

DIPLOMOVÝ ÚKOLpro **Rudolfa Kloučka**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: **Měření elasticity a plasticity vosků a voskových komposic.**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte literární rešerši o možnostech a způsobech měření plasticity a elasticity organických látek, zejména plastických hmot a vosků.
- 2) Kriticky zhodnoťte metody měření obou veličin se zaměřením na zjišťování plasticity a elasticity vosků a voskových komposic.
- 3) Navrhněte způsob měření elasticity a plasticity vosků a jejich směsí pro teplotní interval 5 - 40°C, použitelný jako provozní zkouška.
- 4) Změřte elasticitu a plasticitu vhodných představitelů vosků a voskových směsí při teplotě 20°C ± 0,5°.
- 5) Zjistěte závislost elasticity a plasticity dvou voskových surovin a dvou jejich směsí na teplotě v rozmezí 5-40°C.
- 6) Vyhodnoťte provedené experimenty, zhodnoťte význam měření elasticity a plasticity vosků a jejich směsí z hlediska studia těchto materiálů i s ohledem na praktické použití vytavitelných modelů.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Usilovací knihovna
LIBEREC, STUDENTSKÁ 6

Autorské právo se řídí směrnici MŠK pro obsah
závěrečné zkoušky č. J. 31 727/62-11/2 ze dne
13. července 1962 a směrnicí MŠK XXVI, část 24 ze dne
31. 8. 1962 § 16 autorského zákona č. 115/193 Sb.

V. 102 / 1973 S
+

Rozsah grafických laboratorních prací:

experimentální výsledky zpracujte do tabulek a grafů.

Rozsah průvodní zprávy:

30 + 50 stran

Seznam odborné literatury:

- 1) Lakejev, Borisov: Osnovy reologii modelných materiálův
Izdat. Naukeva Dumka, Kijev 1971
- 2) Šklenik: Litje pe vyplavljajenym modeljam, Izdat.
Mašinostrejenje Moskva 1971
- 3) Časopis Giesserei, roč. 58, sešit 16, 12. srpna 1971
- 4) Normy ČSN: 64 0100, 64 0120, 64 0121, 64 0122, 64 0123, 64 0124,
64 0131, 64 0143.

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Bohumil Odstrčil

Konzultanti: Ing. Jiří Spal

Datum zahájení diplomové práce: 16. 10. 1972

Datum odevzdání diplomové práce: 6. 7. 1973



V. Chaloupek
Doc. Ing. V. Chaloupeký CSc.

vedoucí katedry

F. Kotšmíd
Prof. Ing. Dr. techn. F. Kotšmíd

děkan

v Liberci

dne

11. 10.

1972

podruh neodpovědi
do 30.8.74

Ústřední knihovna VŠST

věc : souhlas k zapůjčení diplomové práce
(dle ustanovení autorského zákona § 17 a směrnic MŠ č. 82
Věstník MŠ 1962, seš. 22)

22. 6. 1974

V Liberci dne

katedra

matematická a fyzikální

žadatel (podnik)

Karlské strojírenství a. p.

Ing. Mareš, K D I M Kamenická 250

název diplomové práce

Měření elasticity a plasticity vosků a
voskových kompozic

Sg.:

V 02/73 S

diplomant

R. Klouček

vedoucí DP

prof. Čátrčil

adresa

Liberec 1
Ruprechtická 17

katedra

Vyjádření vedoucího katedry

Souhlasím se zapůjčením diplomové práce za těchto podmínek:
(Podmínky lze stanovit jen v případě, je-li žadatelem podnik, v němž nebyly získávány podklady pro výše jmenovanou DP.)

Za půjčení DP stanovuji částku^x 300,- Kčs

Z toho pro diplomanta navrhuji částku _____ Kčs

Pro ostatní spoluautory _____ Kčs

x - viz.PI VŠST č. 6/69

podpis vedoucího katedry

V Ý T A H Z D I P L O M O V É P R Á C E

1. Rámcové zadání: měření plasticity a elasticity
vosků a voskových kompozic.

2. Jméno diplomanta: Rudolf Klouček

3. Vedoucí DP : Prof. Ing. B. Odstrčil

4. Stručný výtah z DP: tato diplomová práce obsahuje kapitulu o možnostech využití metody vytavitelného modelu ve slévárenství, o používaných modelových hmotách, tj. voscích, z hlediska požadovaných vlastností i chemické stavby. Dále je pojednáno o základních a složených stavech přetvárnosti pevných hmot, o přehledu základních rheologických látek a použití jejich kombinací pro ilustraci chování vosků a voskových směsí. Další kapitoly obsahují popis přípravy vzorků, použitých přístrojů a metody pro měření zadaného úkolu. V této kapitole jsou rovněž uvedeny naměřené tabulky a vypracované grafy. Na závěr celé DP je zhrnuto celkové vyhodnocení výsledků měření.

5. Místo vypracování a obhajoby DP: KTM VŠST Liberec

VŠST Liberec

Fakulta strojní

V Š S T

L I B E R E C

D I P L O M O V Á
P R Á C E

1 9 7 3

R. KLOUČEK

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a vosk.eměsí	DP -ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	1.

OBSAH:

1. Úvod	str.3
2. Metoda vytavitelného modelu	str.3
2.1. Uplatnění metody	str.3
2.2. Princip metody	str.3
3. Modelové hmoty	str.4
3.1. Druhy vosků	str.4
3.2. Požadované vlastnosti	str.5
3.3. Chemická stavba vosků	str.5
4. Tři základní stavy přetvárnosti pevných hmot	str.6
4.1. Rozdělení	str.6
4.2. Pružný stav přetvárnosti	str.6
4.2.1. Hlavní znaky	str.6
4.2.2. Vztah mezi přetvořením a napětím	str.7
4.2.3. Průběh a fyz. podstata pružných přetvoření	str.8
4.3. Plastický stav přetvárnosti	str.8
4.3.1. Hlavní znaky	str.8
4.3.2. Průběh a fyz. podstata plast. přetvoření	str.9
4.4. Vláčný stav přetvárnosti	str.10
4.4.1. Hlavní znaky	str.10
4.4.2. Průběh a fyz. podstata vláčných přetvoření	str.11
5. Složené stavy přetvárnosti	str.12
6. Základní látky, jejich rheologické diagramy a modely	str.12
6.1. Čtyři základní systémy rheologických diagramů a význam rheologických modelů	str.12

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP -ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	2.
6.2.	Přehled základních rheologických látek . . .	str.	13
6.2.1.	Tuhá hmota	str.	13
6.2.2.	Tekutá kapalina	str.	14
6.2.3.	Pružná (Hookova) hmota	str.	14
6.2.4.	Tvárná (plastická) látka	str.	15
6.2.5.	Vazké (Newtonova) kapalina	str.	16
6.2.6.	Vláččná hmota	str.	17
6.2.7.	Zpevněná látka	str.	19
6.2.8.	Tuhnoucí látka	str.	20
7.	Použití kombinací základních rheologických látek a modelů pro ilustraci chování vosků a voskových směsí	str.	21
8.	Příprava vzorků	str.	26
9.	Popis přístrojů	str.	27
10.	Popis metody	str.	29
10.1.	Zkouška tlakem	str.	29
10.2.	Zkouška ohybem	str.	56
11.	Vyhodnocení výsledků měření	str.	60
12.	Závěr	str.	63
13.	Použitá literatura	str.	65

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	3.

1. Úvod

V celém národním hospodářství, tedy i ve strojírenství je jedním z hlavních úkolů efektivní a hospodárná výroba. Jedním ze způsobů, jak z hospodárnit výrobu, je nahrazení třískového obrábění obráběním beztřískovým, tedy i slévárenstvím. Abychom mohli nahradit třískové obrábění, musíme dodržet požadovaný geometrický tvar, přesnost rozměrů i požadovanou drsnost povrchu. Tyto podmínky splňuje několik technologií, mezi nimi i metoda přesného lití vytavitelným modelem.

2. Metoda vytavitelného modelu

2. 1. Uplatnění metody

Metoda vytavitelného modelu je nákladný výrobní pochod. Ekonomickým efektem se uplatní pouze u přesných, tvarově složitých strojních součástí, nebo u složitých součástí, které nelze jako celek jinou metodou vyrobit. Dále se používá metody vytavitelného modelu i pro odlitky jednodušších tvarů, jejichž materiál lze obtížně třískově obrábět. Zpravidla je tedy tato metoda z ekonomického hlediska vhodná při výrobě větších sérií, nebo u hromadné výroby.

2. 2. Princip metody

Principem metody je získat ve formě z keramické hmoty dutinu o přesných rozměrech budoucího odlitku a vyhovující drsnost při povrchu. Toho dosáhneme tím, že model s příslušným tvokem z nízkotavitelného materiálu obalíme keramickou hmotou, která po ztuhnutí vytvoří formu. Další operací je zahřátí formy na příslušnou teplotu, čímž se model i v tok vytaví a ve formě vznikne požadovaná dutina.

3. Modelové hmoty

Na vytavitelné modely je možno použít různých materiálů. Jedním z nejpoužívanějších jsou voskové směsi. Jejich výhodou tkví v tom, že jsou levné, umožňují dokonalou reprodukci tvaru kovové formy, ve které jsou zhotovovány, nezanechávají po vytavení žádné zbytky a jsou regenerovatelné. Mají ovšem i své nevýhody, jako je značná tepelná dilatace a poměrně velké smrštění při odlévání.

3. 1. Druhy vosků

Základní vosky dělíme na měkké a tvrdé.

Měkké:

Parafin: je minerální bílý nebo nazelenalý vosk. Vyrábí se odparafinováním minerálních olejů. Je směs tuhých parafinických uhlovodíků. Různou rafinací dostaneme několik druhů parafínu s bodem tuhnutí 48°C - 60°C .

Cerezín: získává se také odparafinováním minerálních olejů. Je barvy bílé až žlutohnědé. Je to směs izoparafinických uhlovodíků. Bod tuhnutí 45°C - 80°C . Je ještě měkčí než parafin a má velké smrštění.

Tvrdé:

Montánní vosk: je hnědá až černá hmota. Je tvrdý a křehký. Vzniká extrakcí hnědého uhlí. Je to kyselina montánní s obsahem pryskyřice. Má velké smrštění jako každý tvrdý vosk. Vlastností montánních vosků se velmi liší podle původu a způsobu rafinace. Je to nejlevnější a také nejužívanější tvrdý vosk.

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	5.

Toto jsou nejdůležitější základní vosky. Dále se používají ještě: včelí vosk, stearin, karnaubský vosk, syntetické tvrdé vosky, kalafuna, asfalty a montánní pryskyřice.

3. 2. Požadované vlastnosti

Podle druhů výroby modelů požadujeme na voskových hmotách různé vlastnosti.

Směsi pro gravitační lití - měkkou voskovou hmotu s větším intervalem tuhnutí.

Směsi pro vetřikové lití pod tlakem - tvrdší voskovou hmotu s menším intervalem tuhnutí.

Od voskových hmot požadujeme:

1. Malé smrštění a nízkou roztažnost
2. dostatečnou stabilitu, pevnost a tvrdost
3. dostatečnou pružnost
4. nízkou viskozitu tavení
5. jemný krystalický sloh, hladký povrch
6. aby se nelepila na stěny kovových forem
7. aby nezpůsobovala korozi kovových forem
8. minimální obsah popela
9. aspoň částečná regenerovatelnost
10. musí být levná a dostupná.

3. 3. Chemická stavba vosků

Vosk není chemicky jednotnou látkou, je naopak velmi složitý. Platí to pro vosky jakéhokoliv původu. Všeobecně jsou vosky složeny z molekul tvarů řetězců s 20 - 70 skupinami CH_2 , kterými jsou převážně spojeny lineárně, někdy i s odbočkou. Dle původu obsahují

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	6.

řetězce často skupinu ketonovou, alkoholovou nebo esterovou. Existuje zde těžko představitelné množství kombinací v počtu členů řetězce, v množství postranních řetězců, v místě jejich připojení i v připojení funkčních skupin. Výrazná souvislost platí mezi průměrnou délkou řetězců a teplotou tání příslušného vosku, jakož i jeho tvrdostí. Čím kratší řetězec, tím nižší je teplota tání i tvrdost. Převažují-li naopak podíly s dlouhými řetězci, je vosk tvrdý a má vyšší teplotu tání. Tato skutečnost vyplývá z toho, že u dlouhých řetězců působí silnější meziatomové síly.

Z těchto důvodů vosky nemají přesně dofinovanou teplotu tání, ale určitý interval tuhnutí a tání.

4. Tři základní stavy přetvárnosti pevných hmot

4. 1. Rozdělení

Hmota může být při svém namáhání v odlišných fyzikálně-mechanických stavech, které různým způsobem ovlivňují její mechanické působení a přetváření.

Základními stavy přetvárnosti jsou:

1. Stav pružný (křehký)
2. stav tvárný (plastický)
3. stav vláčný.

4. 2. Pružný tvar přetvárnosti

4. 2. 1. Hlavní znaky

1. přetvoření jsou úměrná napětí. Závislost mezi nimi je přímková.

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	7.

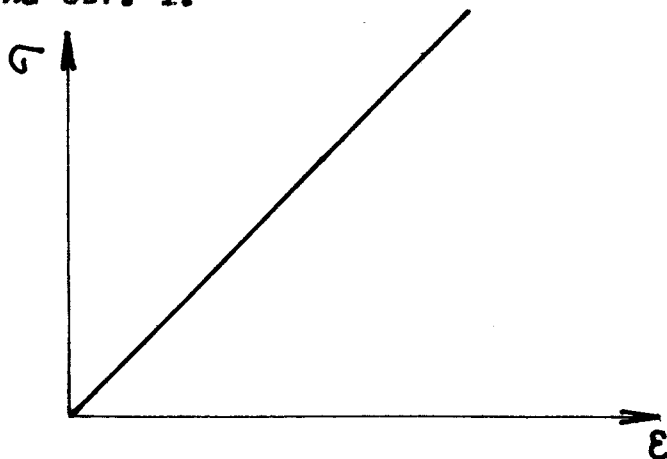
2. Nastává úplné vyrovnání přetvoření. Přestanou-li působit napětí, přetvoření zcela vymizí.
3. Neexistují žádná zbytková napětí. Po odstranění vnějších sil vnitřní napětí přestávají působit. Důsledkem toho je úplná nezávislost pružného stavu přetvárnosti na stavech předcházejících a nezávislost na časovém pořadí působení jednotlivých vnějších sil.
4. Nezávislost na rychlosti přetváření, na zrychlení přetváření a na čase.
5. Poměr napětí a přetvoření je stálý a rovná se modulu pružnosti, který je zvláštním případem modulu fyzikálně-mechanického působení hmoty.

4. 2. 2. Vztah mezi přetvořením a napětím

Přetváření pružné hmoty je vyjádřeno Hookovým zákonem:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

kde E je modul pružnosti. Tento vztah je vyjádřen grafem na obr. 1.



obr. 1

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	8.

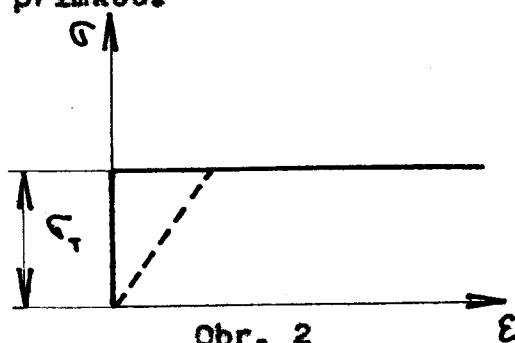
4. 2. 3. Průběh a fyzikální podstata pružných přetvoření

Pružná přetvoření probíhají rychlostí zvuku rovnoměrně v celé oblasti, kde působí napětí stejné velikosti. Všechny nerovnoměrnosti jsou způsobeny pouze nerovnoměrným rozložením vnějších napětí, nikoliv stavbou hmoty. Pružná přetvoření jsou způsobena oddálením molekul nebo atomů v krystalových mřížkách, nebo oddálením samostatných molekul nebo jejich zhluků.

4. 3. Plastický (tvárný) stav přetvárnosti

4. 3. 1. Hlavní znaky

Plastický stav se značně liší od pružného stavu přetvárnosti. Idealizovaná závislost mezi napětím a přetvořením za plastického stavu, znázorněna na obr. 2 plnou vodorovnou čarou, ve skutečnosti nenastává ihned při zatížení, ale teprve po předcházejícím pružném přetváření, které na tomto obrázku znázorněno šikmou čarkovanou přímkou.



Obr. 2

Plastický stav má tyto hlavní znaky:

1. Závislost mezi napětím a přetvořením je neurčitá. Přetvoření probíhá za stálého napětí $\bar{\sigma}_T$, viz obr. 2.

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73
Fakulta strojni		KTM 9.

Platí vztah:

$$\sigma = \sigma_T, \quad (2)$$

kde σ_T je stálé napětí na mezitvárnosti.

2. Po odlehčení zůstávají trvalé přetvoření.
3. Stav přetvárnosti závisí na stavech předcházejících.
4. Plastický stav nezávisí na čase a do jisté míry i na rychlosti přetváření. To však neplatí pro velké rychlosti, neboť plastická přetvoření potřebují určitý čas, aby se mohla vyvinout.

4. 3. 2. Průběh a fyzikální podstata plastických přetvoření

Plastická přetvoření probíhají značně pomaleji než pružná. Proto se hmota při velkých rychlostech zatěžování přetváří jen pružně.

Přitom neprobíhají rovnoměrně ani v oblastech se stálým napětím, ale soustřeďují se do určitých vrstev. Na povrchu hmoty lze pak pozorovat tzv. kluzné čáry. Soustředění plastických přetvoření se projevuje vytvořením krčků a rychlým zužováním tažených kovových tyčí, které předchází deformaci. Podstatou plastických přetvoření je skluz a mechanické zdvojování krystalů, posouvání molekul, posuny po plechách částečných porušení a některé jiné podobné způsoby vzájemného posouvání jednotlivých částic hmoty.

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	10.

4. 4. Vláčný stav

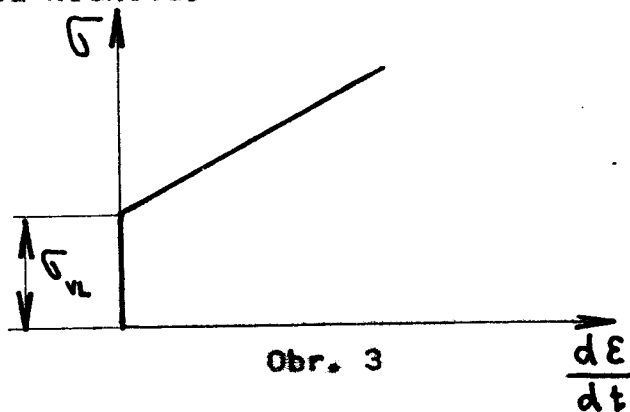
4. 4. 1. Hlavní znaky:

Vláčný stav přetvárnosti se podstatně liší od obou přecházejících stavů podstatnou závislostí mechanického působení na čase a na rychlosti přetváření. Některými svými vlastnostmi se blíží vazkému pohybu kapalných látek a velmi malou pohyblivostí. Jeho hlavními znaky jsou:

1. přímková závislost napětí na rychlosti přetváření nadmezí vláčnosti podle obr. 3, která se dá vyjádřit vztahem (3):

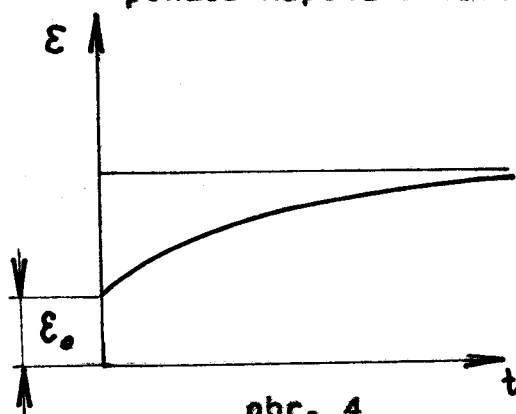
$$\sigma = \sigma_{VL} + \lambda \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3)$$

kde λ je součinitel odpovídající součiniteli vazkosti u kapalných látek. Je zvláštním případem modulu fyzikálně-mechanického působení hmoty. Od vazkého pohybu kapalin se vláčnost liší tím, že závislost napětí na rychlosti deformace platí teprve nad mezí vláčnosti σ_{VL} , které má u kapalin nulovou hodnotu.

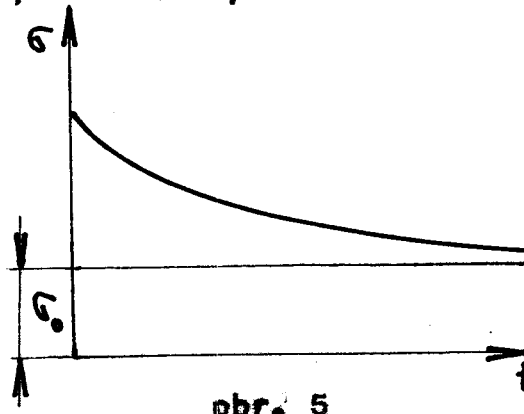


Obr. 3

2. Závislost na čase. Dvěma základními zjevy vláčné přetvárnosti je plouzivost (obr. 4) (dotváření), tj. změna přetvoření s časem za stálého napětí, a ochabování (obr. 5) (relaxace) napětí, což je pokles napětí s časem při stálém přetvoření.



obr. 4



obr. 5

Dotváření pevných hmot může být omezeno mezní hodnotou přetvoření ϵ , nebo probíhá neustálě a končí vláčným porušením. Ochabování se asymptoticky blíží ke konečné hodnotě napětí σ_0 (obr. 5).

3. Vláčná přetvoření jsou jednak přechodná, jednak trvalá. Existuje tedy částečná vyrovnatelnost přetvoření.

4. Vláčná přetvoření rostou s teplotou.

4. 4. 2. Průběh a podstata vláčných přetvoření

Vláčná přetvoření jsou rovnoměrně rozdělená v oblastech se stálým napětím. Probíhají hlavně na okrajích zrn hmoty. Vláčná přetvoření mezikrystalická se podstatně liší od plastického přetvoření vnitrokrystalického. Hmota porušená vláčným lomem má na všech místech částečné porušení, trhliny a dutiny. Při vláčném přetváření se mění nejen tvar, ale i objem namáhaného tělesa. Při tlaku nastává zhutňování a při tahu se otevírají uvnitř hmoty mezizrnné dutiny.

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DB - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	12.

5. Složené stavy přetvárnosti

Základní stavy přetvárnosti nastávají při skutečném mechanickém působení a přetváření jen zřídka. Obvykle však vznikají jejich kombinací tzv. složené stavy přetvárnosti.

Takovými to složenými stavy přetvárnosti se zabývá rheologie. Rheologie tedy vystihuje skutečné přetvárné vlastnosti hmot, které nebývají ani dokonalé pružné, ani úplně tvárné, ani zcela vláčné, ale vyskytují se u nich různé kombinace těchto základních přetvárných vlastností.

Protože analytické vyjádření hmot a pohybů vazkých kapalin by bylo pro praktické výpočty příliš složité, je lépe využít rheologických modelů a schemat a podle nich matematicky vyjadřovat a skládat účinky a vlivy jednotlivých vlastností hmot a kapalin a takto odvodit celkový průběh přetvárnosti.

V rheologickém systému rozeznáváme látky základní, jejichž vlastnosti lze vyjádřit jednoduchým diagramem o 2 proměnných, a látky složené, jejichž vlastnosti vyplývají složením rheologických diagramů látek základních a vyjadřují se buď řadou závislosti o 2 proměnných, trojrozměrnými diagramy, např. napětí - přetvoření - čas, nebo složitějšími funkcemi.

6. Základní látky, jejich rheologické diagramy a modely

6. 1. Čtyři základní systémy rheologických diagramů a význam rheologických modelů

Rheologické vlastnosti látek můžeme vyjádřit čtyřmi základními druhy diagramů, které udávají závislosti vždy mezi dvěma přetvárnými veličinami.

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73
Fakulta strojní		KTM 13.

Tyto čtyři základní závislosti jsou:

1. napětí - přetvoření,
2. napětí - rychlost přetvoření,
3. napětí - čas,
4. přetvoření - čas.

Nejdůležitější jsou první dvě. Často se také užívá tříčlenných vztahů:

1. Napětí - přetvoření - rychlost přetvoření,
2. napětí - přetvoření - čas.

Nejúplnějším vztahem je dán úplnou funkcí přetvárnosti, které by odpovídala plocha v liti rozněrném prostoru.

Jednotlivé přetvárné vlastnosti hmot jsou vyjádřeny rheologickými modely základních látek. Pružnou hmotu můžeme např. vyjádřit pružným perem, plastickou látku dvěma destičkami, mezi kterými působí tření atd. Skládáním těchto základních modelů dostáváme pak rheologické modely všech skutečných hmot, jejichž přetváření je výslednicí přetváření jednotlivých prvků.

6. 2. Přehled základních rheologických látek

Základní látky se ve skutečnosti vyskytují jen zřídka. Jsou spíše abstrakcemi, na jejichž podkladě můžeme při zanedbání méně důležitých zjevů přibližně vyčíselit průběh přetvárnosti nebo pohybu.

6. 2. 1. Tuhá hmota

Tuhá hmota, označená značkou TU, se nepřetváří ani za působením libovolně velikých sil. Její modul přetvárnosti je nekonečně veliký. Zůstává stále dokonale tuhá.

VŠST Liberec	Měření plast a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73
Fakulta strojní		KTM 14.

Tenzor jejího přetvoření se rovná 0:

$$\tau_{\zeta} = 0 \quad (4)$$

při libovolném tenzoru napětí τ_{ζ} . Tato abstrakce používáme hlavně v případech, kdy se jedná spíše o pohyb hmotných těles než o jejich vzájemné působení, tedy v mechanice a dynamice hmotných těles. TU bývá též označována jako Euklidová hmota.

6. 2. 2. Tekutá kapalina

Tato kapalina, označovaná značkou TE, neklade žádný odpor k pohybu. Ani při velkých rychlostech v ní nevznikají žádná napětí. Proto se její tenzor napětí rovná 0:

$$\tau_{\zeta} = 0 \quad (5)$$

při libovolném tenzoru přetvoření τ_{ζ} . Její vazkost je rovněž nulová. Předpokladu dokonalé tekutosti se často užívá v nauce o proudění a při řešení úloh hydrodynamiky a aerodynamiky. TE se někdy nazývá Pascalova kapalina.

6. 2. 3. Pružná (Hookova) hmota

Při přetváření pružné hmoty PR je napětí vždy přímočtě úměrné přetvoření

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (6)$$

$$\tau = G \cdot \gamma; \quad (7)$$

pro trojosý stav napjatosti se dá vyjádřit tento zákon vztahem mezi obecným napětím a deformací:

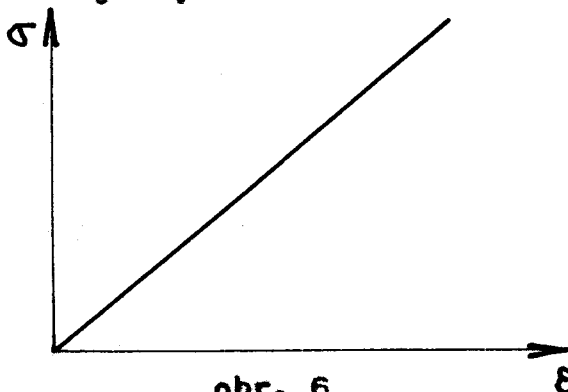
$$\sigma_i = E \cdot \epsilon_i, \quad (8)$$

kde veličiny σ_i , ϵ_i jsou odvozené z energetických podmínek.

Pružná hmota se vrací po odlehčení do původního stavu a její přetvoření nezávisí na předcházejících stavech namáhání. Jejím reologickým modelem je dokonale pružné pero



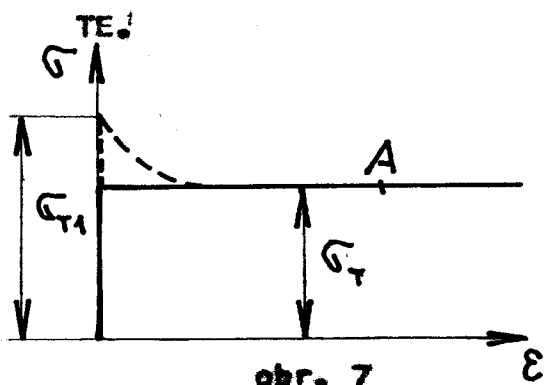
a její přetvoření je vyznačeno na obr. 6 takto:



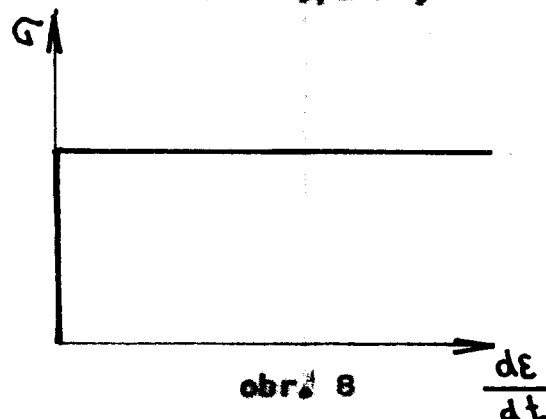
obr. 6

6. 2. 4. Tvárná (plastická) látka

Tvárná látka TV působí při napětím menším, než odpovídá mezitvárnosti (plasticity) σ_T , jako tuhá hmota. Při mezní hodnotě σ_T se pak přetváří neomezeně a působí jako tekutá kapalina. Proto je přetváření plastické látky znázorněno v reologickém diagramu vodorovnou přímkou, probíhající ve vzdálenosti σ_T rovnoběžně s osou přetvoření, totožnou s přímkou přetváření ideální kapaliny



obr. 7



obr. 8

VŠST Liberec	Měření plast a elast. vesků a veskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	16.

Při odlehčení se přetváření pouze zastaví v některém bodě A (obr. 7) na přímce :

$$\sigma = \sigma_T, \quad (9)$$

ale jeho hodnota se nezmění.

Důležitým znakem plastické látky je nezávislost přetvářnosti na rychlosti přetváření. Plastická látka ve skutečnosti nikdy neexistuje samostatně, ale jen ve spojitosti s jinými základními látkami, nejčastěji s pružnou hmotou.

Rheologickým modelem tvárné látky jsou dvě destičky, které jsou k sobě kolmo přitlačovány, takže mezi nimi působí při podélném tření napětí, jehož velikost odpovídá meznímu napětí σ_T . Protože třením je vklidu větší než za pohybu, je tím vyjádřen i pokles napětí na mezitvářnosti (plasticity) zhodnoty σ_{T1} na velikost σ_T , jak je časově naznačeno na obr. 7.

6. 2. 5. Vazká (Newtonova) kapalina

Napětí σ_i vznikající ve vazké kapalině VA závisí přímočtě na rychlosti pohybu $\frac{d\varepsilon_i}{dt}$ (obr. 10) dle rovnice:

$$\sigma_i = \lambda \frac{d\varepsilon_i}{dt}, \quad (10)$$

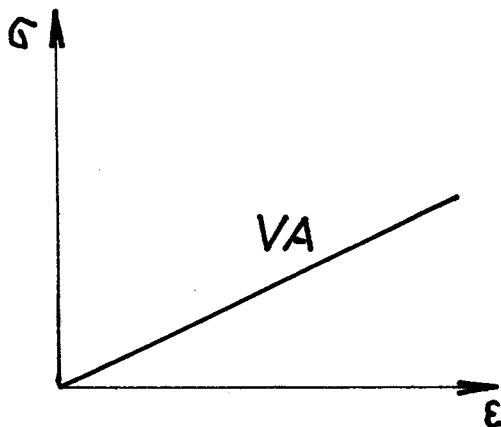
kde λ je součinitel normální viskozity.

U skutečných kapalin je normální vazkost druhotným zjevem a působí účinkem tangenciální vazkosti. Ta vzniká při pohybu kapaliny při pření sousedních vrstev o sebe. Přitom platí vztah:

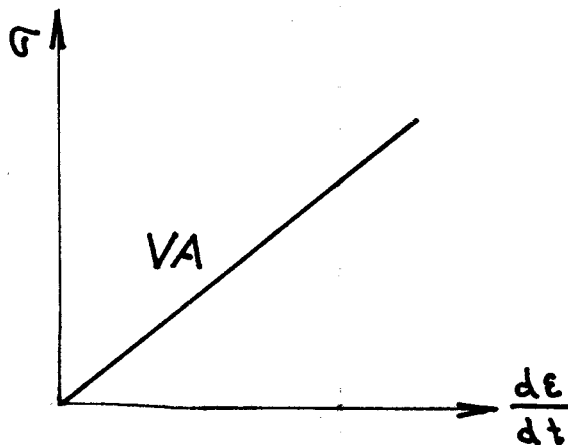
$$\tau = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} \quad (11)$$

kde $\frac{d\gamma}{dt}$ je rychlost smykového posouvání a η součinitel tangenciální vazkosti.

Rheologickým modelem vazké kapaliny je píst s otvory, který se pohybuje ve válci s tekutinou a klade odpor, který vzrůstá přímočaře s rychlostí pohybu (viz obr. 10). Při velmi malých rychlostech působí vazká kapalina rheologicky podobně jako kapalina tekutá TE.



obr. 9

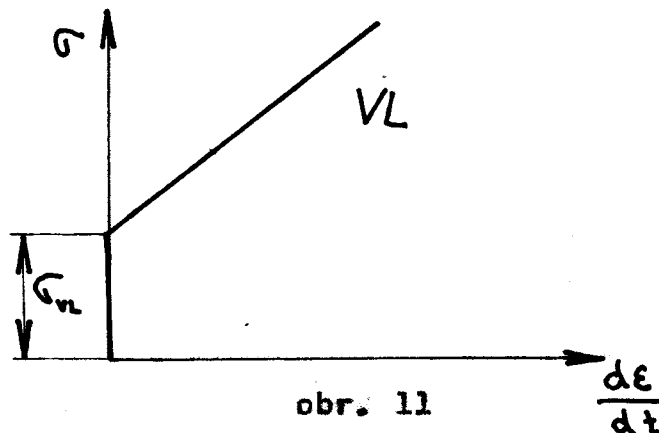


obr. 10

6. 2. 6. Vláčná hmota

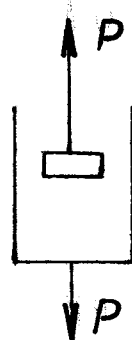
Vláčné vlastnosti hmot se uplatňují hlavně při dlouhodobém zatížení. Závislost napětí na rychlosti přetváření, plouživosti (dotváření) a ochabování (relaxace) jsou hlavními projevy vláčnosti, kterou má vyjádřit rheologická abstrakce vláčné hmoty VL.

Od vazké kapaliny se vláčná hmota liší tím, že při nulové rychlosti je schopna přenést určité napětí, jiné než hydrostatický tlak a tím, že její vazkost je mnohem vyšší než u kapaliny, jak je vidět z diagramu na obr. 11.



obr. 11

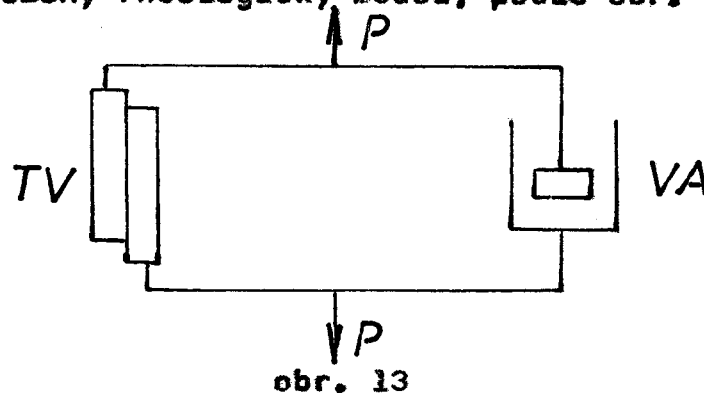
Z fyzikálního hlediska je vláčná hmota látkou základní. Vláčné přetváření probíhá v mezikrystalických oblastech a vrbách. Tomu odpovídá jednoduchý rheologický model dle obr. 12.



obr. 12

Tento model se skládá z pístu, pohybujícího se ve válci se sypkovou hmotou (s kuličkami). Působí-li na píst a válec vnější síla, přesouvá se sypká hmota kolem pístu, který je značně užší než válec a klade pohybu odpor, o kterém se předpokládá, že rovnoměrně vzrůstá s rychlostí posouvání. Tento model je však i při nulové rychlosti schopen přenést určité napětí σ_{VL} a tím představuje hmotu a ne vazkou kapalinu.

Z rheologického hlediska však není vláčná hmota látkou základní, ale je výslednicí kombinace tvárného (TV) a vazkého prvku (VA), které jsou souběžně spojeny v jeden složený rheologický model, podle obr. 13.



Rheologické vlastnosti vláčné hmoty vyjadřuje vztah:

$$\sigma_{VL} = \sigma_{TV} \parallel \sigma_{VA} \quad (12)$$

kde svíslé čára znamená souběžné (paralelní) spojení dvou základních prvků.

Přetvárné rovnice vláčné hmoty vycházejí spojením příslušných výrazů pro tvárnou látku a vazkou kapalinu ve tvaru:

$$\sigma = \sigma_{VL} + \lambda \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (13)$$

$$\tau = \tau_{VL} + \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (14)$$

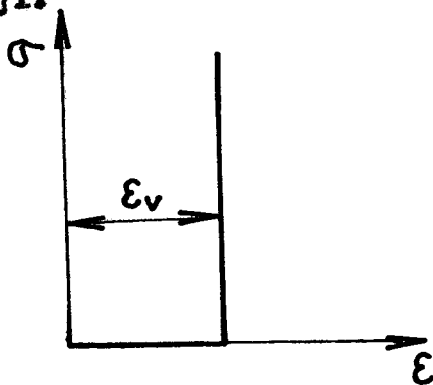
kde σ_{VL} znamená mezní napětí tvárného prvku.

6. 2. 7. Zpevněná látka

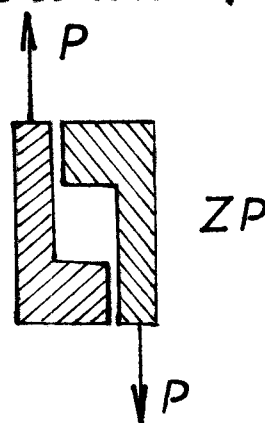
Zpevněná látka ZP působí nejdříve jako tekutá kapalina (obr. 14) a nepřenáší žádná napětí. Dosáhne-li však přetvoření mezní hodnoty ε_{γ} , chová se zpevněná látka dále jako tuhá hmota.

Zpevněná látka se ve skutečnosti nevyskytuje samostatně, ale je důležitým rheologickým prvkem, který s jinými základními látkami tvoří nové látky složené.

Rheologickým modelem zpevněné látky jsou dvě dokonalé tuhé součásti s ozuby (obr. 15), které se při poměrném přetvoření ϵ_v navzájem zachytí a při libovolném zvětšení vnějšího napětí se dále nepřetvářejí.



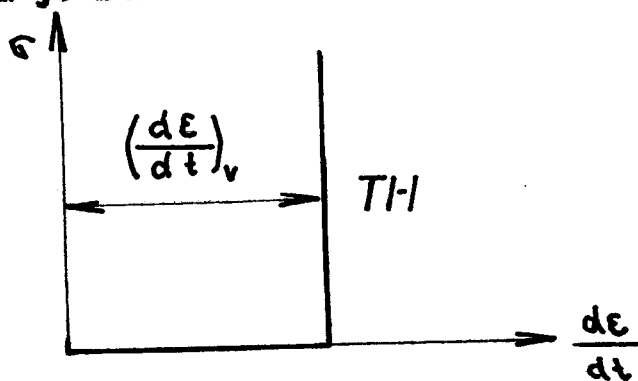
obr. 14



obr. 15

6. 2. 8. Tuhnoucí látka

Podobná zpevněná látce ZP je v oblasti kapalin tuhnucí látka TH, kde se chová při malých rychlostech přetváření jako dokonale tekutá kapalina s odmězní rychlostí $\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_v$ výše jako tuhá látka. Její diagram je znázorněn na obr. 16.



obr. 16

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	21.

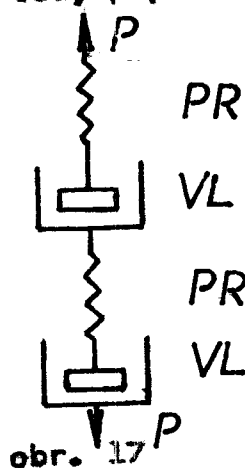
7. Použití kombinací základních rheologických látek a modelů pro ilustraci chování vosků a voskových směsí

Z hlediska rheologických vlastností se vosky chovají jako pružnovláčné hmoty. Skutečné pružnovláčné hmoty mívají často složitější přetvárné vlastnosti, než aby je bylo možno přesně vyjádřit jednoduchými rheologickými modely. Ty dostaneme složením jednoduchých pružnovazkých a pružnovláčných skupin.

Při skládání prvků a skupin se řídí přetvárné zákony dvěma rheologickými pravidly:

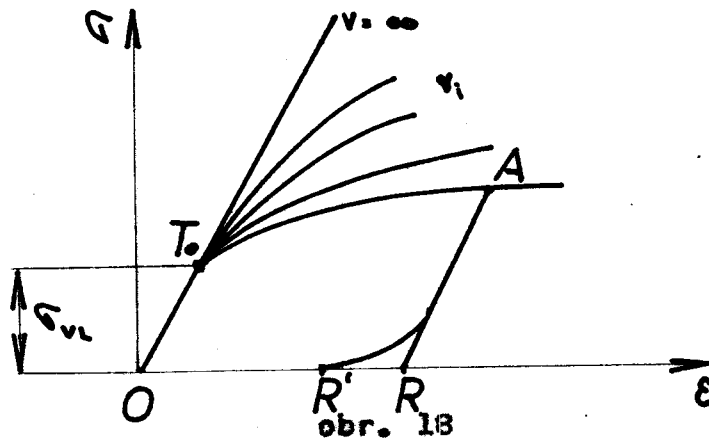
1. Jestliže se spojují prvky v řadě za sebou, přetvoření se sčítají a napětí jsou ve všech průřezech stejná.
2. Při řazení prvků vedle sebe mají jejich přetvoření stejné hodnoty a příslušná rheologická napětí se sčítají.

Pružnovláčnou hmotu lze tedy popsat tímto modelem:



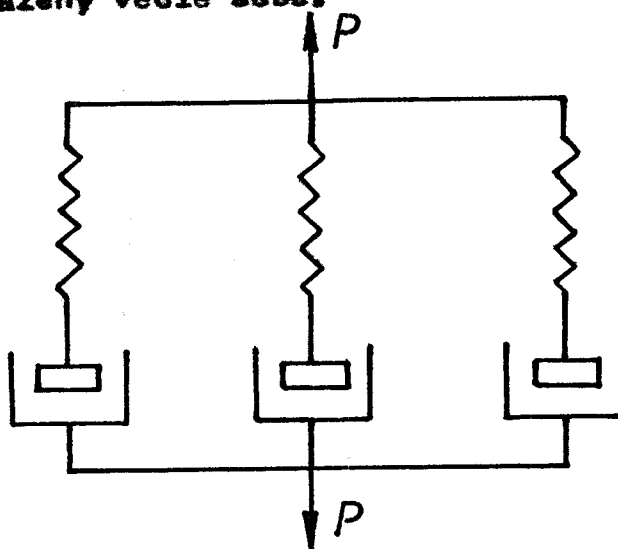
Jak vyplývá z grafů na obr. 18, přetváří se hmota nejprve pružně, pokud nenastane v nejslabším prvku VL překonání vnitřního tření vláčné přetváření. Od tohoto okamžiku je závislost mezi napětím a přetvořením nepřímá a závisí na rychlosti přetváření. Tento stav je

znázorněn na obr. 18 bodem T_0 . Odtud vybíhá svazek křivek, z nichž každá platí pro různou rychlost v_1 . Pro $v \rightarrow \infty$ vychází přímková závislost s počátečním modulem pružnosti. Tato přímka je zároveň tečnou celému svazku křivek.

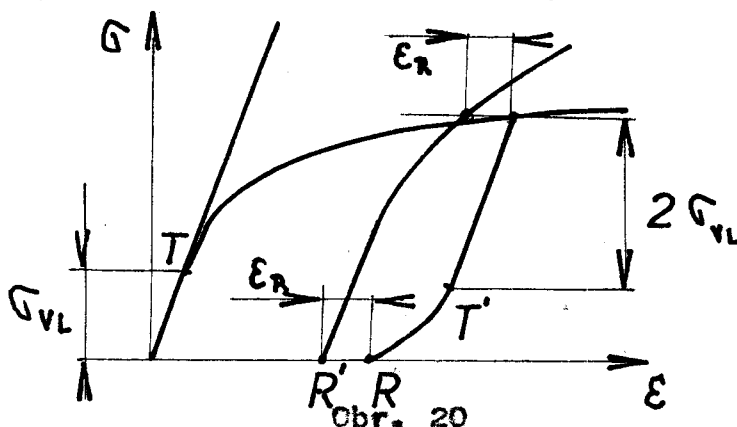


Při odlehčení se vyrovná přetvoření pouze v pružných prvcích; závislost mezi napětím a deformací je přímková. Protože hmota stejnorodá nevzniknou žádná přechodná zbytková vnitřní napětí mezi pružnými a vláčnými prvky.

Nejstejnorodá pružnovláčná hmota se skládá z jednoduchých pružnovláčných skupin (obr. 19), které jsou řazeny vedle sebe.



Při zatěžování působí tato hmota podobně jako stejnorodá pružnovláčná hmota jak vyplývá z diagramu na obr. 20. Blíží-li se rychlost přetváření nekonečnu, řídí se také tato hmota stále pružným zákonem. Při stejné rychlosti zatěžování i odlehčování se rovnají úsečky a pořadnice křivky odlehčení, měřené od počátku odlehčení A, dvojnásobným úsečkám a pořadnicím při zatěžování, měřené od počátku zatěžování O.



Při odlehčování však vznikají mezi jednotlivými větvemi pružnovláčných skupin PR - VL vnitřní napětí následkem nestejnomyšlného vyrovnání přetvoření u pružných prvků s různými moduly pružnosti. Pokud jsou tato napětí větší než meze vláčnosti σ_{VL} vláčných prvků, vyrovnají se ihned při odlehčování a křivka odlehčení se poněkud přiklání k ose ϵ .

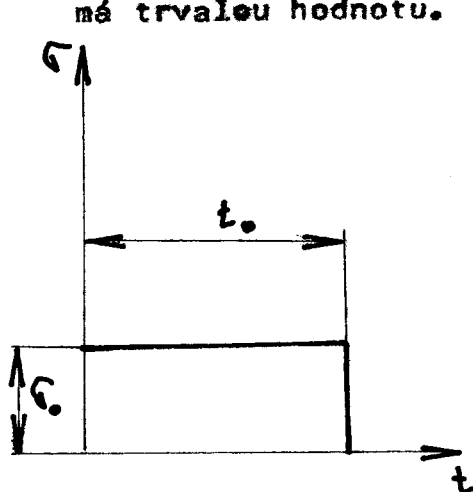
Vzdálenost mezivětrné vláčnosti, znázorněná bodem T od počátku odlehčení A v přetvárném diagramu, se opět rovná při stejné rychlosti zatížení a odlehčení dvojnásobné vzdálenosti prvotní meze T od počátku zatěžování O, takže platí:

$$\sigma'_{VL} = \sigma_A - 2 \cdot \sigma_{VL} \quad (15)$$

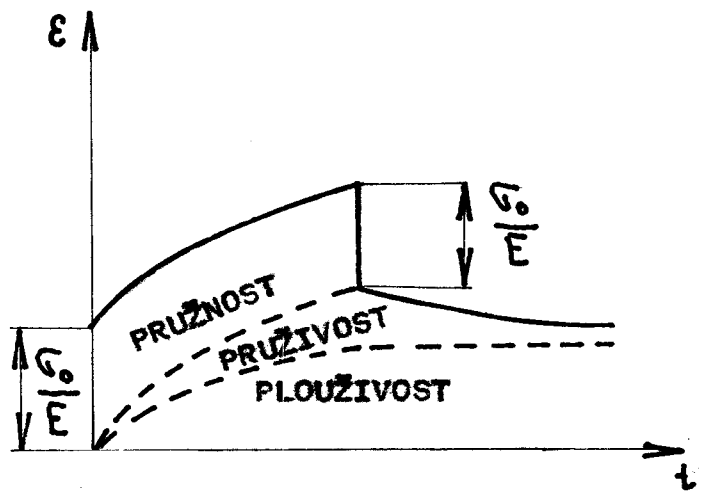
$$\epsilon'_{VL} = \epsilon_A - 2 \cdot \epsilon_{VL} \quad (16)$$

Po odlehčení zůstávají ve hmotě zbytková vnitřní napětí trvalá^a přechodná. Přechodná se vyrovnají po čase pruživosti a přetvoření přitom dodatečně poklesne o hodnotu $\epsilon_R = R R'$. Při opakovaném zatížení se projevuje vlivem trvalých vnitřních napětí zpevnění. Jestliže je však mezi původním a opakovaným zatížením určitá doba, je následkem pruživosti celá vzestupná větev křivky závislosti mezi napětím a přetvořením posunutá od dřívější větve o hodnotu poměrného dopružení ϵ_R nazpět, takže napětí σ_A bude dosaženo v bodě A' při menším poměrném přetvoření, majícím hodnotu $\epsilon_A - \epsilon_R$. Při dalším zatěžování probíhá pak přetvárná křivka nad původní polohou, čemuž odpovídají vyšší hodnoty napětí. Na tomto případě je vidět složitý zjev pružnovláčné hystereze.

Na obr. 21 je znázorněno stálé zatížení σ_0 složené pružnovláčné hmoty po dobu t_0 . Při trvalém zatížení a pozdějším odlehčení nastává trojí druh přetváření, a to účinkem pružnosti, pruživosti a plouživosti (obr. 22). Pružné přetvoření nezávisí na čase, pruživé se mění s časem - po odlehčení vymizí a plouživé závisí též na čase, ale po odlehčení má trvalou hodnotu.



obr. 21



obr. 22

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. voeků a voskových směsí	DF -ST -1030/73	
Fakulta strojní		KTM	25.

Závislost napětí, přetvoření a času se dá vyjádřit pro složené pružnovláčné hmoty nejobecněji součtovým mocninovým zákonem:

$$\xi = c_0 \cdot \sigma + k_1 \cdot \sigma^{n_1} \cdot t^{r_1} + k_2 \cdot \sigma^{n_2} \cdot t^{r_2} \quad (17)$$

kde první člen na pravé straně vyjadřuje účinek pružnosti, druhý pruživosti a třetí plouživosti (dotváření). Tato mocninová funkce je velmi obecná a může při vhodné volbě konstant $c_0, k_1, k_2, n_1, n_2, r_1$ a r_2 s dostatečnou přesností vyjádřit přetvárnost i těch nejsložitějších nestejnorodých pružnovláčných hmot. Protože vláčné prvky mají také plastické vlastnosti, jak vyplývá z rheologického vzorce $VL = TV \mid VA$, zahrnuje v sobě rheologický pojem složené nestejnorodé pružnovláčné hmoty přetvárné vlastnosti pružné, plastické i vláčné. Při nekonečně velké rychlosti přetváření

$$\begin{aligned} v = \frac{d\xi}{dt} &= \frac{d\sigma}{dt} (c_0 + n_1 \cdot k_1 \cdot \sigma^{(n_1-1)} \cdot t^{r_1} + n_2 \cdot k_2 \cdot \sigma^{(n_2-1)} \cdot t^{r_2}) + \\ &+ r_1 \cdot k_1 \cdot \sigma^{n_1} \cdot t^{(r_1-1)} + r_2 \cdot k_2 \cdot \sigma^{n_2} \cdot t^{(r_2-1)} \end{aligned} \quad (18)$$

se čas t blíží nule a z výrazu (17) vychází zákon pružnosti:

$$\frac{d\xi}{dt} = c_0 \cdot \frac{d\sigma}{dt} \quad (19)$$

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP -ST -1030/73	
Fakulta strojní		KTM	26.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

8. Příprava vzorků

Vzhledem k tomu, že:

- 1) vosky jsou krystalické látky s makromolekulární strukturou a při lití vzniká struktura podobná struktuře dendritické
- 2) při dotlačování se lící struktura mění na strukturu tvářenou
- 3) vosk může obsahovat určité množství vody.

je velice důležité přesné stanovení a dodržení postupu při přípravě voskových válečků a tyček.

Při přípravě postupujeme takto:

- 1) vosk nebo směs roztavíme a ohřejeme na teplotu 100°C a krátkodobě (po dobu pěti minut) přehřejeme na 110°C . Tímto ohřevem se odpaří voda vázaná ve vosku.
- 2) Vosk nebo směs necháme vychladnout až na teplotu 10°C nad "likvidem".
- 3) Odlejeme do kovových forem vytemperovaných na teplotu $45 - 50^{\circ}\text{C}$. Rozměry formy pro tyčky jsou $10 \times 10 \times 150 \text{ mm}$ a pro válečky $\varnothing 10 \times 13 \text{ mm}$. Po odlití tlakem 10 kp/cm^2 vosk pomocí vhodného přípravku dotlačíme.
- 4) Po ochlazení a vyjmutí válečku horní a dolní konec odřízneme, čímž odstraníme staženinu. Dále po dosažení rovnoběžnosti a rovinnosti dotykových ploch oba konce válečku přebrousíme na metalografickém papíře č. 0.

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	27.

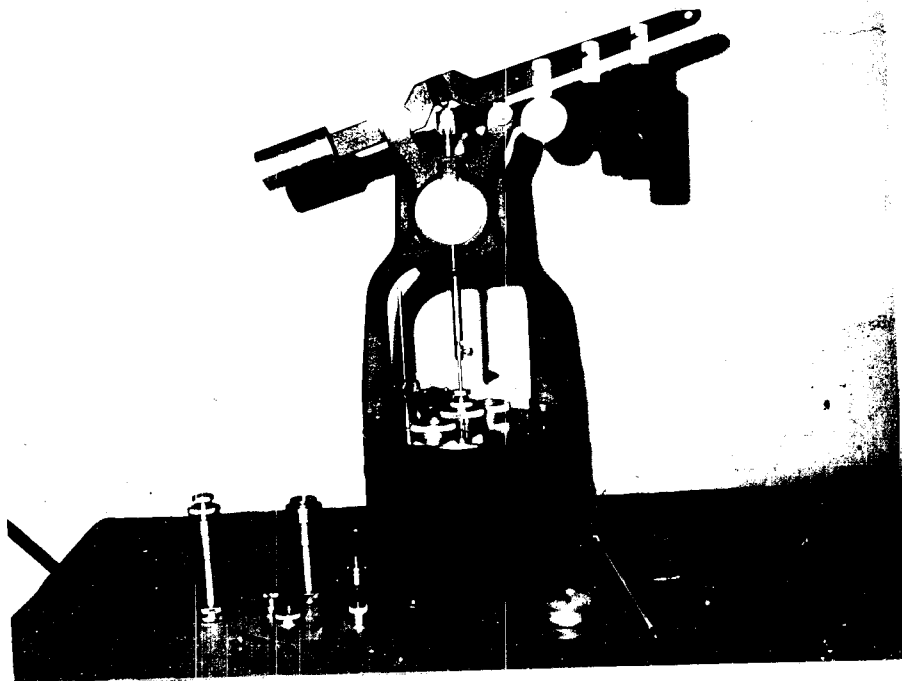
9. Popis přístroje

Pro měření deformací vzorků z vosků a voskových směsí byl použit Höpplerův konsistometr. Sestává se z těchto funkčních částí (obr.23) :

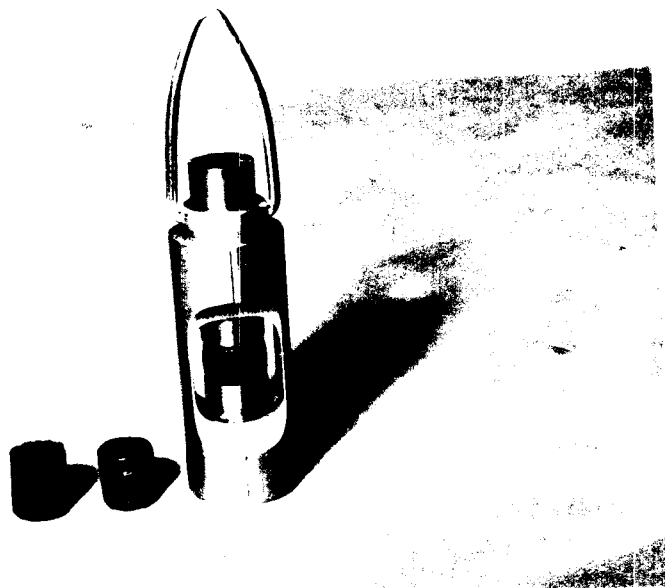
1. Válcová nádoba
2. stojan
3. páka a závaží pro vyvození tlaku
4. tři válcová pouzdra
5. tyčka
6. ručičkový úchylkoměr
7. přípravek pro uložení voskových válečků (obr.24).

Ve válcové nádobě jsou umístěny tři pouzdra, z nichž dvě krajní se používají jako podpory pro ohybovou zkoušku (obr. 25) a prostřední slouží jako těleso pro uložení přípravku, do nějž jsou umísťovány při tlakové zkoušce voskové válečky. Na této válcové nádobě je čtyřmi šrouby upevněn masivní stojan, na jehož horní části je umístěna páka, na níž se zavěšují jednotlivá závaží. Tíha těchto závaží se přenáší přes kulový dotyk na tyčku a dále při zkoušce ohybem přes upravený dotyk přímo na zkoumaný vzorek, a při zkoušce tlakem na přípravek, v němž je umístěn voskový váleček. Pohyb tyčky při zatěžování i odlehčování je sledován ručičkovým úchylkoměrem, který má přesnost čtení v tisícínách milimetru. V zadní části stojanu je aretační šroub pro ustavení tyčky do žádané polohy.

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	28.



obr. 23



obr. 24

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	29.

Pro měření při teplotách vyšších než je teplota místnosti je nutno připojit k tomuto konsistometru útratermostat, který dodává do válcové nádoby vodu o žádané teplotě a tím ohřívá i voskové válečky pro tlakovou zkoušku. Dalším úkolem tohoto ultratermostatu zn. "Motorruch" polské výroby je udržet konstantní teplotu s přesností $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

10. Popis metody

10. 1. Zkouška tlakem

Zkušební válcové vzorky o žádaných rozměrech jsem změřil s přesností na setiny milimetru. Po vložení do přípravku jsem každý vzorek postupně zatěžoval čtyřmi různými napětími a pro jednotlivá napětí jsme zjišťoval závislost deformace válečku na čase:

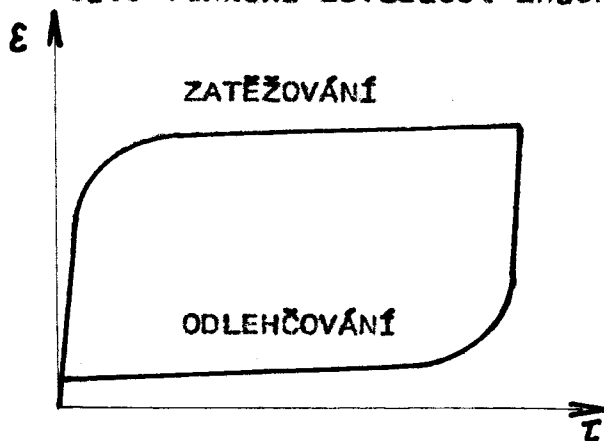
$$\varepsilon = \varepsilon(T) \quad (20)$$

Tuto funkční závislost jsem zjišťoval i při odlehčení vzorku.

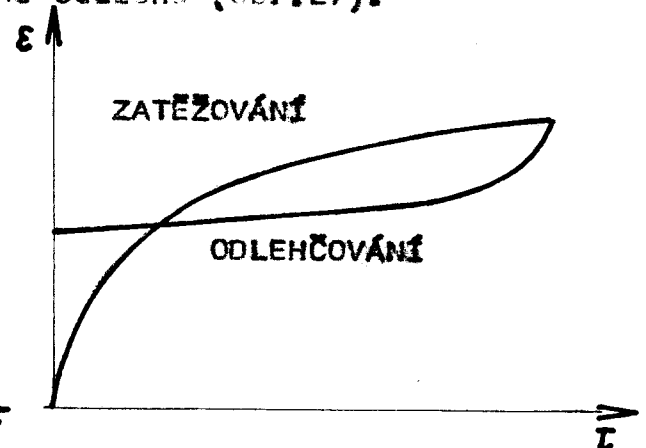
Bylo provedeno měření na těchto voscích a voskových směsí:

1. Montánní vosk zn. "Romonta" - Bzn. R
2. Směs I: 80% Romonty + 20% parafínu - ozn. I
3. směs II: 60% Romonty + 40% parafínu - ozn. II
4. směs III: 40% Romonty + 60% parafínu - ozn. III
5. směs IV: 20% Romonty + 80% parafínu - ozn. IV
6. parafín R 56/58 - ozn. P

Pro materiály Romonta a směsi I - IV má diagram $\varepsilon = \varepsilon(\tau)$ tvar podle obr. 26, kdežto pro parafin je tato funkční závislost značně odlišná (obr. 27).



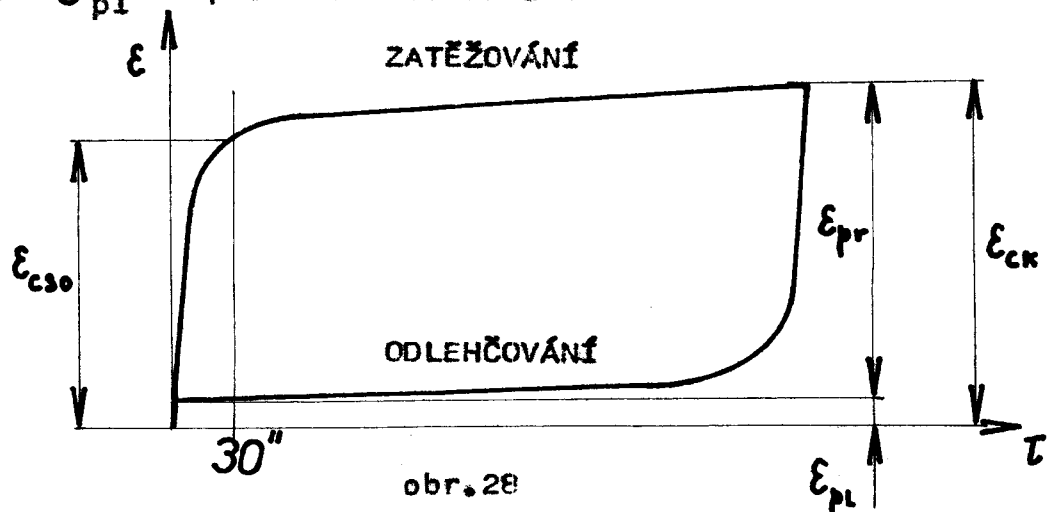
obr. 26



obr. 27

Na diagramu $\varepsilon = \varepsilon(\tau)$ jsem rozlišoval tyto deformace (obr. 28):

1. ε_{c30} - celková deformace po 30 vt. zatížení
2. ε_{ck} - celková konečná deformace
3. ε_{pr} - pružná deformace
4. ε_{pl} - plastická deformace



obr. 28

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73
Fakulta strojní		KTM 31.

Pro všechny uvedené materiály jsem dále sestavil tlakový diagram:

$$\varepsilon = \varepsilon(\sigma) \quad (21)$$

a to pro deformace ε_{C30} a ε_{CK} a teploty 10°C ; $23,5^{\circ}\text{C}$; 30°C a 40°C . Pro jednotlivé materiály při různých teplotách a napětích jsem dále z velikosti pružné deformace ε_{pr} a z příslušného napětí spočetl podle Hookova zákona modul pruživosti:

$$E = \frac{\sigma_p}{\varepsilon_{pr}} \quad (22)$$

Pojmu modul pruživosti jsem užíval z toho důvodu, že tlaková zkouška je natolik necitlivá a pružné deformace probíhají takovou rychlostí, že tyto pružné deformace nejsou v tomto případě rozlišitelné.

Po zjištění těchto modulů pruživosti jsem do diagramů zanášel jejich závislosti na napětích pro jednotlivé materiály a teploty

$$E = E / \sigma /, \quad (23)$$

a na teplotě pro jednotlivé materiály a napětí

$$E = E / \sigma /. \quad (24)$$

Poznámka: v těchto grafech mají všechna neoznačená napětí rozměr kp/cm^2 .

VŠST Liberec	Měření plast. a elast.	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní	vosků a voskových směsí	KZM	32.

TABULKA Č.1

MATERIÁL	θ [°C]	ϵ_{c30}	ϵ_{ck}	ϵ_{pr}	ϵ_{pl}	σ [kp/cm ²]	E [kp/cm ²]
ROMONTA	10	0,0033	0,0052	0,0031	0,0021	4	1300
		0,0080	0,0083	0,0060	0,0023	12	2000
		0,0140	0,0148	0,0122	0,0026	24	1970
		0,0190	0,0200	0,0176	0,0024	36	2050
SMĚS I	10	0,0048	0,0050	0,0038	0,0012	4	1050
		0,0084	0,0103	0,0091	0,0008	12	1320
		0,0153	0,0154	0,0141	0,0013	24	1700
		0,0200	0,0212	0,0205	0,0007	36	1750
SMĚS II	10	0,0045	0,0049	0,0034	0,0015	4	1180
		0,0070	0,0074	0,0071	0,0003	12	1700
		0,0120	0,0125	0,0120	0,0005	24	2000
		0,0164	0,0170	0,0165	0,0005	36	2180
SMĚS III	10	0,0047	0,0051	0,0044	0,0007	4	920
		0,0082	0,0084	0,0079	0,0005	12	1510
		0,0132	0,0141	0,0136	0,0005	24	1760
		0,0181	0,0192	0,0183	0,0003	36	1970
SMĚS IV	10	0,0052	0,0057	0,0045	0,0012	4	900
		0,0094	0,0098	0,0087	0,0011	12	1380
		0,0151	0,0156	0,0142	0,0014	24	1580
		0,0180	0,0198	0,0177	0,0021	36	2030
PARAFIN		0,0058	0,0080	0,0035	0,0045	4	1150
		0,0107	0,0128	0,0059	0,0069	12	2050

TABULKA Č. 2

MATERIÁL	γ [°C]	ϵ_{c30}	ϵ_{ck}	ϵ_{pr}	ϵ_{pl}	σ [kp/cm ²]	E [kp/cm ²]
ROMONTA	23,5	0,0036	0,0039	0,0039	-	4,1	1040
		0,0081	0,0085	0,0082	0,0003	12,3	1500
		0,0132	0,0139	0,0134	0,0005	24,6	1700
		0,0172	0,0186	0,0177	0,0009	37,0	2080
SMĚS I	22,0	0,0042	0,0045	0,0041	0,0004	4,0	976
		0,0081	0,0086	0,0078	0,0008	12,0	1540
		0,0119	0,0125	0,0117	0,0009	24,0	2051
		0,0153	0,0160	0,0158	0,0002	36,0	2280
SMĚS II	23,5	0,0040	0,0044	0,0041	0,0003	4,0	990
		0,0086	0,0093	0,0087	0,0006	12,0	1380
		0,0135	0,0147	0,0143	0,0004	24,0	1690
		0,0195	0,0214	0,0203	0,0011	36,0	1770
SMĚS III	23,5	0,0047	0,0051	0,0047	0,0004	3,9	850
		0,0093	0,0103	0,0091	0,0008	11,7	1290
		0,0153	0,0169	0,0152	0,0017	23,4	1540
		0,0202	0,0228	0,0204	0,0024	35,1	1720
SMĚS IV	23,5	0,0037	0,0042	0,0040	0,0002	3,9	1000
		0,0096	0,0110	0,0095	0,0015	11,7	1230
		0,0160	0,0186	0,0164	0,0022	23,4	1430
		0,0215	0,0270	0,0220	0,0049	35,1	1600
PARAFIN		0,0055	0,0088	0,0055	0,0030	4,0	727
		0,0147	0,0346	0,0158	0,0190	12,0	741

VŠST Liberec	Měření plast. a elast.	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní	vosků a voskových směsí	KTM	34.

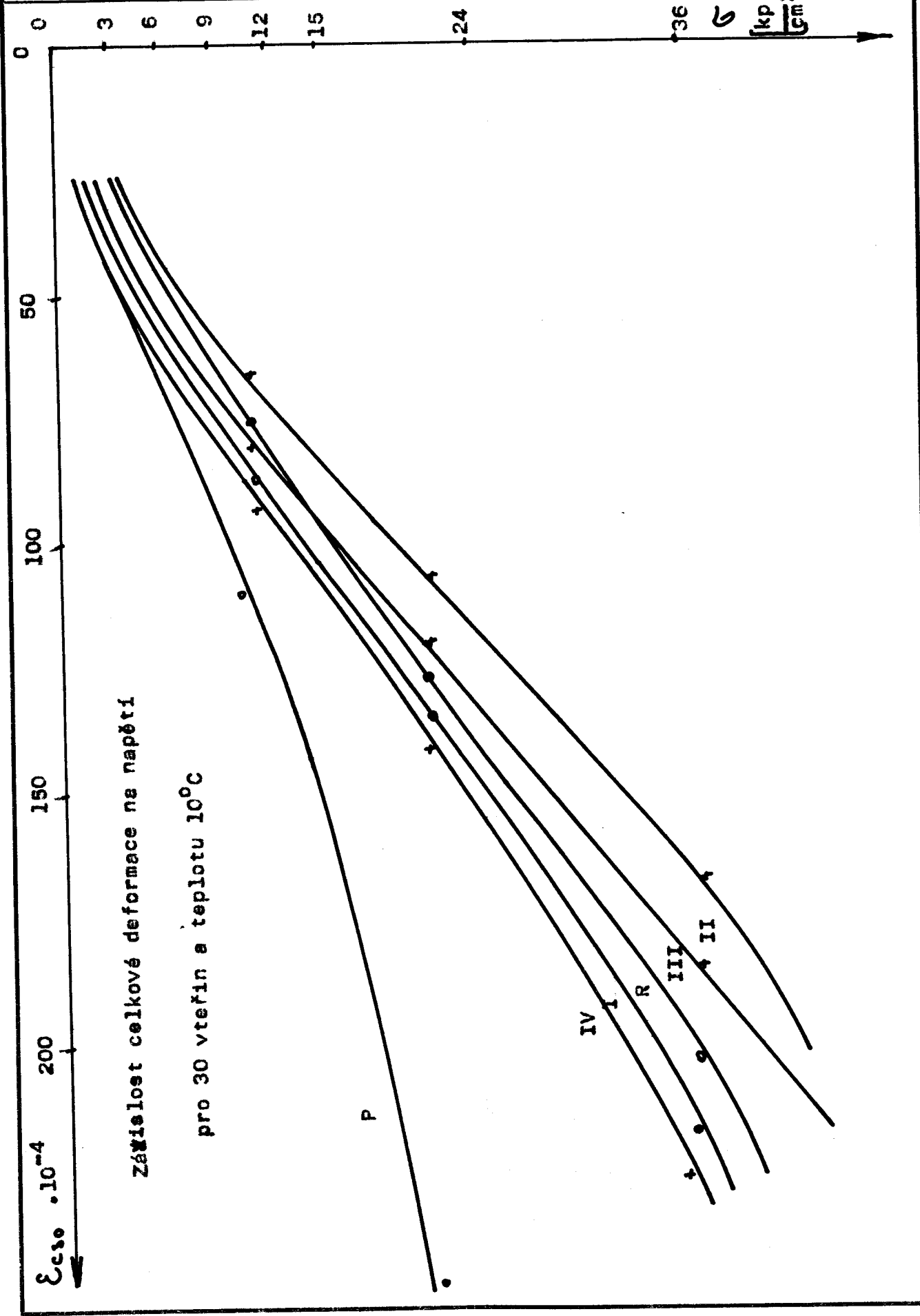
TABULKA č. 2

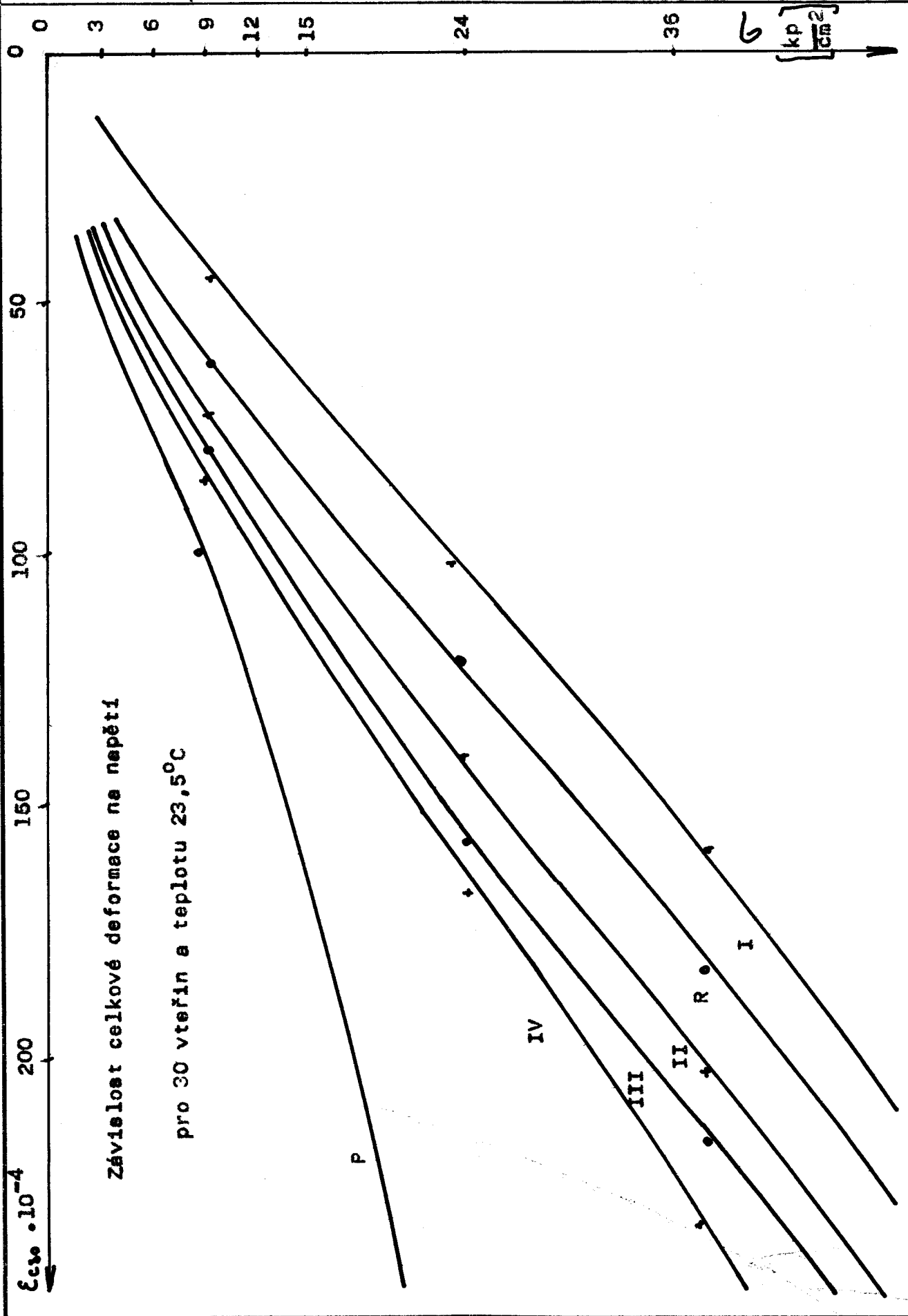
MATERIÁL	ϑ [°C]	ϵ_{c30}	ϵ_{ck}	ϵ_{pr}	ϵ_{pl}	σ [kp/cm ²]	E [kp/cm ²]
ROMONTA	30	0,0043	0,0046	0,0044	0,0002	4	910
		0,0114	0,0120	0,0107	0,0013	12	1120
		0,0188	0,0199	0,0178	0,0021	24	1350
		0,0236	0,0253	0,0235	0,0018	36	1540
SMĚS I	30	0,0042	0,0045	0,0043	0,0002	4	930
		0,0101	0,0108	0,0100	0,0008	12	1200
		0,0165	0,0184	0,0157	0,0027	24	1520
		-	-	-	-	36	1730
SMĚS II	30	0,0043	0,0048	0,0046	0,0002	4	880
		0,0107	0,0116	0,0095	0,0021	12	1280
		0,0158	0,0170	0,0147	0,0023	24	1650
		0,0194	0,0217	0,0195	0,0022	36	1860
SMĚS III	30	0,0042	0,0048	0,0046	0,0002	4	870
		0,0118	0,0130	0,0117	0,0013	12	1020
		0,0181	0,0212	0,0189	0,0023	24	1270
		0,0236	0,0335	0,0250	0,0035	36	1440
SMĚS IV	30	0,0044	0,0051	0,0043	0,0008	4	900
		0,0115	0,0132	0,0112	0,0020	12	1040
		0,0181	0,0286	0,0203	0,0033	24	1140
		-	-	-	-	36	-

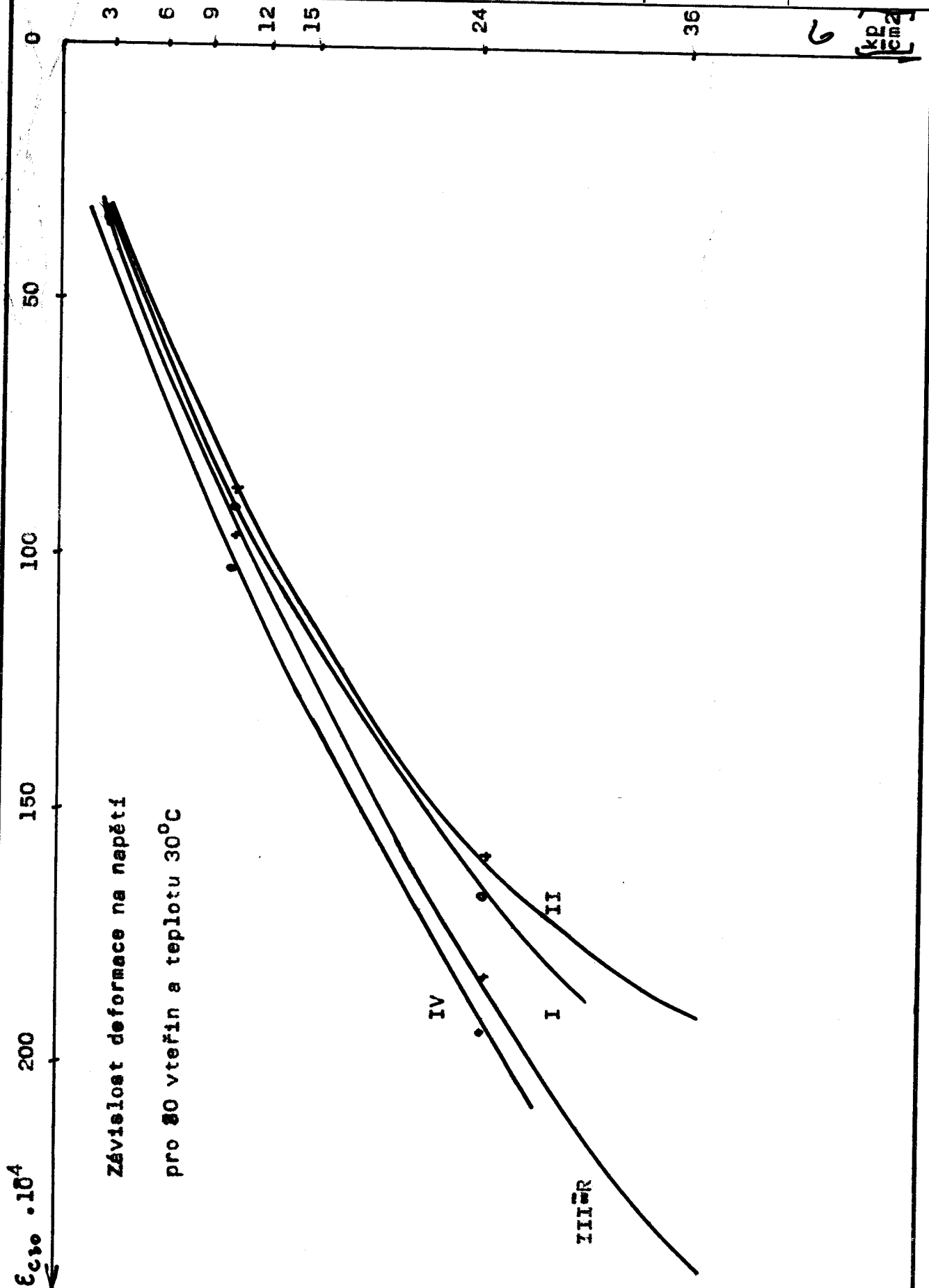
VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	35.

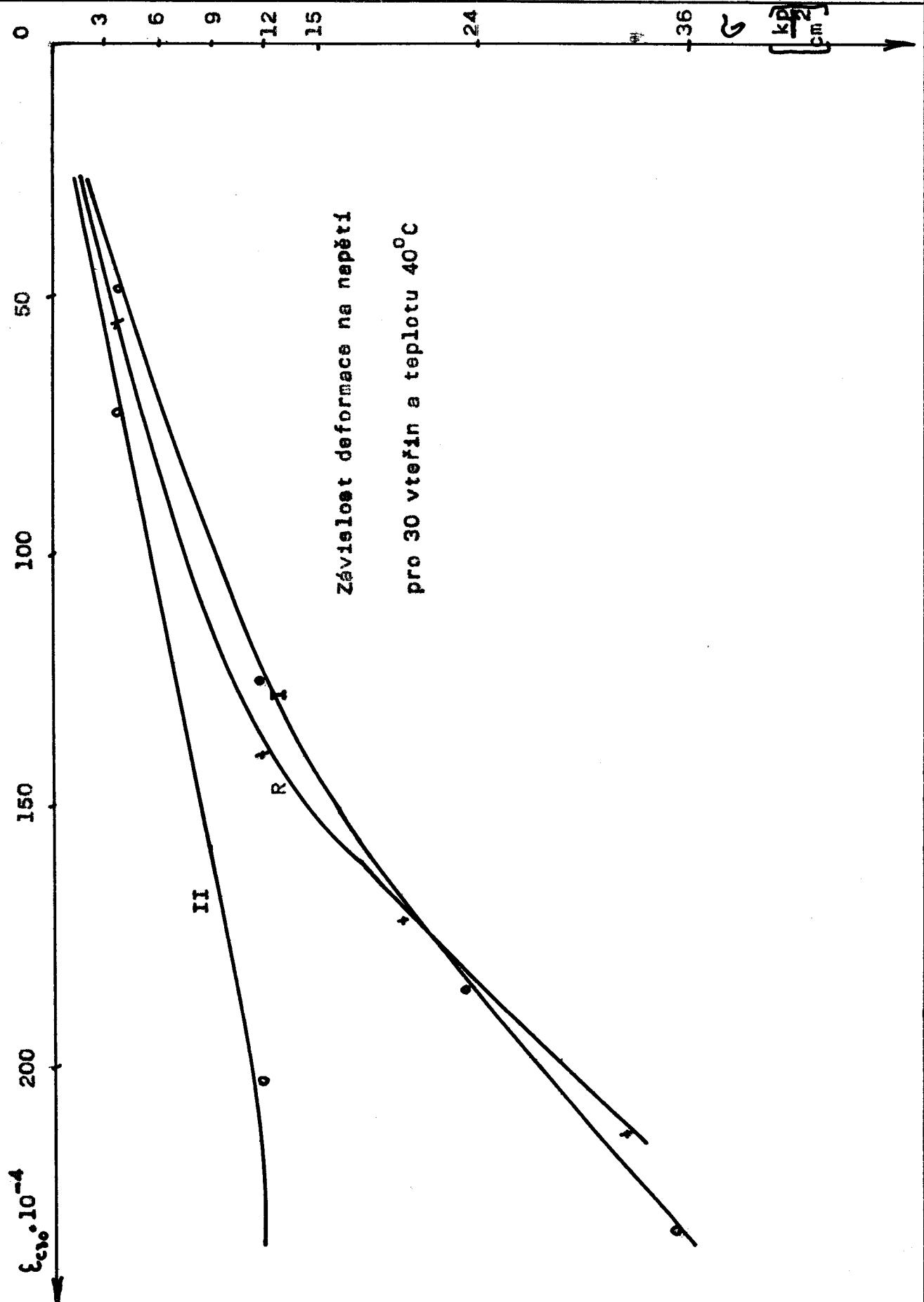
TABULKA Č. 4

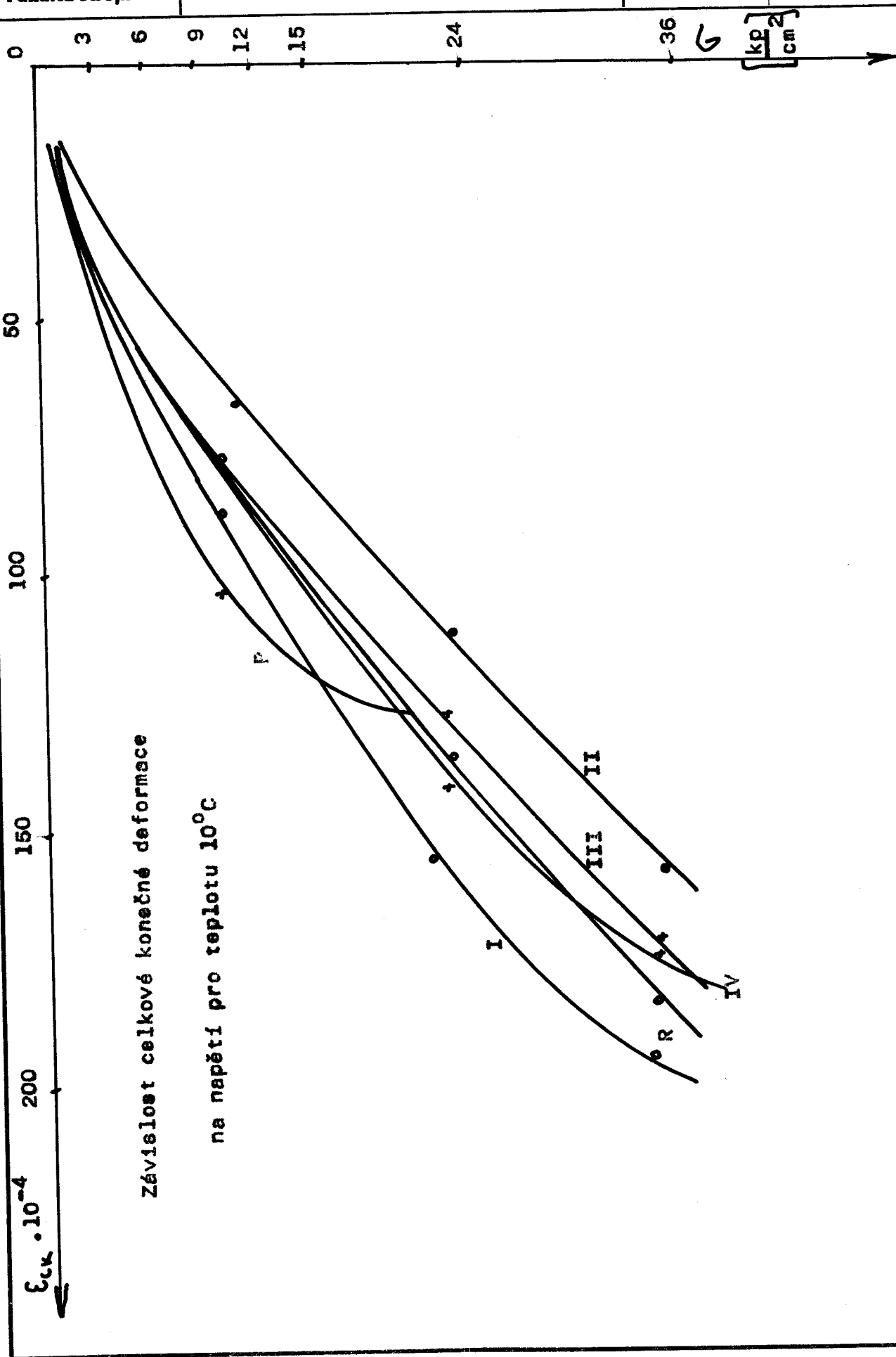
MATERIÁL	ϑ [°C]	ϵ_{c30}	ϵ_{ck}	ϵ_{pr}	ϵ_{pl}	σ [kp/cm ²]	E [kp/cm ²]
ROMONTA	40	0,0055	0,0059	0,0054	0,0005	4	770
		0,0139	0,0154	0,0125	0,0029	12	1000
		0,0183	0,0201	0,0185	0,0016	24	1350
		0,0212	0,0236	0,0212	0,0024	36	1560
SMĚS I	40	0,0049	0,0057	0,0046	0,0011	4	870
		0,0125	0,0147	0,0122	0,0025	12	1000
		0,0184	0,0233	0,0177	0,0056	24	1360
		0,0231	0,0337	0,0232	0,0105	36	1540
SMĚS II	40	0,0073	0,0099	0,0071	0,0028	4	550
		0,0203	0,0322	0,0190	0,0132	12	620
		-	-	-	-	24	-
		-	-	-	-	36	-

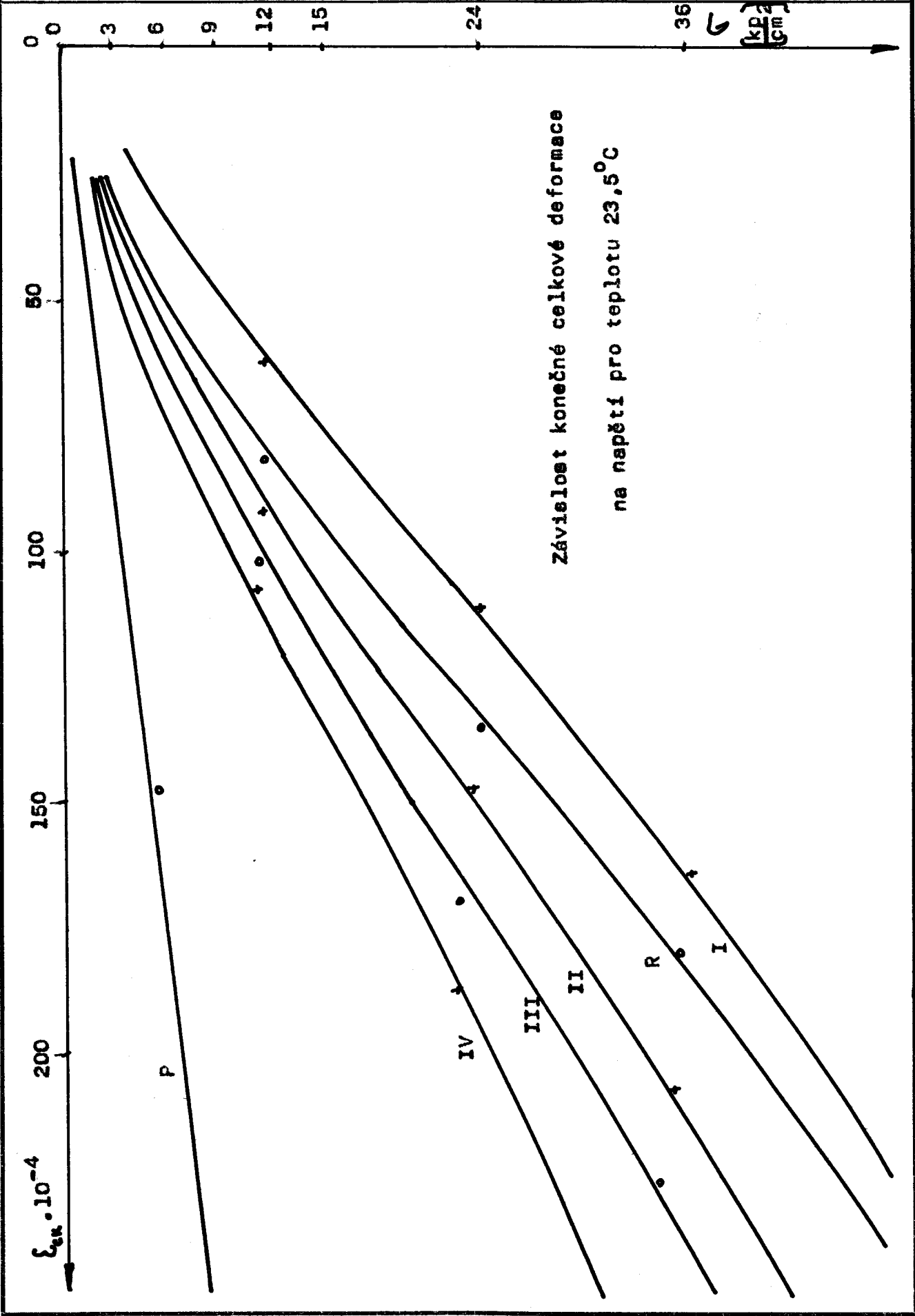


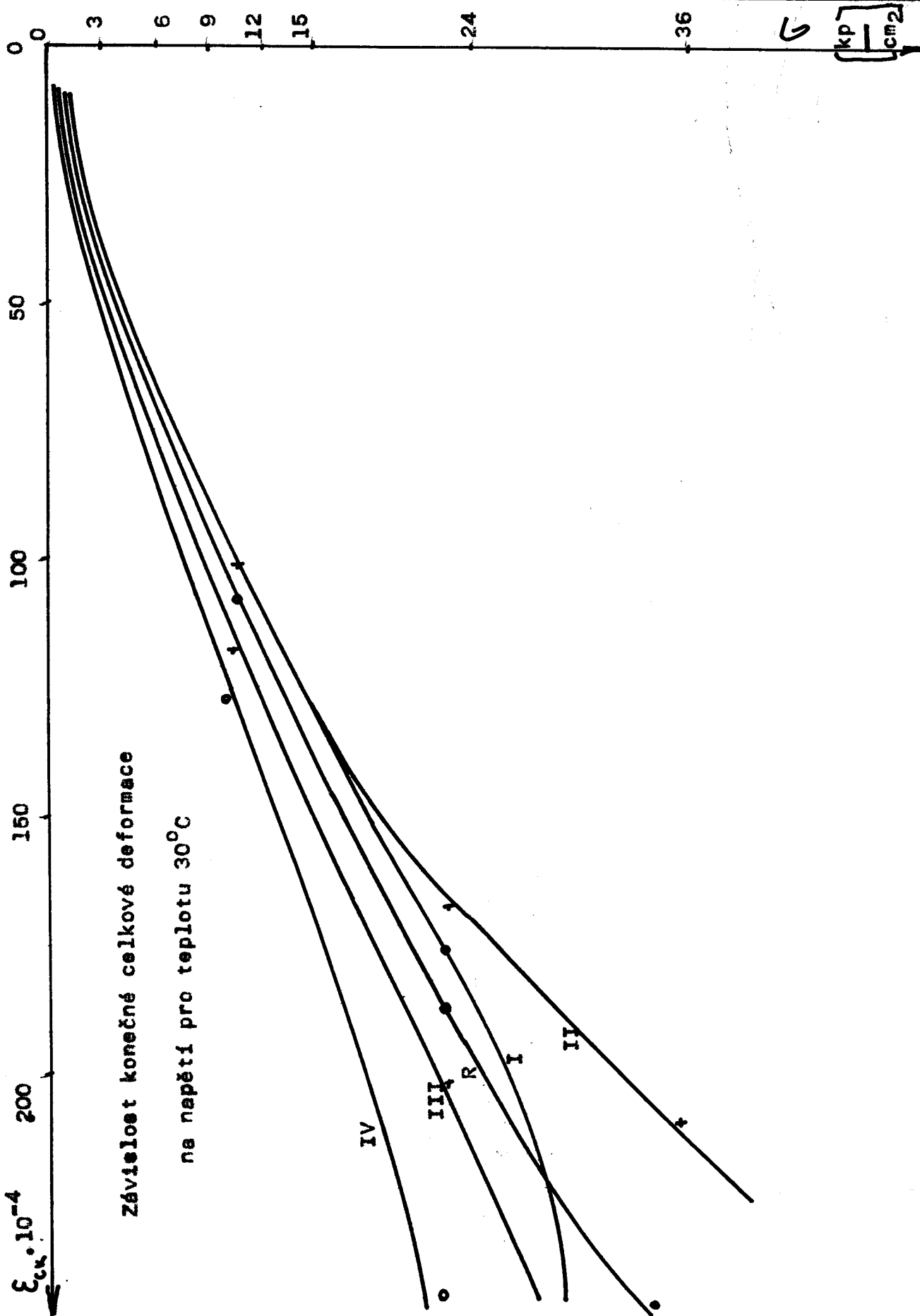




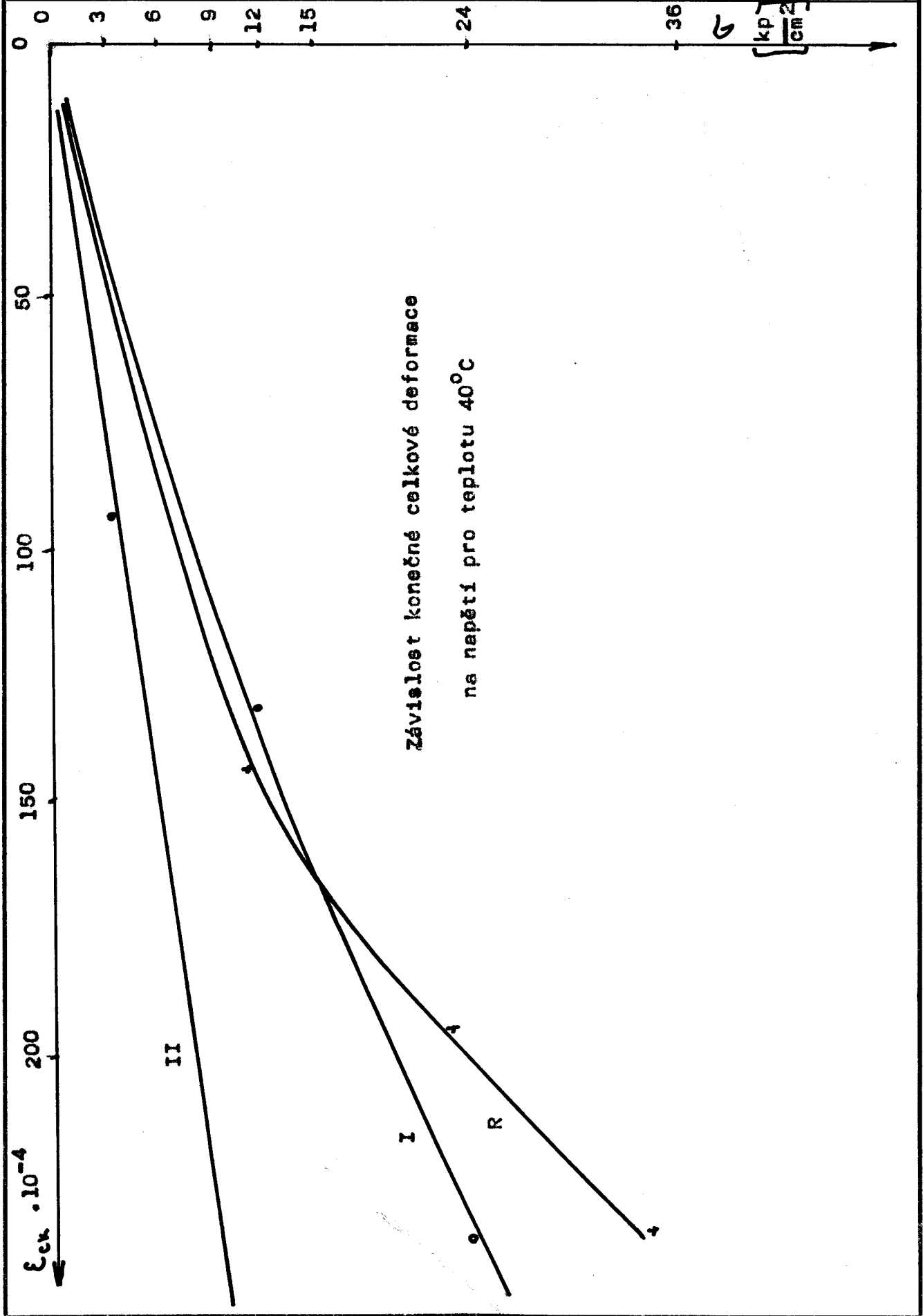


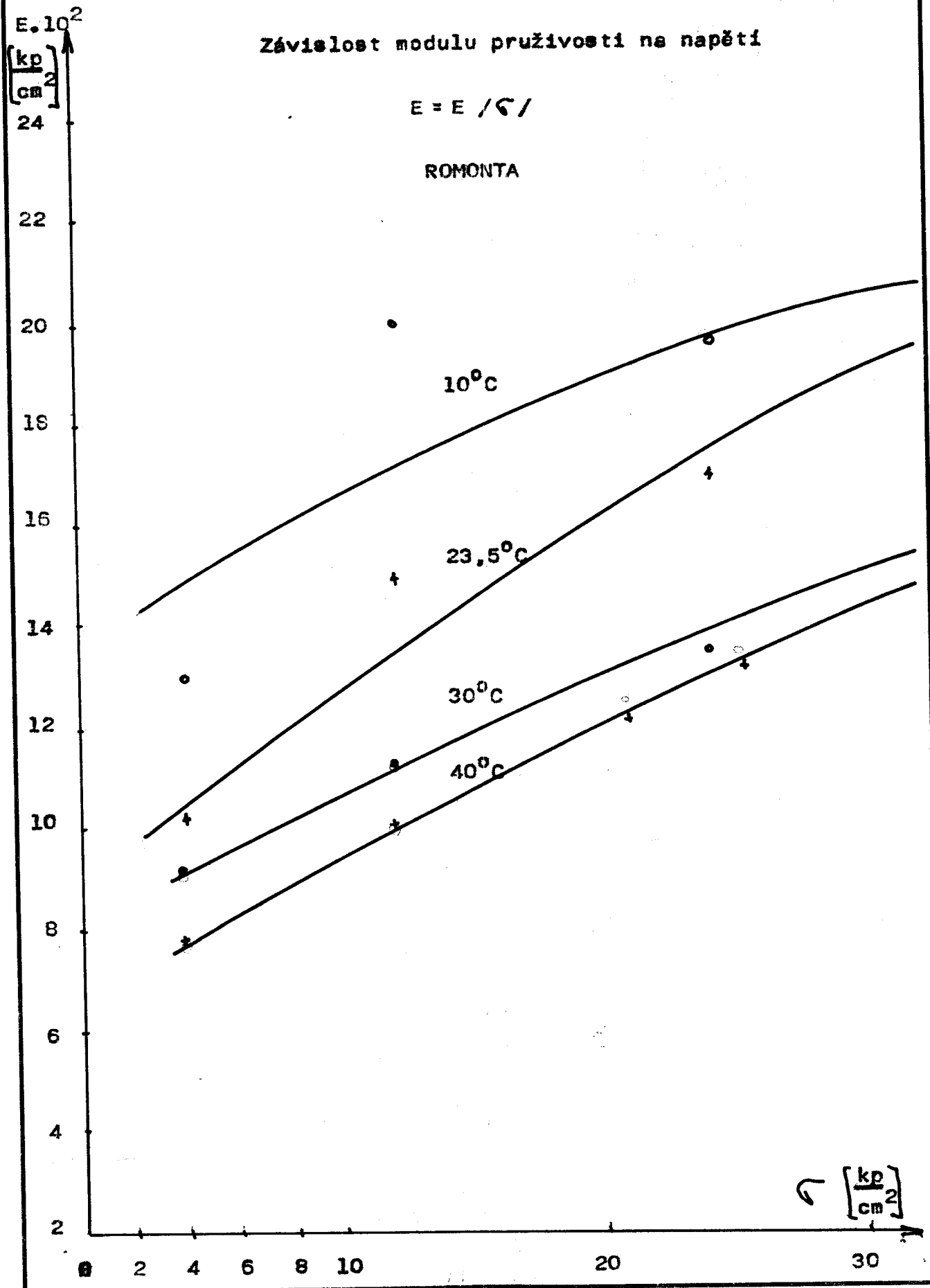


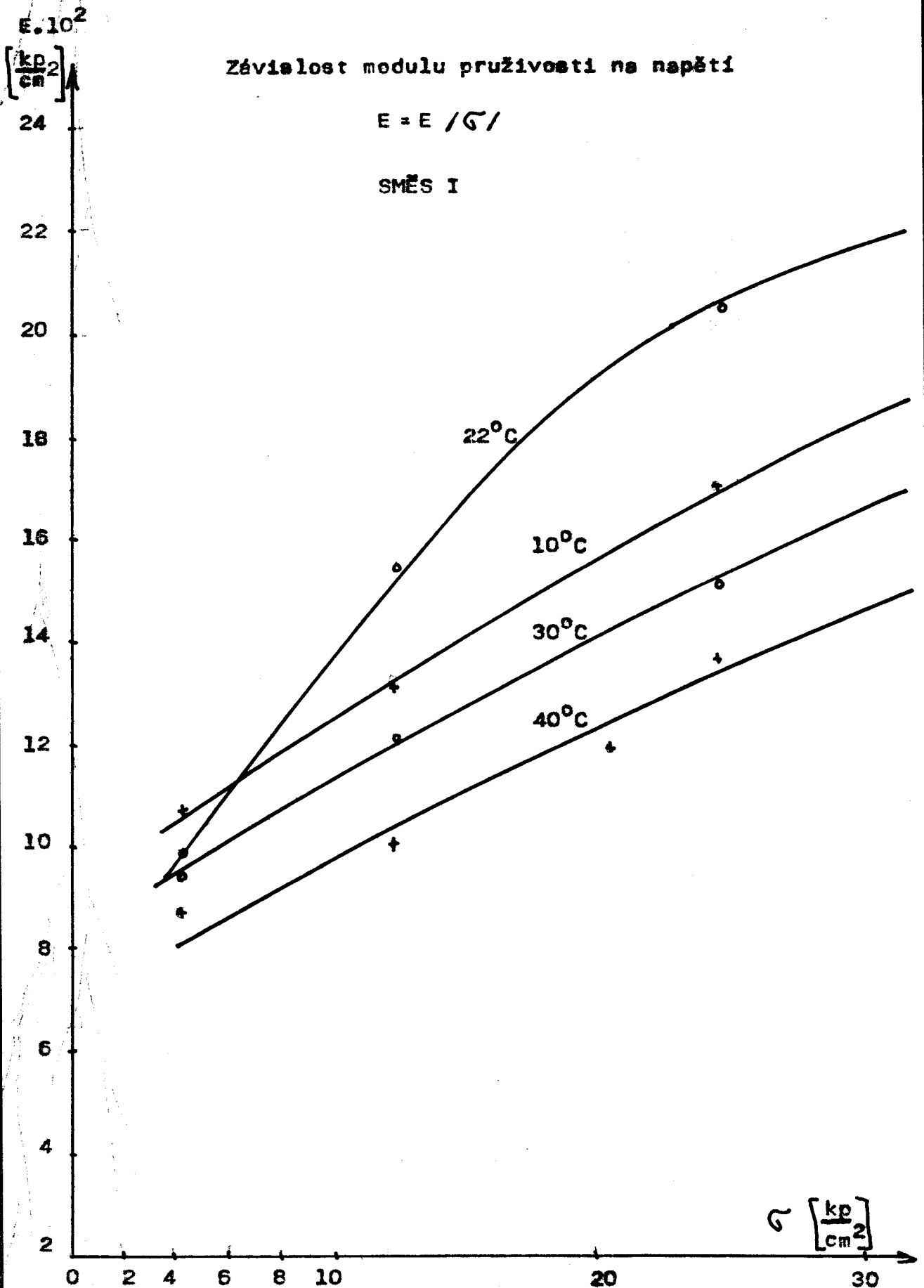




VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	43.







$E \cdot 10^2$

Závislost modulu pruživosti na napětí

 $E = E / \epsilon$

SMĚS II

24

22

20

18

16

14

12

10

8

6

4

2

10°C

23,5°C

30°C

40°C

 $\sigma \left[\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \right]$

0

2

4

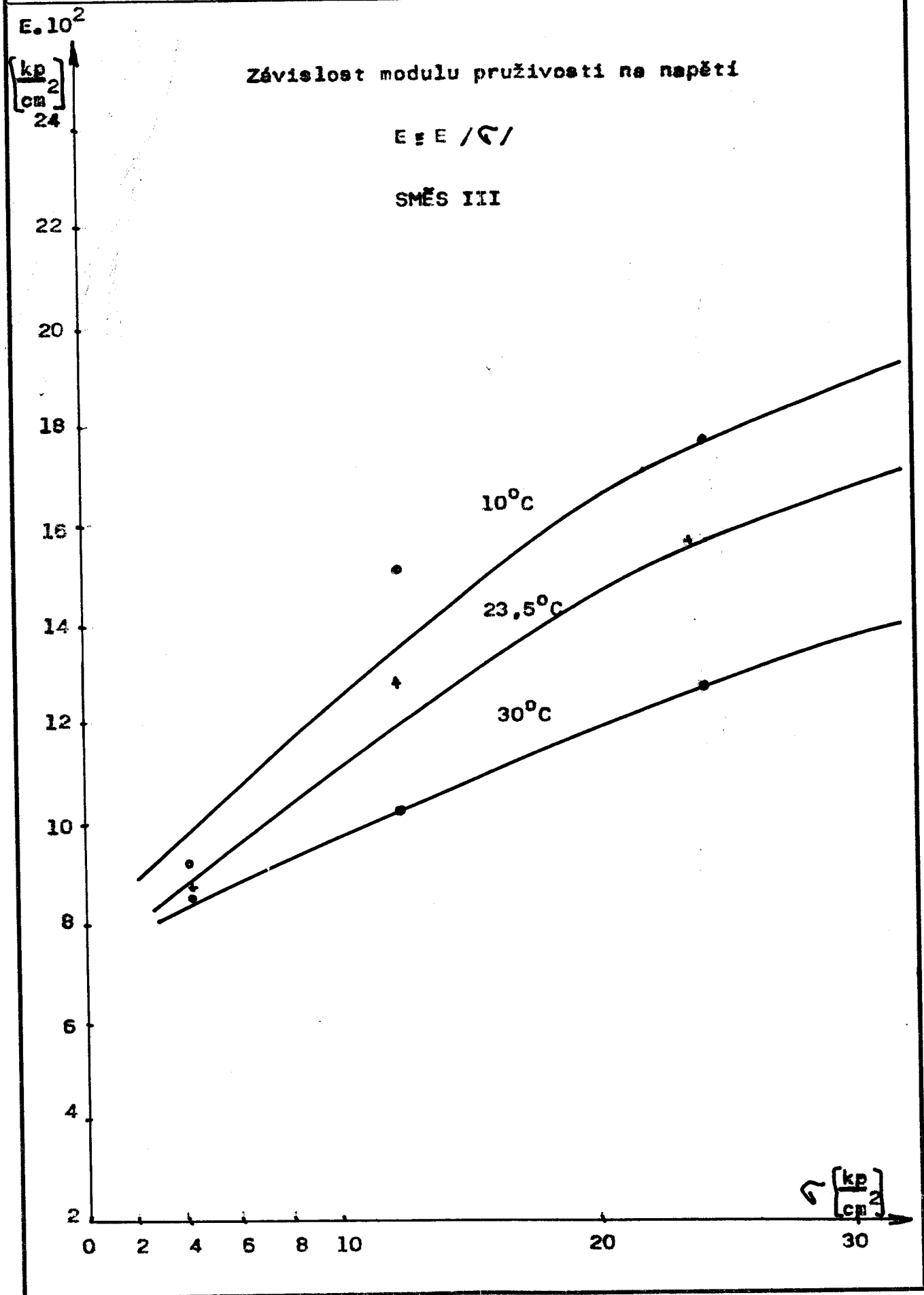
6

8

10

20

30



E.102

 $\left[\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \right]$

Závislost modulu pruživosti na napětí

$$E = E / \sigma$$

SMĚS IV

22

20

18

16

14

12

10

8

6

4

2

0

2

4

6

8

10

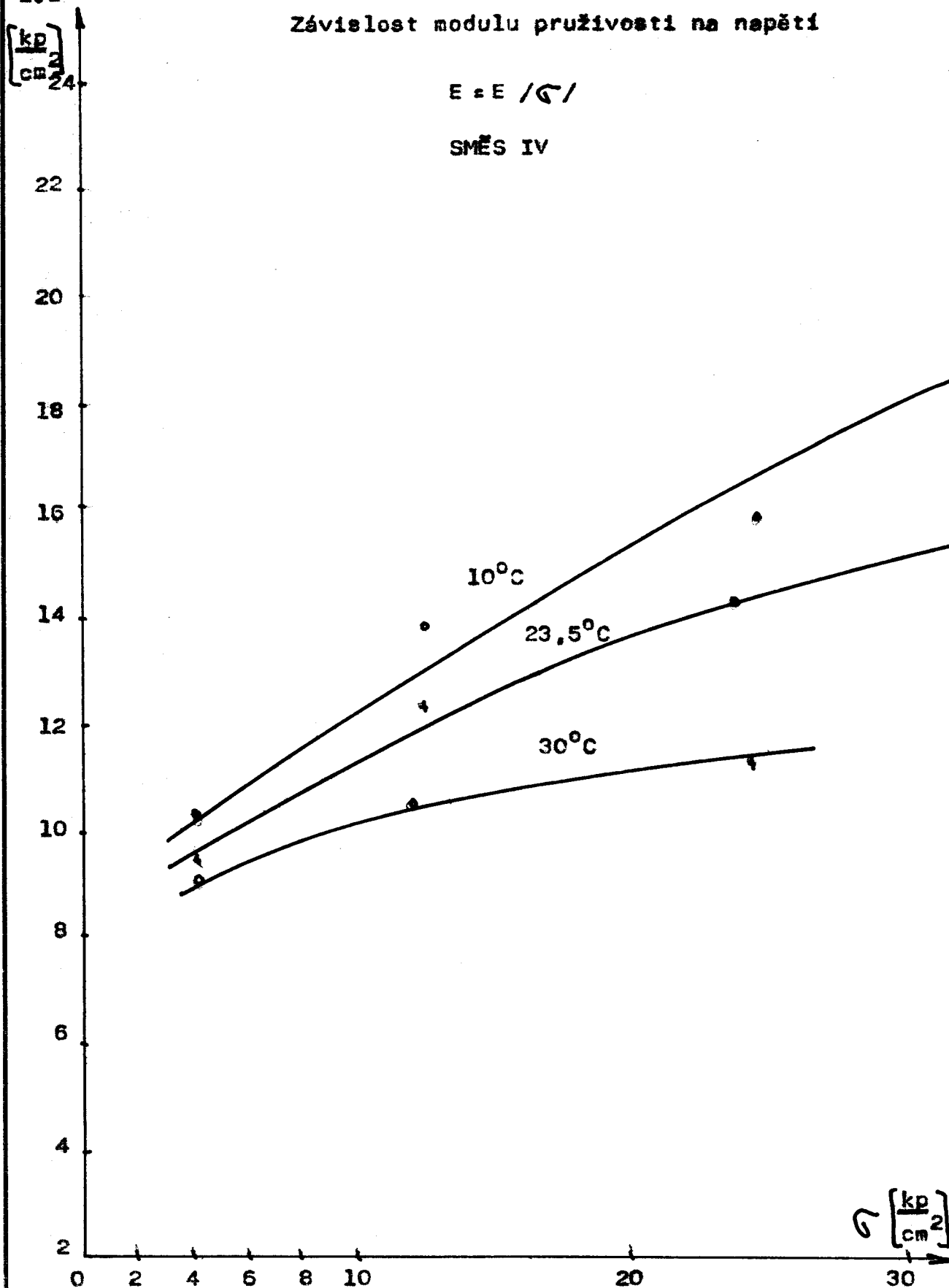
20

30

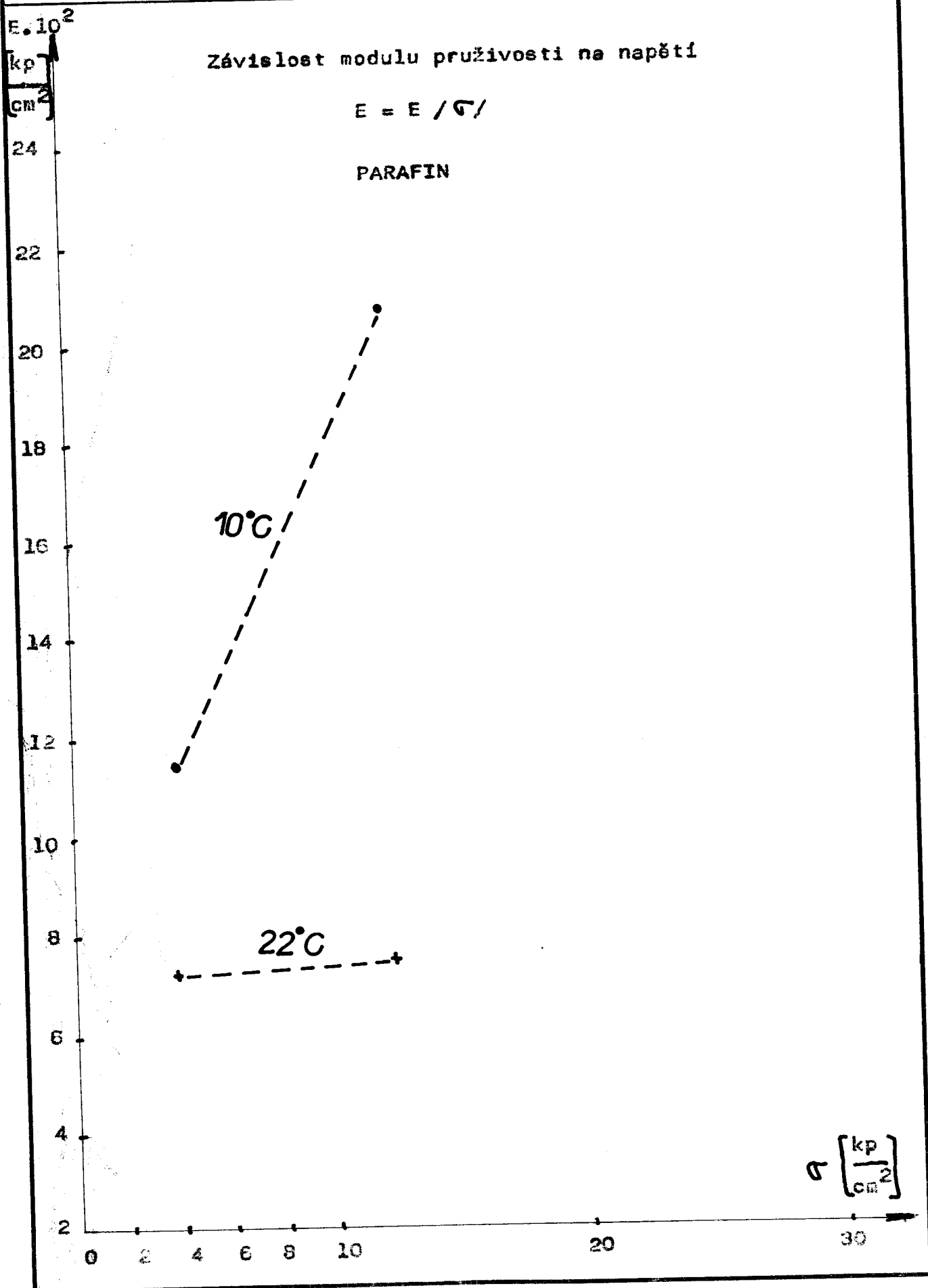
10°C

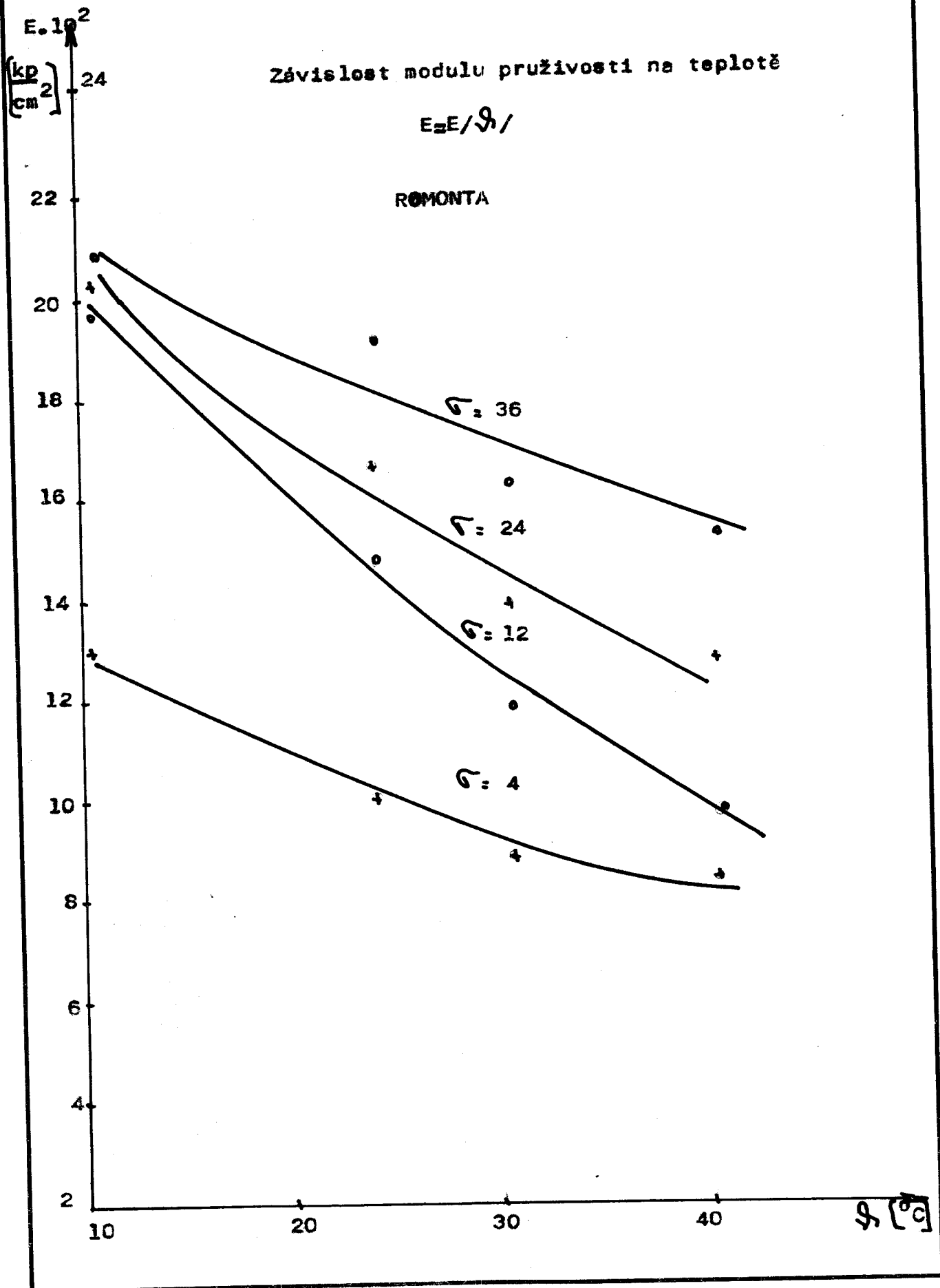
23,5°C

30°C

 $\sigma \left[\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \right]$ 

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP -ST -1030/73	
Fakulta strojní		KTM	49.



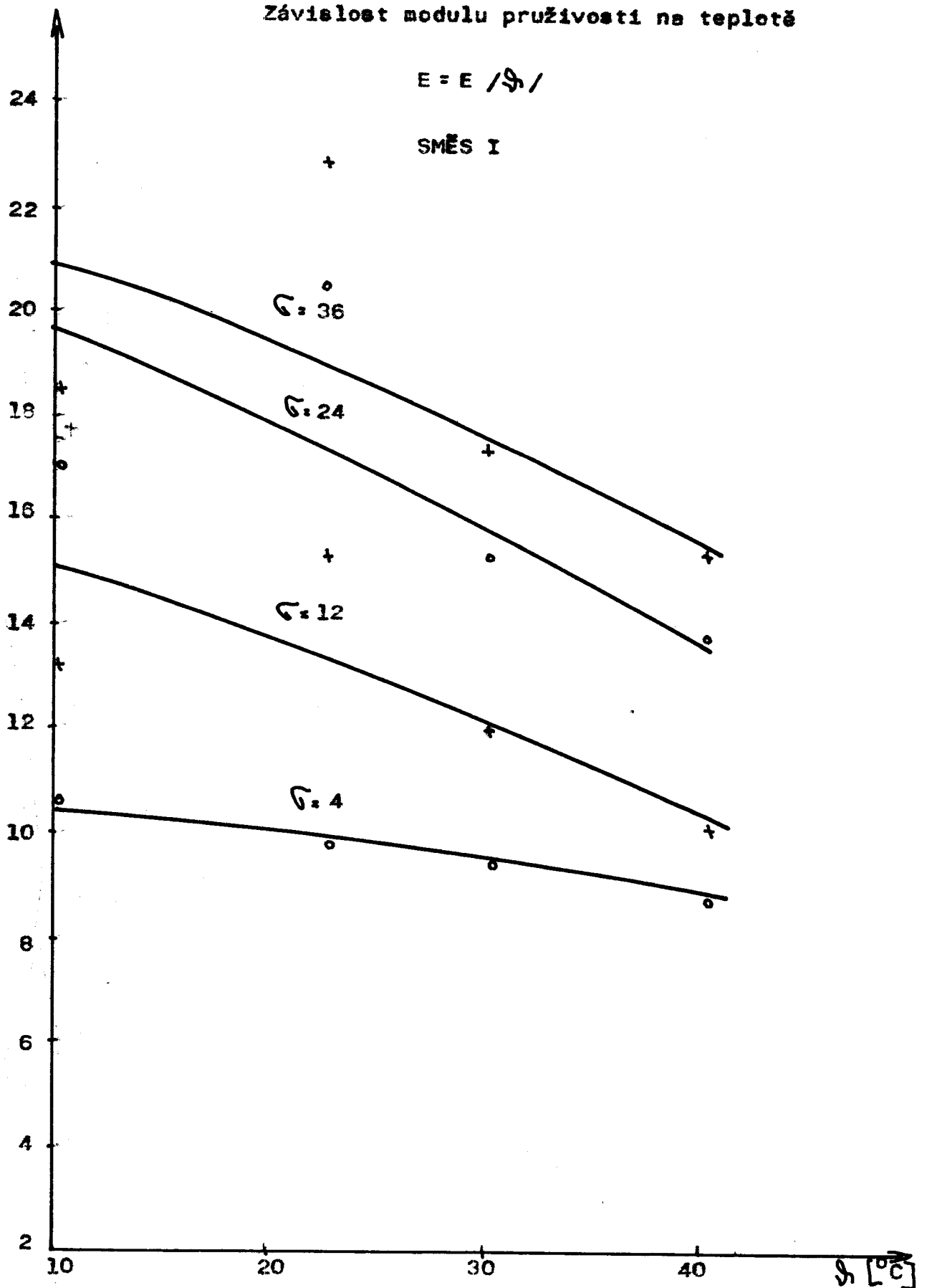


$E \cdot 10^2$

Závislost modulu pruživosti na teplotě

$E = E / \rho /$

SMĚS I

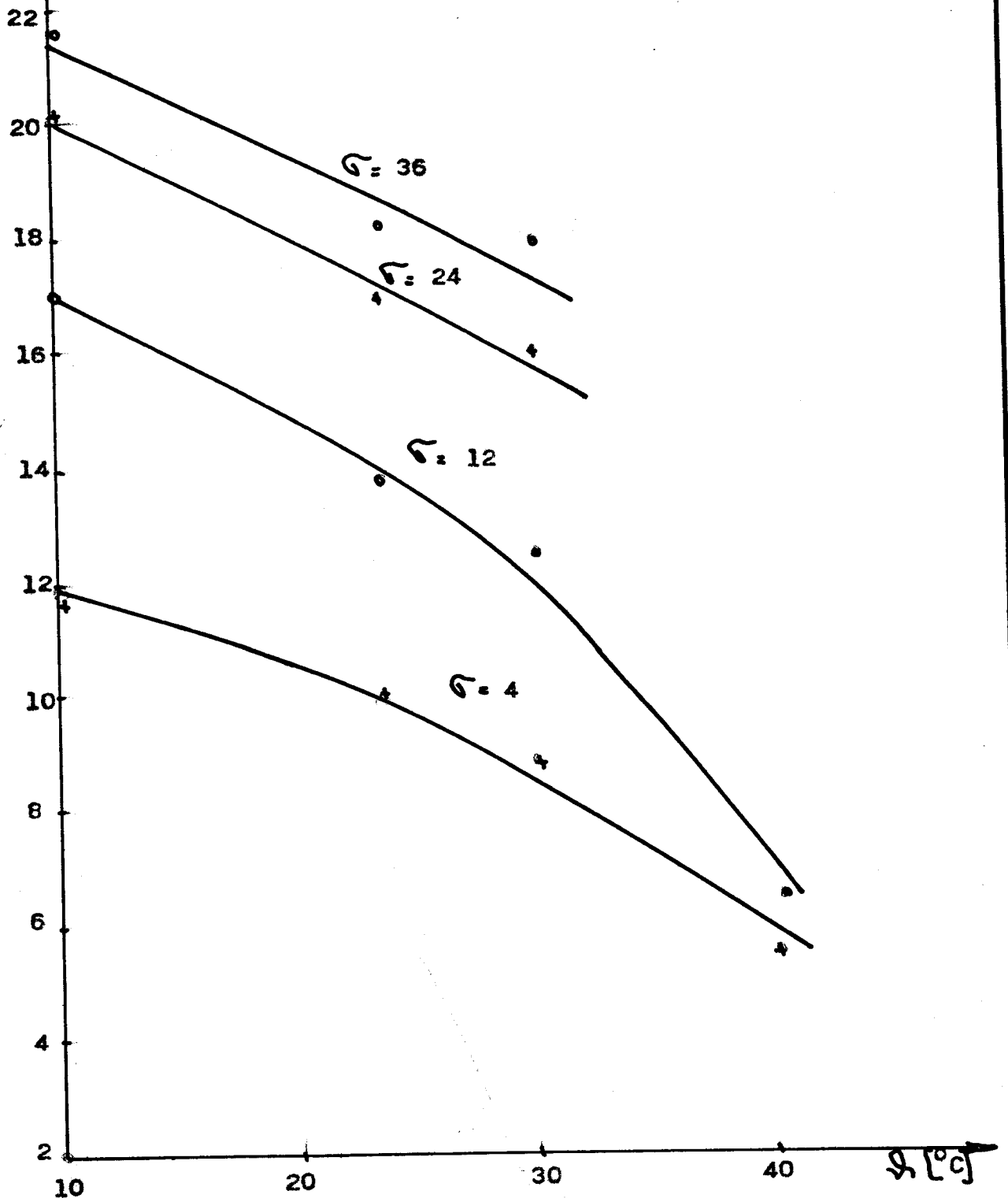


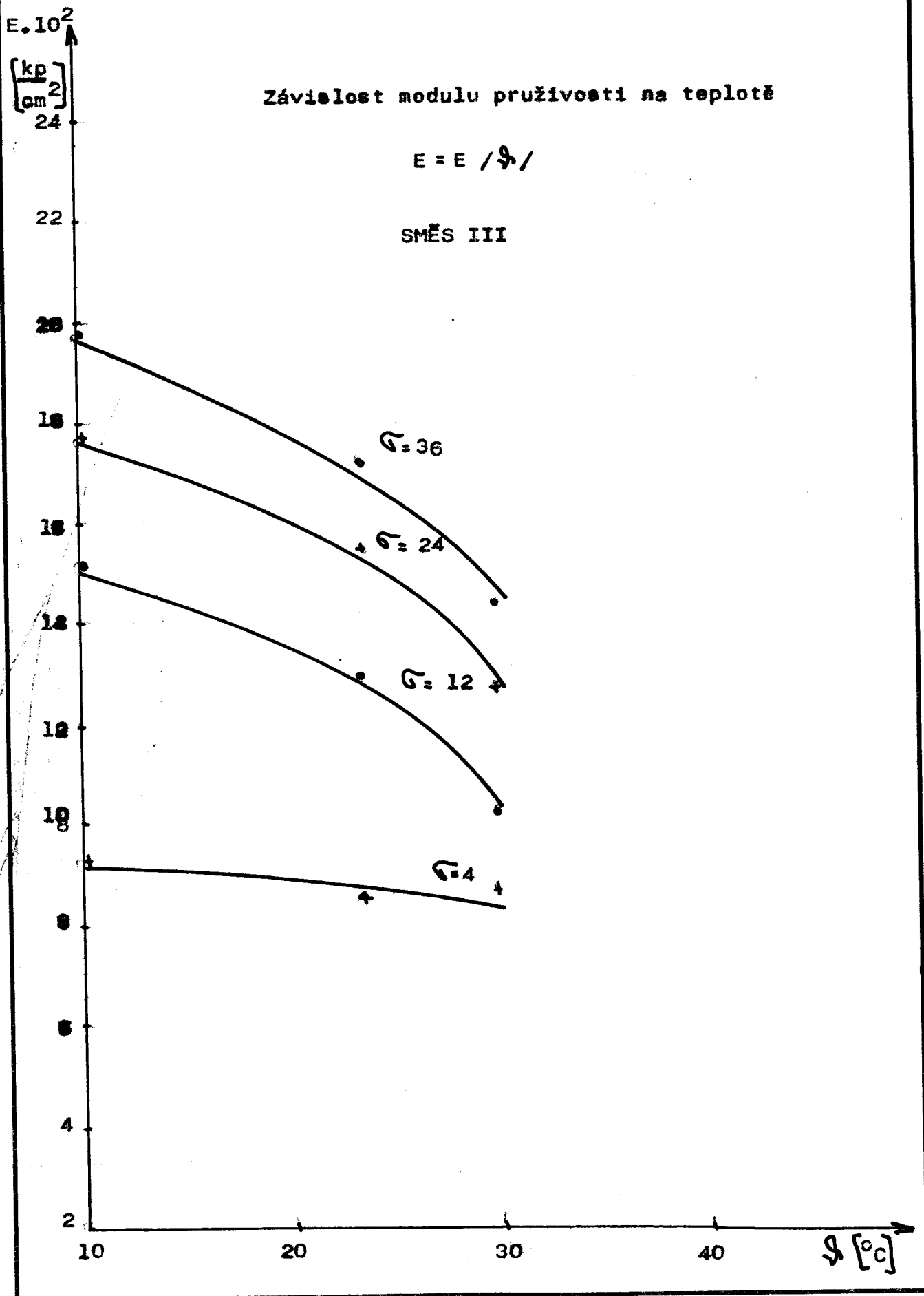
$E \cdot 10^2$ $\left[\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \right]$

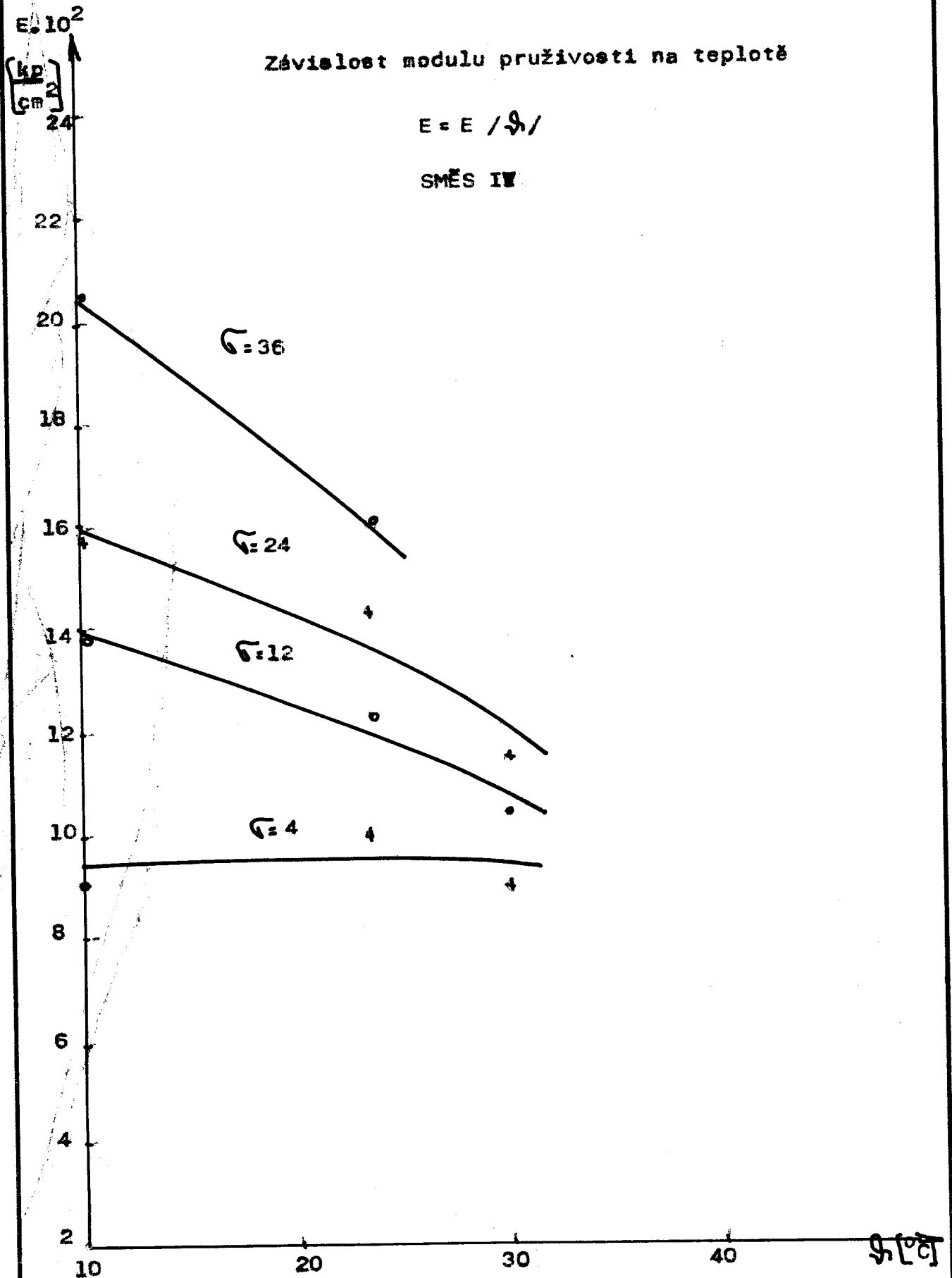
Závislost modulu pruživosti na teplotě

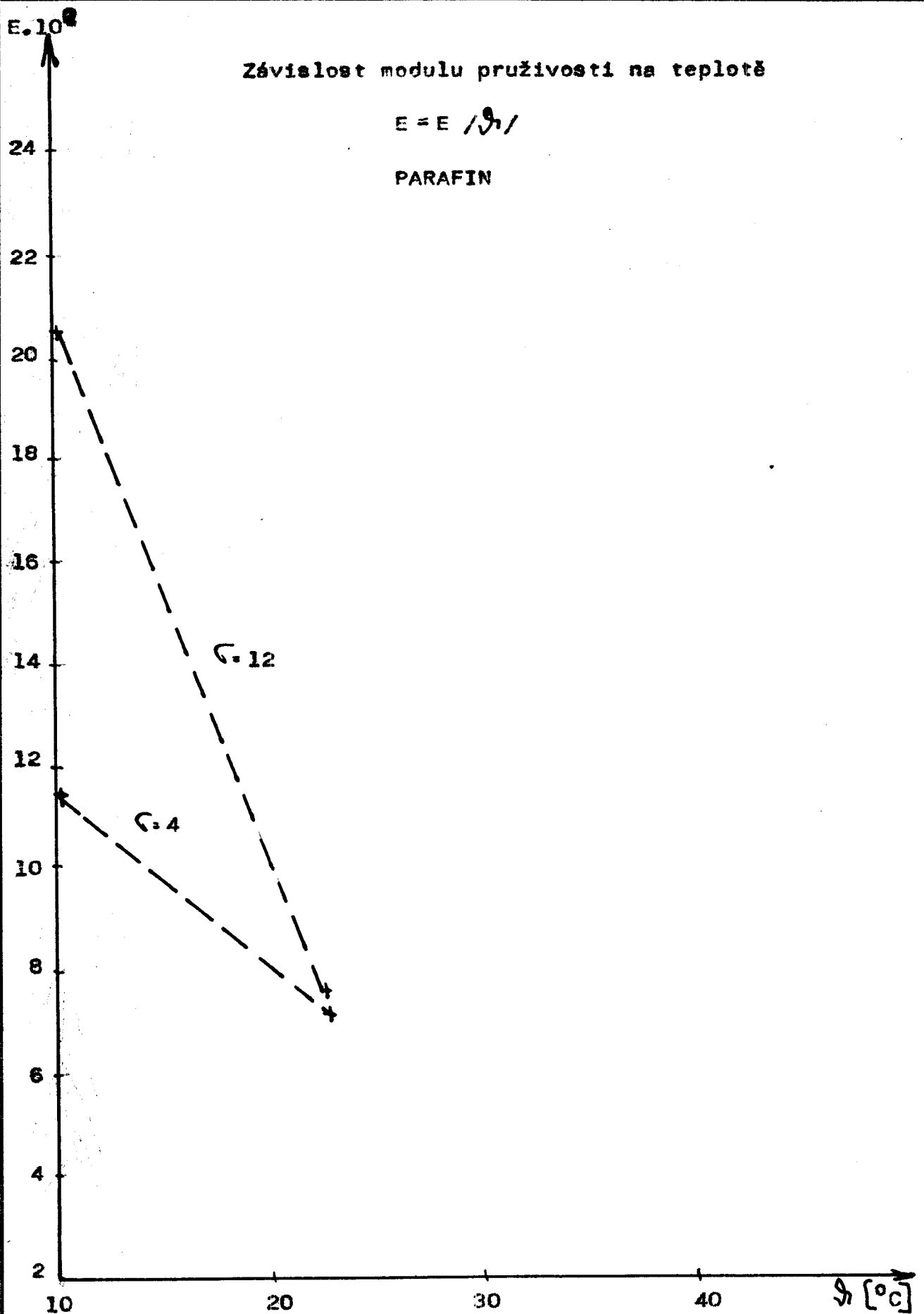
$$E = E / \Delta V$$

SMĚS II









VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73
Fakulta strojní		KTM 56.

10. 2. Zkouška ohybem (obr. 25)

Pro zkoušku ohybem jsem připravil vzorky o rozměrech 10 x 10 x 150 mm, a to z těchto materiálů:

1. parafín R 56/58 - ozn. P
2. směs I : 80% Romonty + 20% parafínu - ozn. I
3. směs II: 60% Romonty + 40% parafínu - ozn. II

Zkouška ohybem je velmi citlivá, takže jsem pro uvedené materiály mohl zachytit pružné deformace a ze vzorce pro výpočet průhybu při pohybu

$$y = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E_p \cdot I} \quad (25)$$

spočítat modul pružnosti

$$E_p = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot y \cdot I} \quad (26)$$

$$\text{kde } I = \frac{a^4}{12} \quad (27)$$

$$\text{a tedy } E_p = \frac{P \cdot l^3}{4 \cdot y \cdot a^4} \quad (28)$$

kde P je zatěžovací síla [kp],
 l je vzdálenost podpor 100 mm,
 y je průhyb [mm],
 a je délka stěny vzorku [mm].

Pro výpočet napětí při ohybu platí vzorec:

$$\sigma_{oh} = \frac{P \cdot l}{4 \cdot W} \quad (29)$$

$$\text{kde } W = \frac{a^3}{6} \quad (30)$$

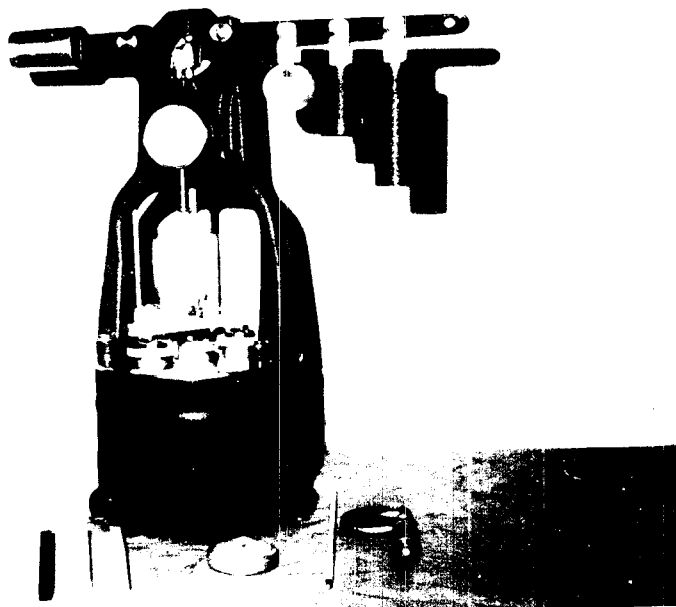
$$\text{a tedy } \sigma_{0H} = \frac{1,5 \cdot P \cdot l}{a^3} \quad (31)$$

Pro různé zatěžovací síly jsem pro všechny tři materiály zjišťoval průhyby a z (28) a (31) zjistil modul pružnosti E_p a napětí σ a získal grafickou závislost :

$$E_p = E_p(\sigma) \quad (32)$$

pro teplotu $22,5^\circ\text{C}$.

Materiál "Romonta" byl při těchto pokusech natolik křehký, že už při nejnižších zatížení praskal a proto jsem jej ani v tabulce č. 5 neuvedl.



obr. 25

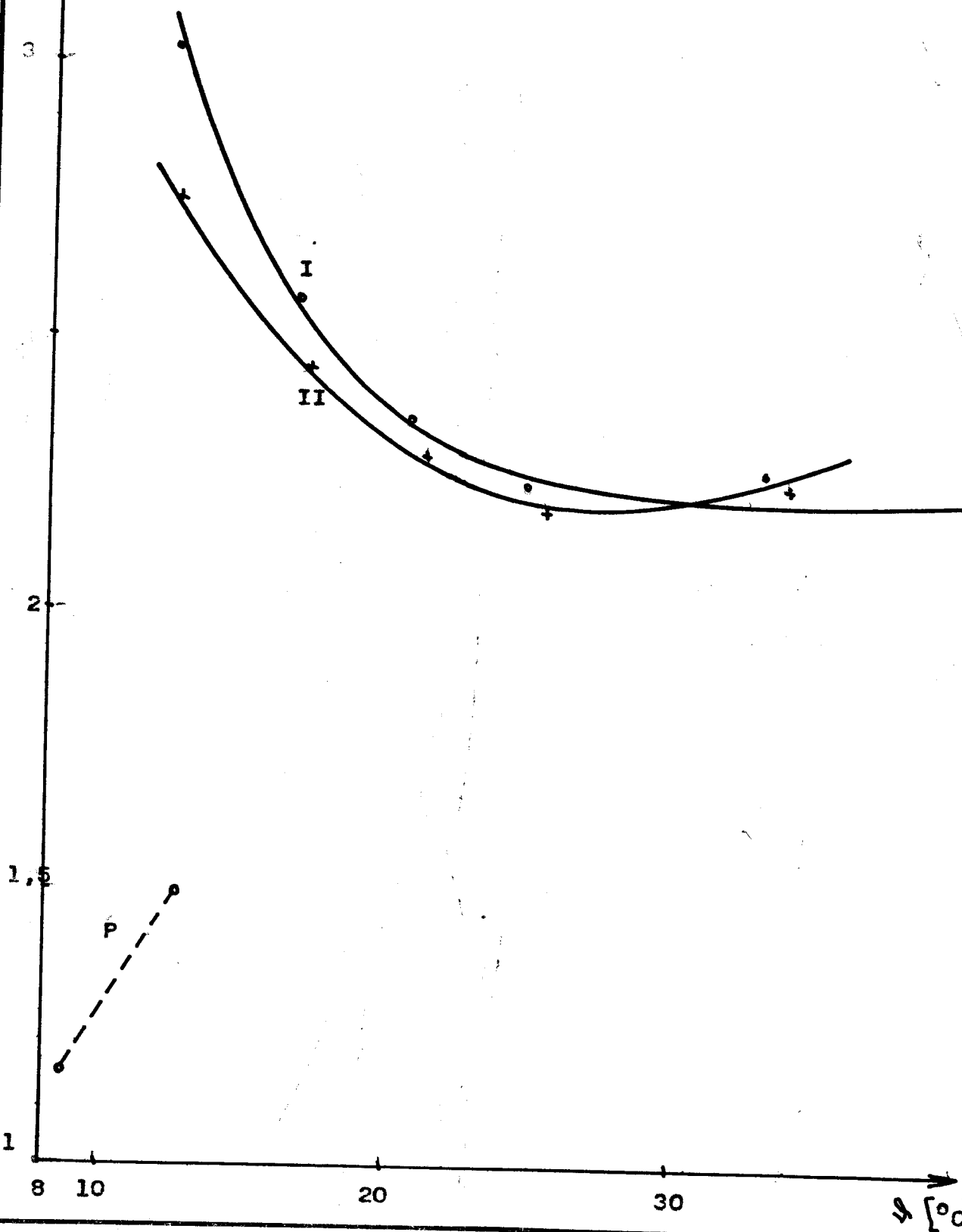
Tabulka č.5

MATERIÁL	P [kp]	y [cm]	σ_{oh} [kp/cm ²]	E_p [kp/cm ²]
PARAFIN	0,25	0,004	4,2	17500
	0,50	0,012	8,4	11670
	0,75	0,014	12,4	15000
SMĚS I	0,75	0,007	12,4	30381
	1,00	0,011	16,5	25780
	1,25	0,015	20,6	23630
	1,50	0,019	24,7	22586
	2,00	0,025	33,0	22685
	2,50	0,032	41,2	22153
	3,00	0,040	49,4	21267
SMĚS II	0,75	0,008	12,7	27595
	1,00	0,012	16,9	24530
	1,25	0,016	21,2	22996
	1,50	0,020	25,4	22076
	2,00	0,026	33,9	22642

$E \cdot 10^4$

Závislost modulu pružnosti na napětí

pro

PARAFIN, SMĚS I, SMĚS II při teplotě $22,5^{\circ}\text{C}$ 

11. Vyhodnocení výsledků měření

Porovnáním tlakových diagramů na stranách 36 - 43 pro jednotlivé materiály je jasně vidět rozdílnost jednotlivých křivek pro čas zatěžování 30 vt., tedy v době poměrně krátce po začátku pokusu, a pro čas, který odpovídá ukončení první fáze pokusu, kdy změny celkové deformace při zatěžování jsou již velmi malé. Protože pružně deformace postupují materiálem velice rychle, je z těchto dvou křivek (pro každý materiál a teplotu) jasně vidět vliv pruživosti.

Dále je možné z těchto tlakových diagramů pro určitou teplotu a dobu zatěžování usuzovat na funkční závislost mezi tvarem tlakového diagramu a chemickým složením směsi. Např. z diagramu na str. 41, tedy pro teplotu 23,5°C a čas, který odpovídá ukončení zatěžování (viz obr. 25) je vidět, že parafín se již při nízkých napětí prudce přiklání k ose poměrných deformací. Dále postupně následuje směs IV, směs III, směs II a pouze směs I a Romonta mají polohu svých grafů vyměněných. Dále je možno z grafů na str. 50 - 55 usuzovat na závislost modulu pruživosti na teplotě při konstantních napětí

$$E = E(\vartheta) \quad ; \quad \sigma = \text{konst.} \quad (33)$$

Z těchto grafů jasně vyplývá, že velikost modulu pruživosti z teplotou (při konstantních napětí) klesá, a že tedy velikost poměrné pruživé deformace s teplotou stoupá. Tato funkční závislost mezi modulem pruživosti a teplotou je pro vyšší zatěžovací tlaky posunuta k vyšším hodnotám modulu pruživosti E.

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	61.

Z dalších grafů na str. 44 - 49 je možno usuzovat na závislost mezi modulem pruživosti a napětím, které může být v praxi reprezentováno např. dotlačovacím tlakem při výrobě žádaných voskových modelů. Z těchto diagramů je patrné, že při konstantní teplotě velikost modulu pruživosti s napětím stoupá. V tomto případě se však nedá jednoznačně určit zda velikost poměrné pruživé deformace s napětím stoupá nebo klesá. Je ovšem zřejmé, že tato funkční závislost je pro nižší teploty posunuta k vyšším tlakům. Jak je ale vidět z polohy jednotlivých grafů a k nim příslušných naměřených bodů, jsou jednotlivá měření zatížena poměrně velkými chybami. Především pro nízká napětí, kdy voskový váleček nepřenášel zatížení v celé stykové ploše, jsou tyto odchylky evidentní. Ani při velmi pečlivém ručním zabrušování voskového válečku na metalografickém papíře nebylo totiž možno dosáhnout dokonalé rovinnosti a rovnoběžnosti stykových ploch. Teprve od určitého zatížení, kdy plastické deformace překročily hodnotu nerovnosti stykových ploch, se napětí přenášelo v celém průřezu. Velikost těchto plastických deformací je pro jednotlivé materiály, napětí a teploty patrná z tabulek 1 - 4 na str. 32 - 35.

Jak již bylo řečeno, bylo pro zjišťování závislosti modulu pružnosti E_p na napětí pro teplotu $22,5^\circ\text{C}$ použito ohybové zkoušky. Z grafů na str. 53 je vidět, že velikost modulu pružnosti se stoupajícím napětím nejprve prudce klesá a po dosažení určité hodnoty napětí začne mírně stoupat. Toto však neplatí pro parafín R 56/58, kde však byly před deformací tyčky naměřeny pouze dvě hodnoty modulu pružnosti E_p , a nelze tedy z dosud provedených experimentů jednoznačně určit u tohoto materiálu funkční závislost $E_p = E_p(\sigma)$. Provedení přístroje totiž neumožnilo zatížit materiál velmi nízkými napětími.

Tento problém lze překlenout zmenšením vzdálenosti podpor nebo zvětšením průřezu vzorku. Tyto úpravy už nebylo z časových důvodů možno provést.

Jak vyplývá ze zmíněných tabulek 1 - 4 na str. 32-35, nemohl jsem ze svých pokusů zjistit nějakou funkční zákonitost mezi velikostí poměrné plastické deformace a napětím a velikostí poměrné plastické deformace a teplotou. Určení těchto funkčních závislostí

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{pl}(\sigma), \quad (34)$$

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{pl}(\dot{\sigma}), \quad (35)$$

by si vyžádalo daleko podrobnějšího zkoumání, které by přesáhlo rámec této diplomové práce. Rovněž by byl pro pokusy nutný přístroj s daleko větší přesností.

Na jednom pokusu jsem zkoumal pro směs I a teplotu 22°C funkční závislost mezi velikostí poměrné plastické deformace a dobou zatěžování.

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{pl}(\tau). \quad (36)$$

Jeden vzorek ze zkoumaného materiálu jsem zatěžoval i odlehčoval 4 min. a po této době jsem zjistil velikost plastické deformace. Další vzorek jsem stejným způsobem zatěžoval 30 min. a po stejně dlouhé době odlehčení jsem zjistil velikost ϵ_{pl} . Bohužel ani v tomto případě jsem nezjistil funkční závislost dle (36). I toto měření by si vyžádalo daleko podrobnějšího zkoumání přesnějším přístrojem.

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
Fakulta strojní		KTM	63.

12. Závěr

Z praktického hlediska se tedy potvrdilo, že vosky a voskové směsi se chovají jako nesterjnorodá pružnovláčná hmota a dají se tedy popsat modelem podle obr. 19. Při nízkých rychlostech zatěžování se tedy v materiálu objevují při libovolných napětí deformace pružné, pruživé a plouživé (plastické). Jen při vysokých rychlostech zatěžování i odlehčování vznikají deformace, které lze považovat za deformace pružné. V tomto případě by se vosky svým chováním blížily chování kovu.

Jak potvrdily pokusy, významnou úlohu při deformaci vosku hraje vliv pruživosti, tedy změna rozměrů při odlehčení s časem. Při zkoušce tlakem je velikost pružných a plastických deformací poměrně zanedbatelná v porovnání s deformacemi pruživými, kdežto u ohybové zkoušky je nutno brát v úvahu všechny tři druhy deformací.

Aplikace těchto znalostí je tedy důležitá pro praktické použití, především při přípravě a navrhování voskových vytavitelných modelů. Je zde nutné, aby tyto voskové modely zachovávaly tvarovou, objemovou i rozměrovou stálost.

Zjistil jsem, že parafín R 56/59 značně poškozuje plasticitu a elasticitu směsí. U tohoto materiálu probíhají současně všechny 3 druhy deformací, přičemž deformace pružná je poměrně nízká, pruživá větší a největší hodnotu má u parafínu deformace plastická. Tato zákonitost se projevuje i u směsí s vysokým procentem parafínu. S klesajícím procentem parafínu ve směsi předěpodobně klesá důležitost plastických deformací a stoupají naopak deformace pružné a pruživé.

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP - ST - 1030/73	
		KTM	64.
Fakulta strojní			

které tedy s časem vymizí. To potvrzují pokusy, které byly prováděny se směsmi s vysokým procentem "Romonty", kde při měření pružných deformací až do ohybového napětí kolem 40 kp/cm^2 měla plastická deformace zanedbatelnou hodnotu, pružné deformace byly snadno měřitelné a pruživé deformace byly několikrát větší než pružné. Pro rozměrovou a stálost modelů je tedy rozhodující, aby byla použita směs s dostatečně vysokým procentem monténního vosku a aby napětí, vznikající v modelu jeho vlastní vahou nepřekročilo hodnotu přípustné tolerance.

To, že poznáme další technologické vlastnosti vosku a voskových směsí, bezesporu pomůže k výrobě kvalitnějších směsí pro voskové modely, což je jednou z podmínek zkvalitnění výroby odlitků metodou vytávitelného modelu.

Závěrem bych chtěl poděkovat katedře slévárenství a technologie, vedené s. Prof. Ing. B. Odstrčillem, která mi poskytla pomoc při řešení úkolu. Především chci poděkovat s. Ing. J. Spalovi, který mi poskytl své zkušenosti a cenné rady.

V Liberci, dne 4. července 1973

Rudolf Klouček

VŠST Liberec	Měření plast. a elast. vosků a voskových směsí	DP -ST-1030/73	
Fakulta strojní		KTM	65.

13. Použitá literatura

- 1) Lakejev, Borisov: Osnovy reologii modelných materiálův
Izdat. Naukova Dumka, Kijev 1971
- 2) Šklennik : Litje po vyplevjažemym modeljam
Izdat. Mašinstrojenje, Moskva 1971
- 3) Ovčinnikov : Reologija tiksotropnych sistem
Izdat. Naukova Dumka, Kijev 1972
- 4) Sobotka : Theorie plasticity - 1. díl
Nakladatelství ČSAV 1954
- 5) Doškář : Přesné lití do keramických forem
Praha 1961
- 6) Časopis Giesserei, ročník 1968, sešit 16, 12. srpna 1971
- 7) Diplomní práce: Kraus: Studium základních technologických vlastností vosků a voskových směsí
(vedoucí s. Prof. Ing. B. Odstrčil)
Liberec 1969