.20a



Obr.č.20b



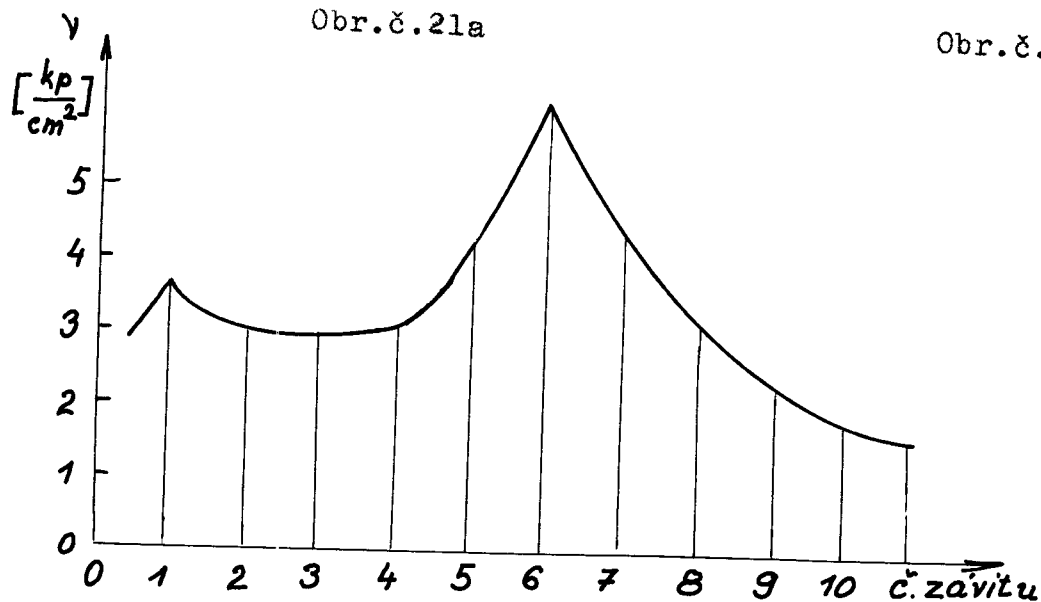
| VZOREK A III; $\nu = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}$ ; $\frac{K}{t} = 2,2$<br>$K=0,4$ ; $t=0,182 \text{ cm}$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| závit<br>šroubu                                                                                                   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   |
| řád m                                                                                                             | 0,22 | 1,47 | 1,23 | 1,35 | 1,34 | 1,75 | 2,15 | 1,97 | 1,8  | 1,47 | 1,25 | 0,9  | 0,6  |
| $\nu$                                                                                                             | 0,44 | 3,23 | 2,7  | 2,97 | 2,95 | 3,85 | 4,73 | 4,33 | 3,96 | 3,23 | 2,75 | 1,98 | 1,32 |



Obr.č.21a

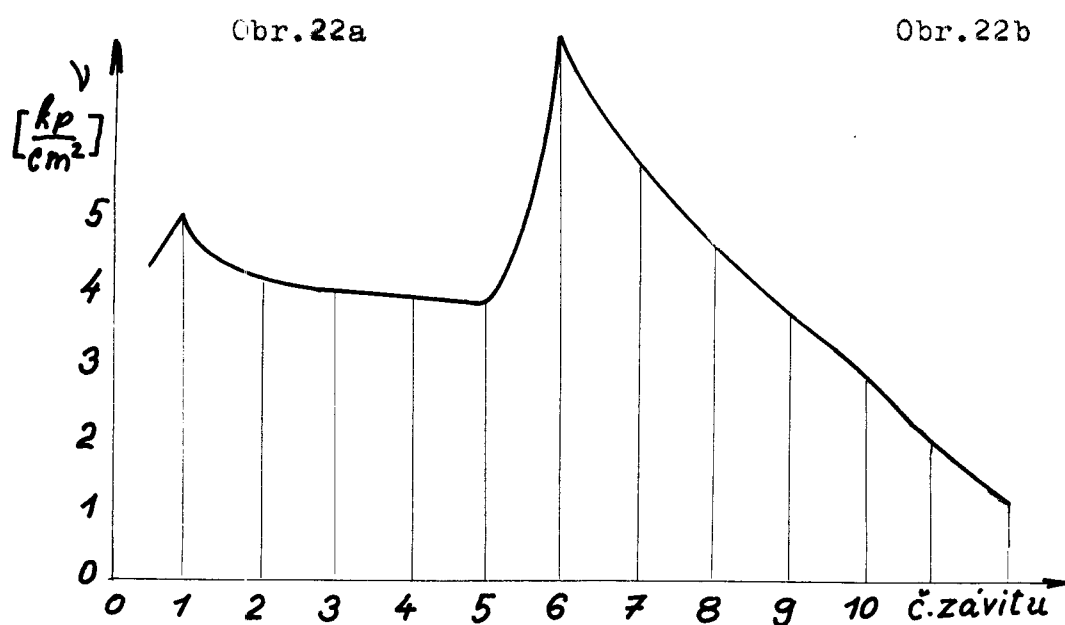


Obr.č.21b

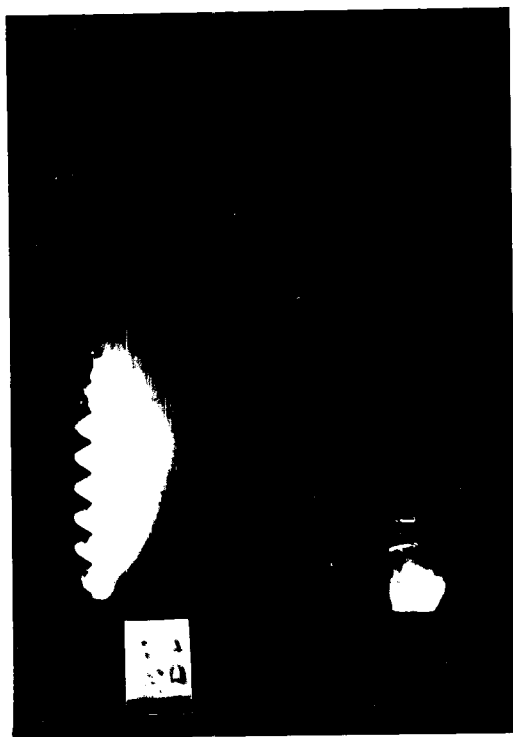


| VZOREK A V; $\nu = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}$ ; $K=0,4$ ; $t=0,178 \text{ cm}$ $\frac{K}{t} = 2,25$ |     |     |     |     |    |     |    |     |     |    |     |    |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|----|-----|----|----|
| závit<br>šroubu                                                                                               | 1   | 2   | 3   | 4   | 5  | 6   | 7  | 8   | 9   | 10 | 11  | 12 | 13 |
| řád m                                                                                                         | 15  | 135 | 136 | 138 | 2  | 274 | 2  | 125 | 11  | 08 | 081 | -  | -  |
| $\gamma$                                                                                                      | 337 | 303 | 306 | 31  | 45 | 616 | 45 | 281 | 247 | 18 | 182 | -  | -  |

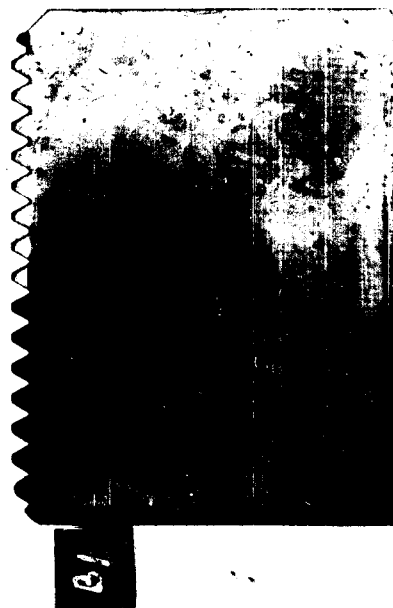
Obrázek č. 22a a 22b je vyjádřen pravou stranou  
obrázku č. 20a a 20b.



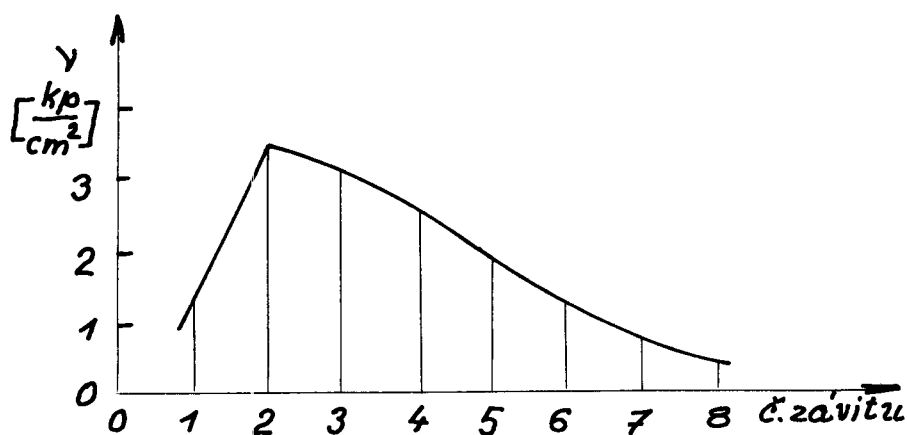
| VZOREK A VII; $\nu = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}$ ; $\frac{K}{t} = 2,19$<br>$K=0,4$ ; $t=0,183 \text{ cm}$ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|
| závit<br>šroubu                                                                                                    | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11 | 12  | 13 |
| řád m                                                                                                              | 23  | 185 | 185 | 178 | 178 | 35  | 265 | 225 | 17  | 13  | 08 | 05  | -  |
| $\nu$                                                                                                              | 503 | 405 | 405 | 39  | 39  | 766 | 58  | 493 | 372 | 285 | 17 | 112 | -  |



Obr.č.23a



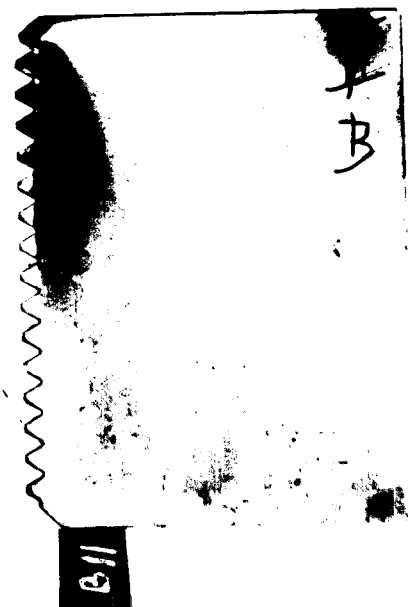
Obr.č.23b



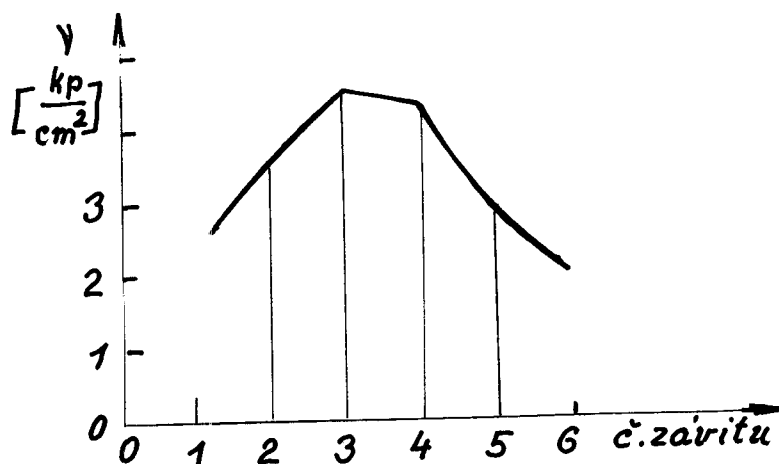
|                                                                                                       |      |      |     |      |      |      |     |     |   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|-----|------|------|------|-----|-----|---|----|
| VZOREK B I; $v = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}$ ; $\frac{K}{t} = 1,9$<br>$K=0,4$ ; $t=0,211$ cm |      |      |     |      |      |      |     |     |   |    |
| závit<br>matice                                                                                       | 1    | 2    | 3   | 4    | 5    | 6    | 7   | 8   | 9 | 10 |
| řád n                                                                                                 | 0,7  | 1,75 | 1,6 | 1,31 | 0,95 | 0,6  | 0,3 | 0,1 | - | -  |
| γ                                                                                                     | 1,36 | 3,4  | 3,1 | 2,5  | 1,9  | 1,14 | 0,6 | 0,2 | - | -  |



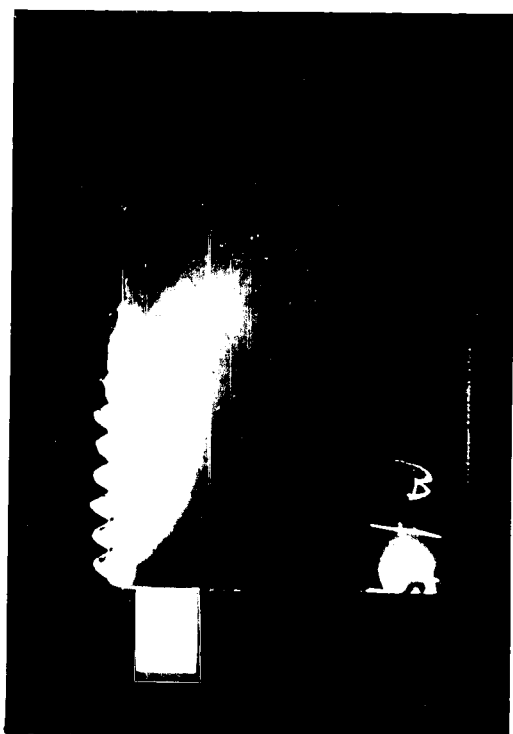
Obr.č.24 a



Obr.č.24b



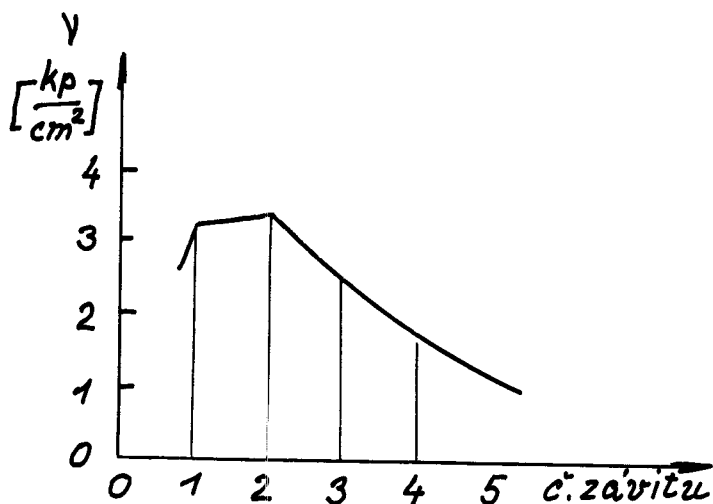
|                                                                                    |    |     |     |     |     |     |    |   |    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|---|----|----|
| VZOREK B II; $\gamma = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}$ ; $\frac{K}{t} = 2,06$ |    |     |     |     |     |     |    |   |    |    |
| $K=0,4$ ; $t=0,194 \text{ cm}$                                                     |    |     |     |     |     |     |    |   |    |    |
| závit<br>matice                                                                    | 2  | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8  | 9 | 10 | 11 |
| řád m                                                                              | 17 | 22  | 21  | 13  | 1   | 04  | 01 | - | -  | -  |
| $\gamma$                                                                           | 35 | 453 | 433 | 268 | 206 | 082 | 02 | - | -  | -  |



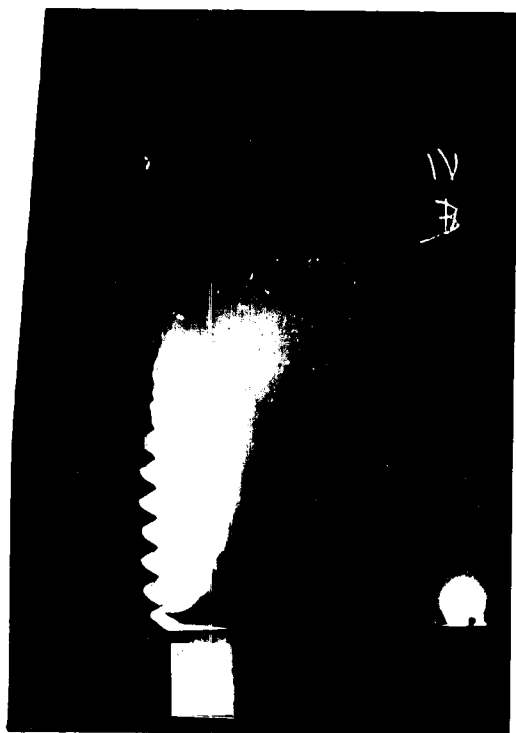
Obr.č.25a



Obr.č.25b



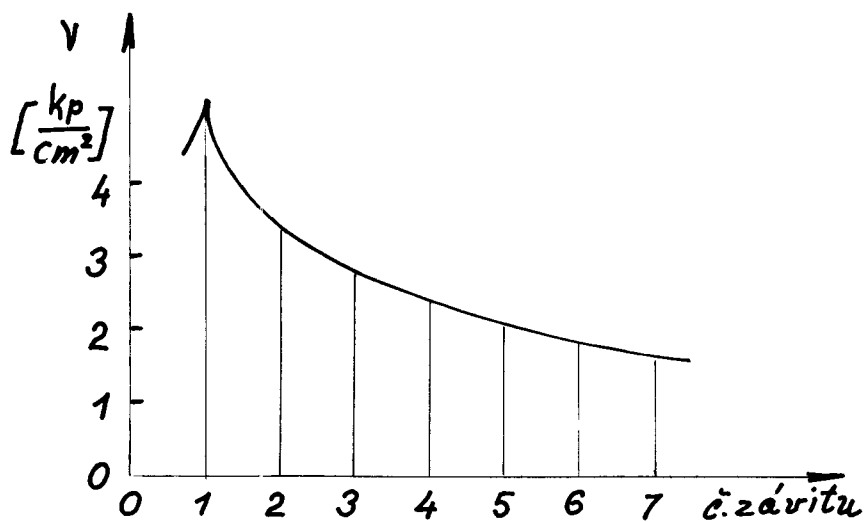
| VZOREK B III; $\gamma = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}$ ; $\frac{K}{t} = 2,03$<br>$K=0,4$ ; $t=0,197$ cm |     |     |     |     |    |    |   |   |   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|----|----|---|---|---|----|
| závit<br>matice                                                                                               | 1   | 2   | 3   | 4   | 5  | 6  | 7 | 8 | 9 | 10 |
| řád m                                                                                                         | 161 | 162 | 129 | 08  | 07 | 06 | - | - | - | -  |
| $\gamma$                                                                                                      | 326 | 336 | 261 | 162 | 15 | -  | - | - | - | -  |



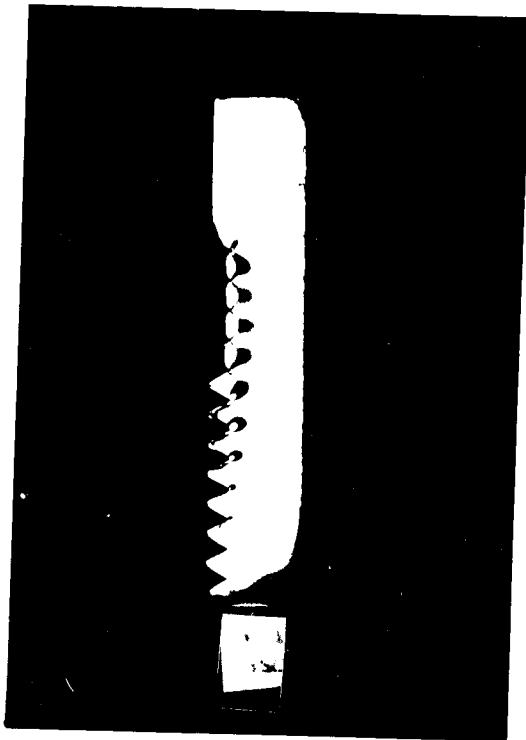
Obr.č.26a



Obr.č.26b



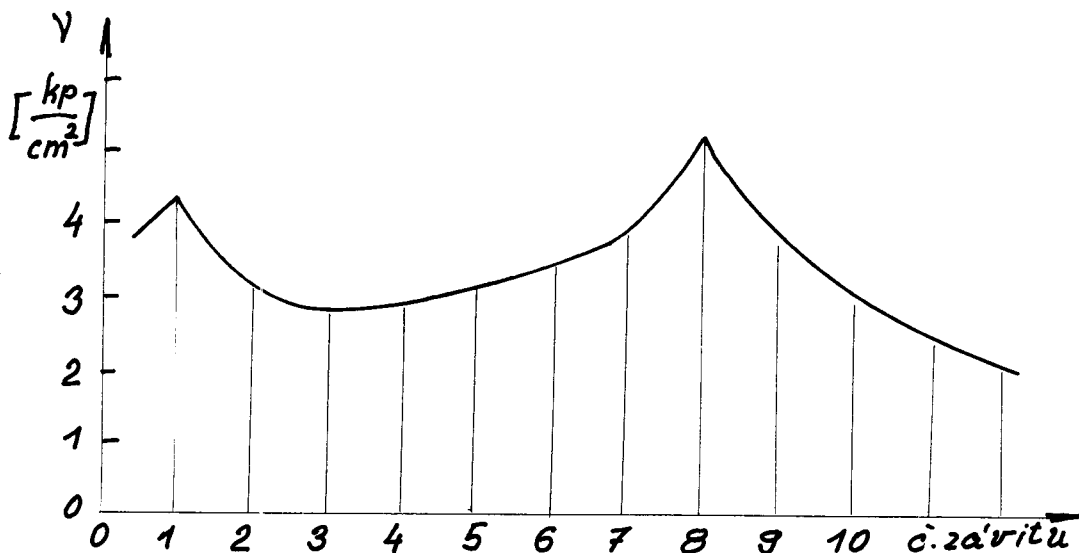
| VZOREK B IV; $\nu = m. \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}; K=0,4; t=0,199 \text{ cm}$ <span style="float: right;"><math>\frac{K}{t} = 2,01</math></span> |      |     |     |     |     |    |   |   |   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|----|---|---|---|----|
| závit matice                                                                                                                                      | 1    | 2   | 3   | 4   | 5   | 6  | 7 | 8 | 9 | 10 |
| řád n                                                                                                                                             | 26   | 162 | 156 | 122 | 1   | 08 | - | - | - | -  |
| $\nu$                                                                                                                                             | 5,23 | 325 | 315 | 245 | 201 | 16 | - | - | - | -  |



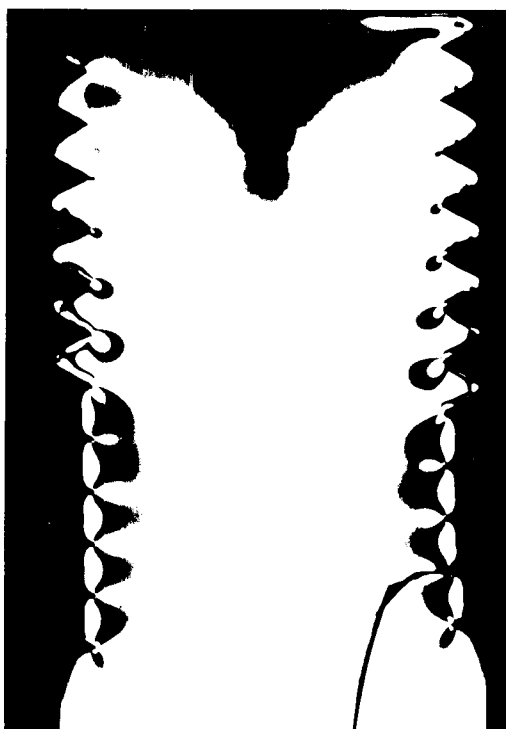
Obr.č.27a



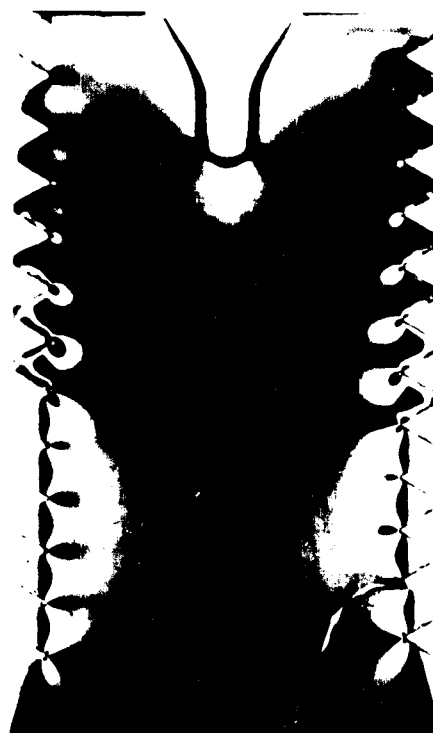
Obr.č.27b



| VZOREK BI; $\nu = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp_2}{cm}$ ; $\frac{K}{t} = 1,9$<br>K=0,4 ; t= 0,211 cm |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |     |    |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|----|
| závit šroubu                                                                                        | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9  | 10  | 11  | 12 | 13 |
| řád m                                                                                               | 226 | 162 | 143 | 156 | 158 | 182 | 19  | 272 | 2  | 159 | 124 | 09 | -  |
| $\gamma$                                                                                            | 428 | 307 | 269 | 296 | 3   | 346 | 361 | 516 | 38 | 301 | 235 | 17 | -  |

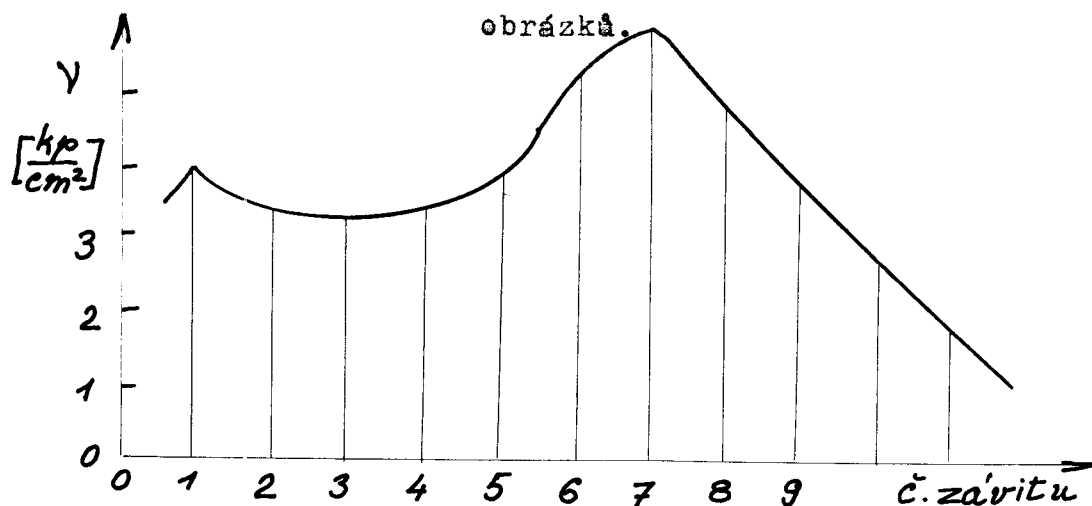


Obr.č.28 a

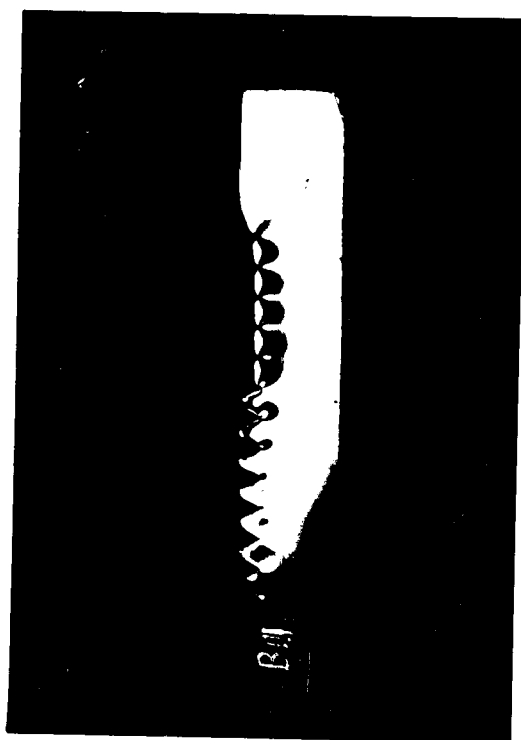


Obr.č.28 b

Graf a tabulka se vztahují k levé straně obou  
obrázků.



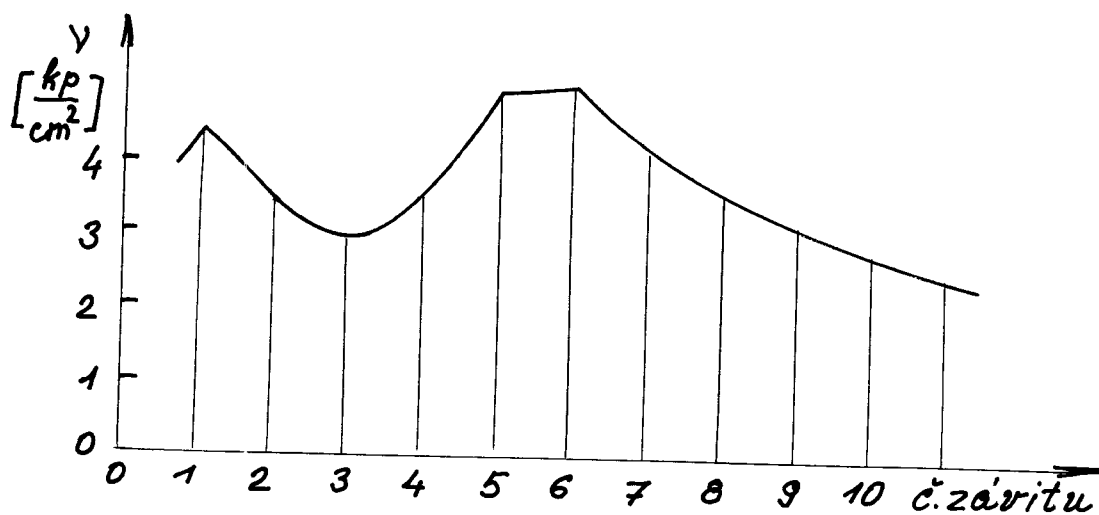
| VZOREK B II; $\gamma = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}$ ; $K=0,4$ ; $t=0,2 \text{ cm}$ $\frac{K}{t} = 2$ |   |     |      |      |      |     |   |     |   |      |      |     |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-----|------|------|------|-----|---|-----|---|------|------|-----|----|
| závit<br>šroubu                                                                                              | 1 | 2   | 3    | 4    | 5    | 6   | 7 | 8   | 9 | 10   | 11   | 12  | 13 |
| řád m                                                                                                        | 2 | 1,7 | 1,72 | 1,82 | 1,78 | 2,7 | 3 | 2,7 | 2 | 1,35 | 0,95 | 0,2 | -  |
| $\gamma$                                                                                                     | 4 | 3,4 | 3,44 | 3,64 | 3,56 | 5,4 | 6 | 5,4 | 4 | 2,7  | 1,9  | 0,4 | -  |



Obr.č.29 a



Obr.č.29 b

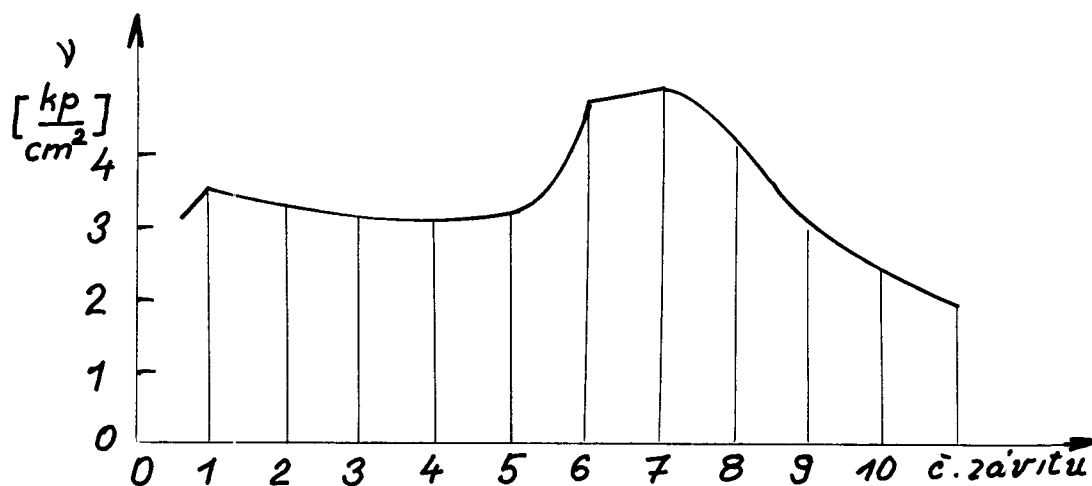


| VZOREK B III; $\nu = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp}{cm^2}$ ; $K=0,4$ ; $t=0,19 \text{ cm}$ $\frac{K}{t} = 2,1$ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| závit<br>šroubu                                                                                               | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13 |
| řád m                                                                                                         | 21  | 175 | 145 | 168 | 237 | 238 | 23  | 205 | 16  | 122 | 152 | 13  | -  |
| $\nu$                                                                                                         | 442 | 368 | 305 | 354 | 5   | 501 | 434 | 432 | 337 | 257 | 318 | 274 | -  |

Obrázek 30a a 30b je vyjádřen pravou  
stranou obrázku 28a a 28b.

Obr.č.30 a

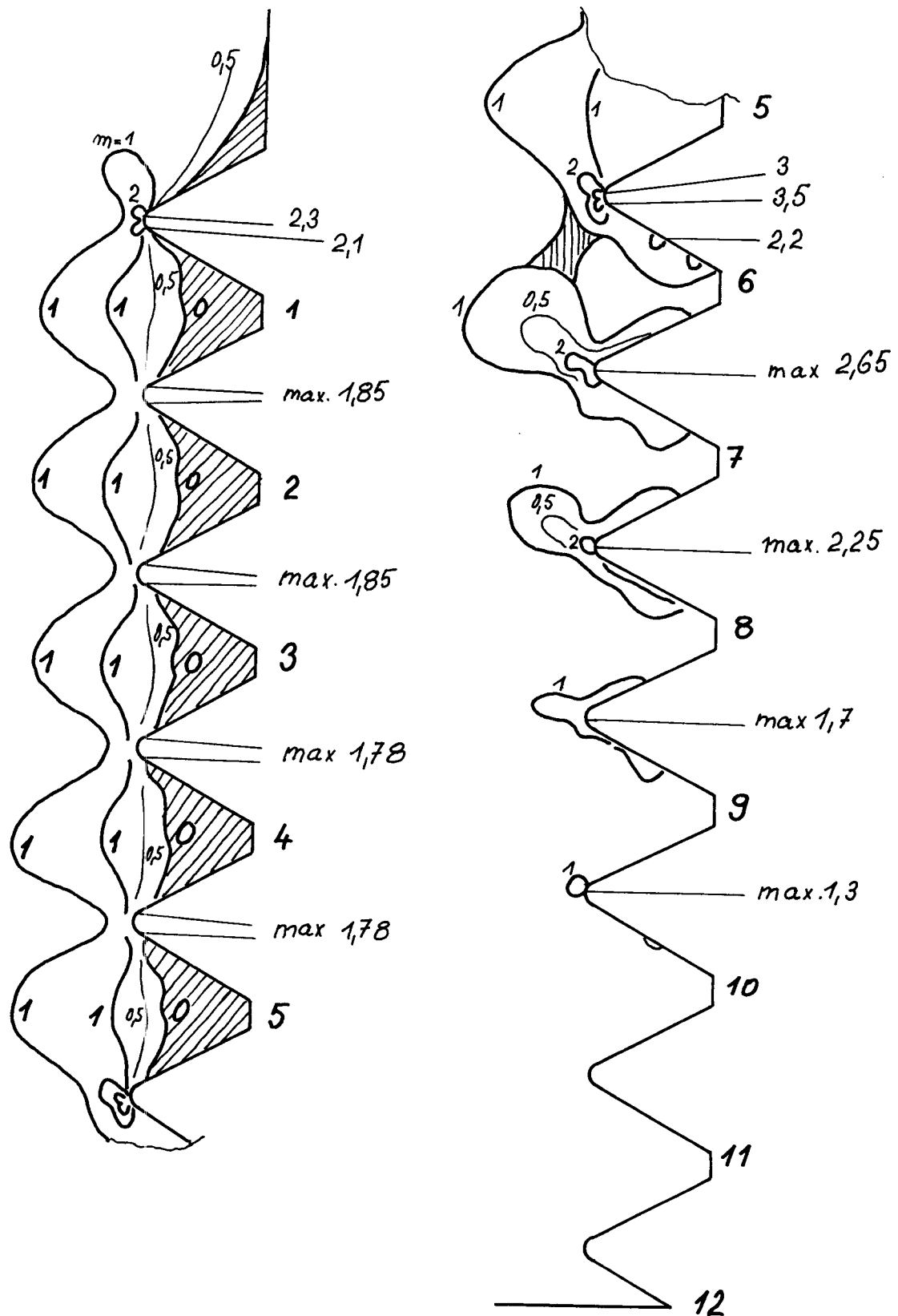
Obr.č.30b



| VZOREK B IV; $\gamma = m \cdot \frac{K}{t} \frac{kp_2}{cm^2}$ ; $\frac{K}{t} = 2,02$<br>$K=0,4, t=0,98$ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| závit<br>šroubu                                                                                         | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  |
| řád                                                                                                     | 175 | 162 | 167 | 16  | 15  | 232 | 235 | 21  | 132 | 12  | 1   |
| $\gamma$                                                                                                | 353 | 337 | 339 | 323 | 303 | 47  | 485 | 425 | 267 | 242 | 202 |

|                 |                                                                 |                    |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji . metodou fotoelasticimetrickou | Katedra KOE        |
| Fakulta strojní |                                                                 | DP / ST - 687 / 69 |

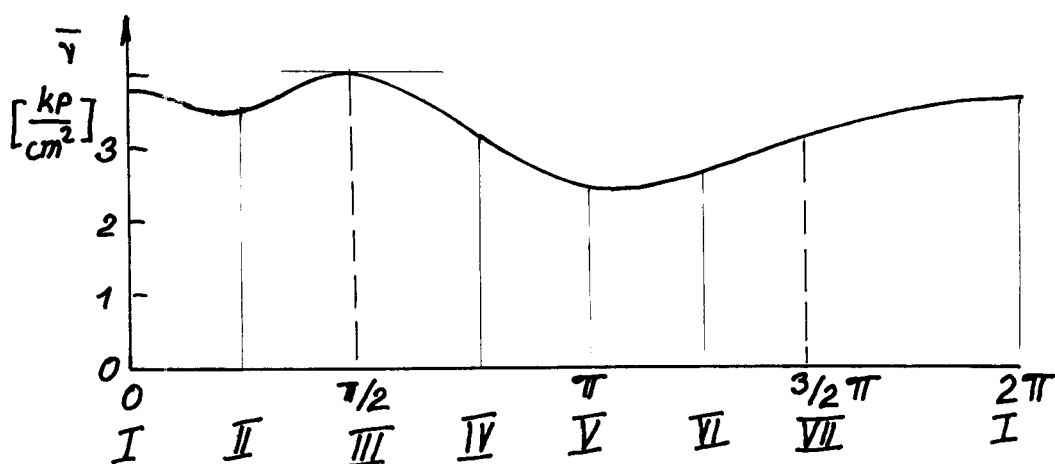
Obr.č. 31  
Průběh izochromat v řezu A VII šroubu



|                 |                                                                 |                    |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou fotoelasticimetrickou | Katedra KOE        |
| Fakulta strojní |                                                                 | DP - ST - 687 / 69 |

### 3. 3 Vyhodnocení výsledků měření.

Na obr.č. 32 je zachycen průběh napěťových průměrů řezů po obvodu matice A. Tento graf určuje dva, na sebe kolmé řezy, ve kterých se objevilo maximum nebo minimum napětí. Ve směrech těchto řezů rozřezané šrouby porovnáváme v tabulce č.6. Grafickým vyjádřením hodnot uvedených v tabulce č.6 je obr.č.33.

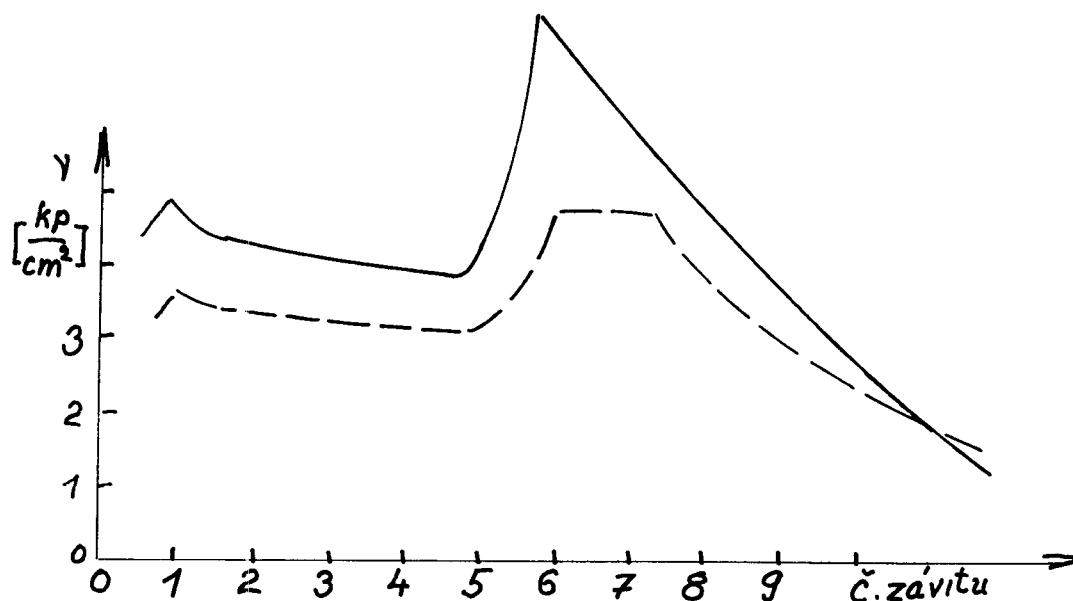


Obr.č. 32

| závit č.     | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| šroub A VII  | 503 | 405 | 405 | 39  | 39  | 766 | 58  | 493 | 372 | 285 |
| šroub B IV   | 353 | 337 | 339 | 323 | 303 | 47  | 485 | 425 | 267 | 242 |
| rozdíl A - B | 15  | 068 | 066 | 067 | 087 | 206 | 095 | 068 | 105 | 043 |

Tabulka č.6

|                 |                                                               |                    |
|-----------------|---------------------------------------------------------------|--------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji . metodou fotoelastimetrickou | Katedra KGE        |
| Fakulta strojní |                                                               | DP / ST - 687 / 63 |



Obr.č. 33

Tabulka č. 6 obsahuje vyhodnocení odpovídajících si řezů šroubů A a B. Z vyčíslených rozdílů a grafu č.33 plyne , že napětí A VII je větší než B IV, a to v průměru o  $1,045 \text{ kp/cm}^2$ . Porovnáme-li zbývající řezy šroubů stejným způsobem dostaneme:

Pro řezy AI, BI šroubů průměrný rozdíl  $1,029 \text{ kp/cm}^2$ .

Pro řezy AIII, BII šroubů průměrný rozdíl  $-0,913 \text{ kp/cm}^2$ .

Pro řezy A V, B III šroubů průměrný rozdíl  $-0,42 \text{ kp/cm}^2$ .

### 3 . 4 Závěry z měření týkající se závitových tolerancí.

Z grafu na obr.č.33 a z rozdílových hodnot uvedených v předcházejícím odstavci plyne, že závitové spojení s větší vůlí bude vykazovat větší koncentrace napětí, což je ve shodě s výsledky měření zaznamenanými pod obr.č. 22, na listu naměřených hodnot pro vzorek A VII šroubu.

|                 |                                                                 |                    |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou fotoelasticimetrickou | Katedra KOE        |
| Fakulta strojní |                                                                 | DP - ST - 687 / 69 |

#### 4. 0 Ekonomická úvaha o významu metody.

Fotoelasticimetrická metoda zjišťování napětí v závitovém spojení je jediná metoda, která dává vizuálně velmi názorný obraz o průběhu napětí v celém objemu šroubu i matice.

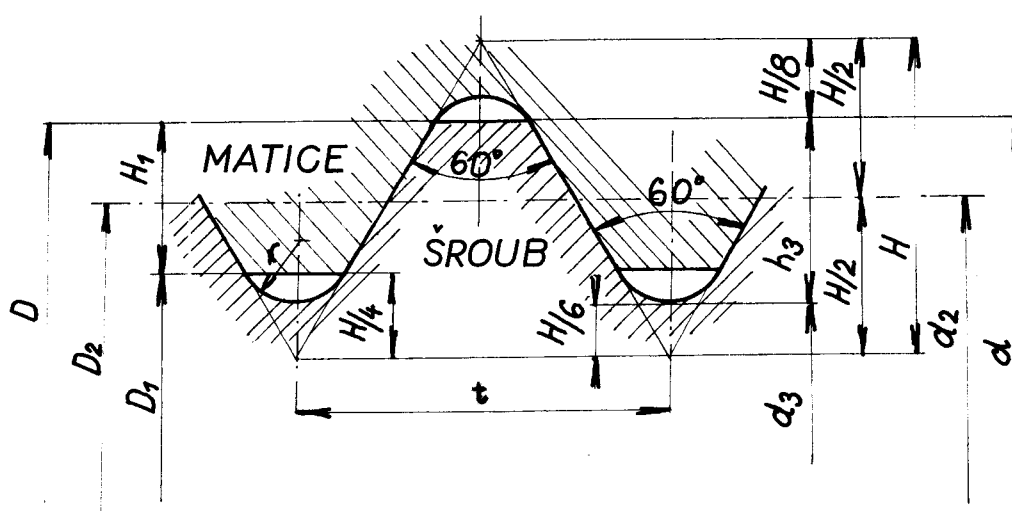
Výsledky poměrně velmi zjednodušených zkoušek ukázaly, že při větší vůli mezi šroubem a maticí bude větší napětí v exponovaných místech, aniž by se zvětšovala zatěžovací síla. Výsledky dobře patrné z grafu na obr. č. 33 případně v přehledu naměřených údajů. Touto metodou by při dostatečném množství vzorků bylo možno určit přesnější zákonitosti vlivu vůle na napětí ve šroubu. Jejich poznáním by bylo možné zpřesnit dosavadní způsob výpočtů pevnosti šroubového spoje, což by jistě znamenalo úsporu na materiálu, případně jeho lepší využití. Naproti tomu by vzrostly náklady na výrobu přesnějšího spojení. Důkladnější analýza užívaných závitových tolerancí, by jistě přispěla k ustálení závitových tolerancí, ke snížení počtu tolerančních polí.

|                                                  |                                           |                    |     |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------|-----|
| VŠST Liberec                                     | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou | Katedra            | KOE |
| Fakulta strojní                                  | fotoelasticimetrickou                     | DP - ST - 687 / 69 |     |
| Seznam příloh.                                   |                                           |                    |     |
| -----                                            |                                           |                    |     |
| Příloha č. 1 - Závitový profil ISO               |                                           |                    |     |
| Příloha č. 2a - detail šroubu                    |                                           |                    |     |
| Příloha č. 2b - detail matice                    |                                           |                    |     |
| Příloha č. 3 - zatěžovací zařízení               |                                           |                    |     |
| Příloha č. 4 - vzorkovnice                       |                                           |                    |     |
| Seznam použité literatury.                       |                                           |                    |     |
| DP - ST 439 / 66 Karel Radostný (1)              |                                           |                    |     |
| Ing. M. Milbauer - ing.M.Perla CSc:              |                                           |                    |     |
| Fotoelasticimetrické přístroje                   |                                           |                    |     |
| a měření metody, nakladatelství ČSAV,            |                                           |                    |     |
| Praha 1969 (2)                                   |                                           |                    |     |
| Fotoelasticimetrie a příklady jejího             |                                           |                    |     |
| použití; nakladatelství ČSAV, Praha 1961 (3)     |                                           |                    |     |
| Ing. M. Milbauer:                                |                                           |                    |     |
| Fotoelasticimetrie; SNTL Praha 1953 (4)          |                                           |                    |     |
| Prof. ing. Frant. Pospíšil:                      |                                           |                    |     |
| Závitová a šroubová spojení; SNTL Praha 1968 (5) |                                           |                    |     |
| Wiegand:                                         |                                           |                    |     |
| Berechnung von Schraubenverbindungen. (6)        |                                           |                    |     |
| Návrhy ISO pro závitové tolerance. (7)           |                                           |                    |     |
| - 58 -                                           |                                           |                    |     |

|                 |                                           |                    |
|-----------------|-------------------------------------------|--------------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém spoji - metodou | Katedra KOE        |
| Fakulta strojní | fotoelasticimetrickou                     | DP - ST - 687 / 69 |

Příloha č. 1

### ZÁVITOVÝ PROFIL ISO



$$H = 0,866 t$$

$$H_1 = 0,5412 t$$

$$\text{průměr } d = D$$

$$\text{stoupání } t$$

$$\text{střední } \phi d_2 = D_2$$

$$h_3 = 0,6134 t$$

$$r = \frac{H}{6} = 0,144 t$$

$$\text{malý průměr šroubu } d_3$$

$$\text{malý průměr matice } D_1$$

$$\text{mosná hloubka } H_1$$

Rozměry pro M 24 - H6 / g6

$$\phi d = 24 \begin{matrix} -0,048 \\ -0,423 \end{matrix}$$

$$\phi D_1 = 20,752 \begin{matrix} + 0,500 \\ + 0,000 \end{matrix}$$

$$\phi d_2 = 22,051 \begin{matrix} -0,048 \\ -0,248 \end{matrix}$$

$$\phi D_2 = 22,051 \begin{matrix} + 0,265 \\ + 0,000 \end{matrix}$$

$$\phi d_3 = 20,32$$

$$r \approx 0,43$$

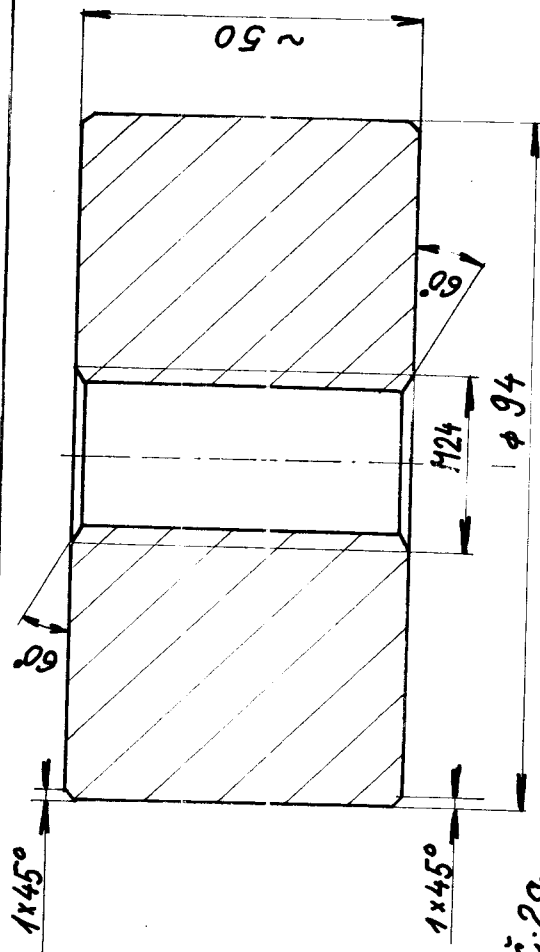
|                 |                                                                        |              |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------|--------------|
| VŠST Liberec    | Průběh napětí v závitovém<br>spej-<br>metodou<br>fotoelasticimetrickou | Katedra KOE  |
| Fakulta strojní |                                                                        | DP-ST-687/69 |

### ZÁVĚR

Závěrem bych chtěl poděkovat s. Prof. ing. J. Draskému CSc za poskytnutí některých materiálů a pomoc při organizačním zajištění výroby vzorků.

Převážná část přístrojů a zařízení, které jsem používal, jsou unikátní a vyrobená v HÚ ČSAV. Za velmi ochotné poskytnutí materiálů, přístrojů a zařízení, cenné rady a předání zkušeností jsem nesmírně zavázán všem pracovníkům fotoelasticimetrické laboratoře HÚ ČSAV v PRAZE.

V LIBERCI dne 10. července 1969



PRÍLOHA Č. 2a.

EPOXY 2521 2 DP-ST-687/69

EPOXY CHS 110

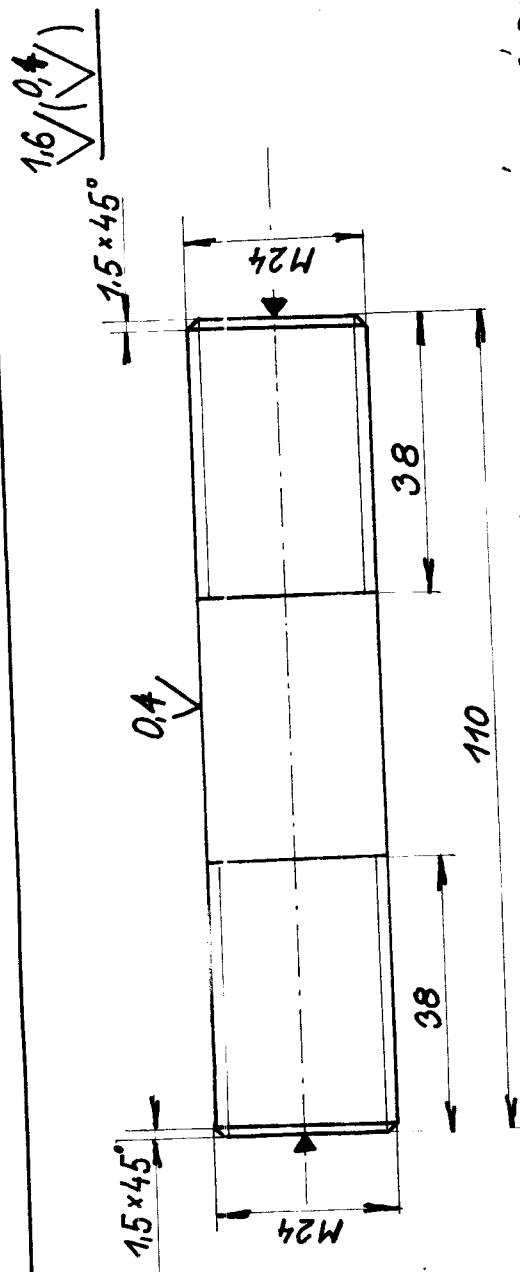
Barlik

1:1

VŠST

MATICE

DP-ST-687/69



PŘÍLOHA Č. 2b. ZÁVIT BROUSIT NA ZÁVITOVÉ BRUSCE

1 DP-ST-687/69

EPOXY 2521

EPOXY CHS110

BASTIK

1:1

VŠŠT

ŠROUB

DP-ST-687/69