TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Jiří Votoček

Studium deformačních charakteristik grafitických litin

Diplomová práce

1999

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra strojírenské metalurgie Studijní rok: 1998/99

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Jiří VOTOČEK**

obor **23 - 07 - 8 Strojírenská technologie**
zaměření **Strojírenská metalurgie**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Studium deformačních charakteristik grafitických litin.

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte dosavadní práce o chování grafitických litin při různých stupních napjatosti v tahu (příp. v ohybu).
2. Seznamte se s navrženým a připraveným měřícím zařízením, ověřte jeho funkci a způsob registrace hodnot při zkoušce tahem.
3. Navrhněte sérii měření deformačních charakteristik vzorků šedé a tvárné litiny a ověřte dosud připravené programy pro zpracování výsledků.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a aplikovatelnost programu, navrhněte příp. úpravy programu nebo experimentů.

KSM/SM
54 s., 48 s. příl.
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Univerzitní knihovna
Voronězská 1329, Liberec 1
PSČ 461 17
V 142/99 S

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva	cca 50 stran
- grafické práce	výkresy, tabulky a grafy (k doplnění textu)

Seznam literatury :

[1] EXNER,J.,ČECH J.: Hodnocení vlastností litin podle tahových deformačních charakteristik - Slévárenská ročenka 1993

[2] NĚMEC,J., aj.:Tvarová pevnost kovových těles. Praha 1971

[3] NĚMEC,J.: Tuhost a pevnost ocelových částí. Praha 1961

[4] PÍŠEK,F., JENÍČEK.: Nauka o materiálech, díl II. 1962

[5] PLUHAŘ, j. a kol.: Nauka o materiálech, Praha 1989

[6] SKRBEK, B.: Mechanické vlastnosti litin v odlitcích = In.: Metal 95, díl II., s. 164

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.

Konzultant diplomové práce:

L.S.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI FAKULTA STROJNÍ

Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.
vedoucí katedry

Doc. Ing. Ludvík Prášil, CSc.
děkan

V Liberci dne 28.2.1999

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Obor 23-07-8

Strojírenská technologie

Zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské metalurgie

Studium deformačních charakteristik grafitických litin

Jiří Votoček

KSM-479

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Jaroslav Exner, Csc., TU Liberec

Konzultant : Ing. Milan Havel

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	:	54
Počet tabulek	:	6
Počet obrázků	:	17
Počet příloh	:	48

Diplomová práce

TÉMA: STUDIUM DEFORMAČNÍCH CHARAKTERISTIK GRAGITICKÝCH LITIN

ANOTACE: V práci jsou shrnuty základní informace o chování grafitických litin při statickém namáhání v tahu. Pozornost je věnována problematice určování mezních stavů grafitických litin při různých stupních napjatosti s ohledem na charakter vyloučení grafitu, základní kovové hmoty a stupně dokonalosti modifikace.

THEME: STUDY OF GRAPHIT CAST IRON CHARAKTERISTIC DEFORMATION

ANOTATION: Main informations of graphit část iron behaviour during static tensile stress are summarize in pursuit. Aim of work is to determine the problematic of limiting state of graphit část iron during different rates of stress respekt to the character of graphit separation, base metall matter and rate of perfekt modification.

Poděkování.

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Prof. Ing. Jaroslavu Exnerovi, Csc.,za cenné připomínky a rady, současně děkuji i konzultantovi Ing. Milanu Havlovi za poskytnutou pomoc. Dále též děkuji Doc. Ing. Ivě Nové, Csc., Stanislavu Vorlovi, Milanu Vyvlečkovi a Evě Pokorné.

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

V Liberci 15. května 1999 VOTOČEK JIŘÍ

OBSAH

strana:

1. ÚVOD 7

2. TEORETICKÁ ČÁST 8

2.1. Litiny 8
2.1.1. Rozdělení litin 9
2.1.2. Grafitické litiny 10
2.1.3. Strukturní složky grafitických litin 11
2.1.4. Grafit 11
2.1.5. Základní kovová hmota litiny 12
2.1.6. Mechanické vlastnosti grafitických litin 13

2.2. Současný stav kontroly materiálu litinových odlitků 14
2.2.1. Zkoušení některých mechanických vlastností grafitických litin 14
2.2.2. Destruktivní zkoušky 15
2.2.3. Nedestruktivní zkoušky 16
2.2.4. Nedostatky dosavadního hodnocení tahové zkoušky 17

2.3. Hodnocení vlastností litin podle tahových deformačních charakteristik 18
2.3.1. Nová metodika hodnocení tahových deformačních charakteristik 19
2.3.2. Teorie mikroplastických deformací 20
2.3.3. Řešení a rozbor deformačních charakteristik grafitických litin 22
2.3.4. Netradiční způsob vyhodnocení deformačních charakteristik grafitických litin 24
2.3.5. Vyhodnocení měření plynulé deformační tahové charakteristiky 26
2.3.6. Mezní stavy při stanovení deformační charakteristiky 27
2.3.7. Závěry hodnocení tahové deformační charakteristiky 29

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST ..29

3.1. Úvod do experimentu ..29

3.1.1. Trhací zařízení pro tahovou zkoušku ..30

3.1.2. Měřící zařízení HBM ..30

3.1.3. Program pro zpracování naměřených hodnot ..35

3.2. Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku ...36

3.2.1. Hodnocení struktury zkušebních vzorků ...40

3.3. Měření tahových charakteristik zkušebních vzorků ...44

3.3.1. Popis měření tahových deformačních charakteristik ..44

3.3.2. Vyhodnocení tahových deformačních charakteristik ..45

3.3.3. Tabulky naměřených a vypočtených hodnot ..47

4. DISKUSE VÝSLEDKU A JEJICH SHRNUTÍ ...49

5. ZÁVĚR ...51

6. SEZNAM LITERATURY ..53

7. PŘÍLOHA

1. ÚVOD

Současným trendem ve slévárenské výrobě je dosažení požadovaných vlastností odlitků ihned ve stavu po odlití, tj. bez dalších úprav. Toho nelze dosáhnout u odlitků ocelových, neboť ty je nutno téměř vždy tepelně zpracovávat, aby se odstranila jejich hrubá a nerovnoměrná licí struktura. Rovněž hodnoty mechanických vlastností ocelí nejsou výrazné, teprve tepelným zpracováním se docílí zlepšení mechanických vlastností, odstraní se vnitřní pnutí, zjemní zrno, zrovnoměrní struktura atd.

Naproti tomu se nabízí využít některých výhodnějších vlastností grafitických litin, u kterých je možno dosáhnout požadovaných vlastností ihned ve stavu po odlití. Ty jako konstrukční materiály vynikají především dobrými útlumovými vlastnostmi (především litiny s lupínkovým grafitem), dále pak mechanické vlastnosti u litin, které mají grafit vyloučen v podobě kuliček jsou srovnatelné s mechanickými vlastnostmi ocelí.

Ovšem hodnocení některých mezních stavů při zatěžování a deformaci je značně komplikováno tím, neboť se zjednodušeně tvrdí, že se všeobecně litiny neřídí Hookovým zákonem. Bez problémů se dá určit u litiny s kuličkovým grafitem pouze mez pevnosti R_m a tvrdost podle Brinella HB, postrádány jsou jakékoliv další hodnoty, zejména přesné stanovení modulu pružnosti E, dále pak vlastnosti analogické mezi kluzu atd. Konstruktérům poskytují tyto hodnoty údaj pouze orientační , daleko významnější jsou pro jejich práci hodnoty popisující kritické mezní napětí pro statické (dynamické) namáhání.

Snahou této diplomové práce je podrobně se zabývat o deformační charakteristiky grafitických litin při různých stupních napjatosti v tahu s pomocí měření tahových charakteristik extenzometrickými snímači firmy Hottinger Baldwin Messtechnik.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Litiny

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku, křemíku, fosforu, síry popř. dalších prvků, avšak obsah uhlíku je vyšší než maximální rozpustnost uhlíku v austenitu (což odpovídá 2,11% C při teplotě T=1147°C).

Podmínky ovlivňující strukturu litiny:

a) chemické složení taveniny (obsah C, Si, Mn, P, S, atd.),
b) rychlost tuhnutí a chladnutí (tloušťka stěny odlitku, typ formy a jader),
c) zárodečný stav taveniny (vliv očkování, modifikace, teploty a doby přehřátí taveniny),
d) způsob tepelného zpracování (bainitické kalení, temperování atd.).

Krystalizace taveniny litiny podle těchto vlivů může proběhnout buď podle stabilní rovnováhy soustavy Fe-C za vzniku grafitu, čímž vznikají litiny grafitické, neboť krystalizace probíhá rychleji, nebo podle metastabilní rovnováhy Fe-C kdy vzniká cementit, resp. bílá litina.

Grafitické litiny jsou velmi používanými konstrukčními materiály, které se vyznačují dobrými útlumovými vlastnostmi, to především platí o litině s lupínkovým grafitem. Ve srovnání s ocelí jsou tyto litiny v tomto směru podstatně výhodnějším konstrukčním materiálem, což je dáno jejich strukturou, která je proti ocelím heterogennějším systémem (grafit je uložen v kovové matrici). Schopnost útlumu litiny závisí zejména na tvaru grafitu. Zatímco grafit vyloučený ve tvaru lupínků tlumení zvětšuje, kuličkový (globulární) grafit působí na útlum mírněji. Avšak litiny s kuličkovým grafitem jsou pro útlum výhodnější než ocel. Grafitové lupínky způsobují ve struktuře vrubové účinky, které soustřeďují napětí a tak vykazují schopnost útlumu.

Také pevnost v tlaku grafitických litin s lupínkovým grafem (LLG) je velmi dobrá , je 3 krát až 4 krát větší než pevnost v tahu. Je podstatně méně ovlivňována tvarem, velikostí a rozložením grafitu než pevnost v tahu.

Při namáhání na ohyb se u litiny posouvá neutrální osa namáhaného profilu vlivem rozdílné pevnosti v tlaku a v tahu ke směru působící síly. Vlivem ohybového namáhání dochází k posuvu neutrální osy litinového profilu směrem k působišti tlakového namáhání. Z tohoto důvodu jsou často výhodnější nesouměrné profily ve kterých se dosáhne rovnoměrnějšího rozložení napětí. Pevnost v ohybu u litiny je rovněž 1,5 až 2 krát větší než v tahu a je v podstatě funkcí struktury. Přítomnost grafitu v litině ovlivňuje pevnost v ohybu méně než v tahu.

Vedle těchto konstrukčních vlastností se grafitické litiny vyznačují poměrně nízkou cenou a dobrými technologickými vlastnostmi (např. slévatelností, zabíhavostí,atd).[5]

1.1.1. Rozdělení litin

Jak bylo uvedeno, u krystalizace litin se projevuje existence metastabilní a stabilní rovnováhy soustavy Fe – C, podle dříve uvedených podmínek (chem. složení, rychlost ochlazování, atd.), vzniká *eutektikum,* buď cementitické – ledeburit nebo grafitické – grafit. Cementit zbarvuje lomové plochy bílé a grafit šedě a podle toho v podstatě dělíme litiny do dvou základních skupin (na litiny bílé a šedé – grafitické). Přechod mezi litinou bílou a grafitickou tvoří tzv. *litina maková*, resp. polovičatá (litina přechodová). U této litiny je vedle grafitu ve struktuře i volný cementit.[5]

Tepelným zpracováním bílé litiny (grafitizací cementitu v tuhém stavu) je možné odstranit tvrdé a křehké fáze a získat tzv. *temperovanou litinu.*

K výše jmenovaných druhů litin ještě patří *litina tvrzená,* kdy je krystalizace založena na značné rychlosti ochlazování, kdy se při vhodném chemickém složení povrch odlitku ve styku s kovovou formou velmi rychle ochlazuje a vzniká ledeburit, který postupně přechází v litinu grafitickou (LLG) vlivem pomalejšího ochlazování v jádru odlitku.

V neposlední řadě je nutné zmínit také ještě *litiny legované,* u kterých je možno přidáním vhodných legur zvyšovat pevnost, tvrdost (Cr, Mo, Cu), odolnost proti korozi (Si, Cr), žáruvzdornost (Si, Al, Cr), otěruschopnost.[12]

1.1.2. Grafitické litiny

Jsou litiny, jejichž struktura odpovídá alespoň částečně stabilní rovnováze, obsahují grafit.

Obvyklé chemické složení LLG se pohybuje v rozmezí 2,5 – 4,0 [%] C, 1,3 – 2,4 [%] Si, 0,4 – 0,8 [%] Mn, 0,2 – 1,2 [%] P, 0,08 – 0,12 [%] S. U tvárných litin (LKG) se chemické složení pohybuje v těchto mezích 3,2 – 4 [%] C, 1,8 – 3 [%] Si, 0,2 – 0,8 [%] Mn, max. 0,1 [%] P, max. 0,05 [%] S, 0,04 – 0,08 [%] Mg.[12]

Krystalizace těchto litin je velmi složitá a v podstatě se dělí na *primární krystalizaci* a *sekundární, resp. eutektoidní přeměnu* (transformaci). Při primární krystalizaci, jež u grafitických litin probíhá podle stabilní rovnováhy, se z taveniny vylučuje grafit (k jeho krystalizaci přispívají grafitotvorné prvky) a austenit. Následná eutektoidní přeměna probíhá za podstatně odlišných podmínek, kdy se může projevovat metastabilní i stabilní rovnováha a utváří se základní kovová hmota (matrice) litiny přeměnou austenitu vzniklého při primární krystalizaci litiny.

Grafitických litin je celá řada, jejich vlastnosti jsou charakterizovány strukturou – tj. grafem a charakterem základní kovové hmoty.[5]

Pro posuzování grafitických litin se v praxi používá uhlíkový ekvivalent C_E, který se počítá podle chemického složení např. podle vztahu 2.1:

$$C_E = 4,3[\%]\,C - 0,312\,[\%]\,Si - 0,275\,[\%]\,P \qquad (2.1)$$

Dalším charakteristickým činitelem LLG je stupeň eutektičnosti S_c podle vztahu 2.2. Výsledné hodnoty poskytují informace o tom zda-li se jedná o litinu chemického složení podeutektického (C_E<4,3, S_c<1), eutektického (C_E=4,3, S_C=1) či nadeutektického (C_E>4,3, S_C>1).

$$S_C = [\%]\, C / (4,3 - 0,312[\%]Si - 0,275[\%]P) \quad (2.2)$$

Z rozboru závislosti meze pevnosti R_m, tvrdosti HB na stupni eutektičnosti jsou k dispozici vztahy pro orientační výpočet těchto mechanických vlastností litin s lupínkovým grafitem (LLG). Například podle Collarda a Collauda :

$$(R_m)_{vypoč.} = 1006 - 800.S_c \quad (2.3)$$

$$(HB)_{vypoč.} = 465 - 270.S_c \quad (2.4)$$ [7]

1.1.3. Strukturní složky grafitických litin

Struktura grafitických litin je velmi různorodá. Na vlastnosti litin má vliv: množství, tvar, velikost a rozložení grafitu, ale také základní kovová hmota. Proto je nutno strukturu litiny posuzovat komplexně. Přehled jednotlivých strukturních složek popisuje ČSN 42 0461, která charakterizuje *cementit, grafit, ferit, perlit, fosfidické eutektikum.*[5]

1.1.4. Grafit

Grafit má velká vliv na vlastnosti litin, neboť jeho částice zmenšuji aktivní průřez kovové hmoty a způsobují vznik místních koncentrací napětí, tj. má vrubové účinky a vyznačuje se útlumovými vlastnostmi. Grafit má v porovnání s kovovou matricí litiny téměř zanedbatelnou pevnost. Důležitý je však tvar (morfologie) grafitu. Za normálních podmínek krystalizace se grafit vylučuje ve formě lupínků. Přidáním určitého množství tzv. modifikátoru do taveniny způsobí vyloučení jiného tvaru grafitu než lupínkového. Teoreticky může vzniknout celá řada morfologických (tvarových) variant, které tvoří plynulý přechod od lupínkového grafitu až po grafit zrnitý (kuličkový, resp. globulární).

Grafit – se v litinách vyskytuje v těchto podobách:

a) lupínkový

b) pavoučkový

c) *červíkovitý* (vermikulární)

d) vločkový

e) *kuličkový* (globulární, neboli zrnitý) nedokonale, pravidelně.[5]

2.1.5. Základní kovová hmota litiny

Vedle grafitu je u litin též důležitá základní kovová hmota (matrice). Podle podmínek může být metrice litin:

- *feritická*
- *feriticko – perlitická*
- *perlitická,*

anebo ve zvláštních případech bainitická nebo mertenzitická.

Součastně se v litině mohou objevovat i další strukturní součásti jako je např. cementit, steadit atd.

Ferit –ve struktuře litin snižuje pevnost v tahu, tvrdost a odolnost proti opotřebení, ale zvyšuje tvárné vlastnosti a vrubovanou houževnatost. Ferit je u litin v podstatě definován jako tuhý roztok uhlíku a křemíku v *železe* α

Perlit – je v litinách v lamelárním tvaru, čím je větší množství perlitu v matrici, tím se zvyšují mechanické vlastnosti litiny (mez pevnosti v tahu a tvrdost – HB), avšak klesá tvárnost litiny. S rostoucím obsahem perlitu roste i odolnost litiny proti opotřebení.

Cementit – vzniká v litině rozpadem ledeburitu. Je to nežádoucí strukturní součástí litin, neboť se vyznačuje tvrdostí a křehkostí, nižší obrobitelností a téměř žádnou tvárností.

Steadit – ternární fosfidické eutektikum, směs (železa, karbidu železa a fosfidu železa) ve struktuře litiny se vyskytuje ve formě „ pavučinek". Toto nepříznivé eutektikum se vyskytuje hojně v litině při vyšším obsahu fosforu tj. cca 0,3 %. Má nízkou teplotu tání (950°C) a vyskytuje se na hranicích eutektických buněk, kde dochází vlivem

odmíšení k nahromadění fosforu i karbidotvorných prvků. Steadit je velmi tvrdou strukturní složkou litin.

Vměstky – se v grafických litinách vyskytují v podobě sirníků (MnS, FeS).[5]

2.1.6. Mechanické vlastnosti grafitických litin

Litina s lupínkovým grafitem – je velmi dobrým slévárenským materiálem, pevnost v tahu se u ní pohybuje v rozmezí 100 – 350 [MPa]. Mechanické vlastností LLG jsou uspokojivé pokud je jejich pevnost pohybuje nad hranicí 250 [Mpa]. Pro konstrukční účely se používá litina podeutektického složení. Menší použití mají litiny složení eutektického a nadeutektického, které se ovšem vyznačují dobrými kluznými vlastnostmi.

Tažnost, kontrakce jsou u litiny s lupínkovým grafitem (LLG) minimální, za normálních podmínek prakticky neměřitelné. Litiny u nichž je grafit vyloučen ve formě jemných, rovnoměrně rozložených lupínků v základní matrici dosahují pevnost v tahu 300 – 350 [Mpa] s tažností přibližně 0,5 [%].

Pevnost v tlaku u LLG je dobrá, představuje přibližně 3 – 4 násobek její pevnosti v tahu, protože tahové namáhání se přenáší přes grafit, tlakové nikoliv.

Při ohybovém namáhání dochází k posunu neutrální osy namáhaného profilu směrem k působišti tlakového namáhání. K tomuto jevu dochází vlivem rozdílné pevnosti v tahu a tlaku. Celková pevnost v ohybu je u litin 1,5 – 2 krát vyšší než v tahu. Přítomnost grafitu v základní hmotě méně ovlivňuje pevnost u ohybu než pevnost v tahu.

Modul pružnosti není u litin materiálovou konstantou, se vzrůstajícím tahovým zatížením se zmenšuje. Technické příručky udávají rozmezí jeho velikosti od 60 000 do 160000 [MPa].

U ostatních typů grafitických litin, kdy uhlík není vyloučen ve formě lupínků jsou pevnostní hodnoty vyšší, litiny s kuličkovým grafitem se svými mechanickými vlastnostmi blíží ocelím a je již u ní možno určit mimo meze pevnosti R_m [MPa] i smluvní mez v kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] popř. tažnost.

Hodnoty některých mechanických vlastností grafitických litin jsou uvedeny v příloze tab. č.1, kde jsou pro porovnání uvedeny hodnoty i uhlikové oceli na odlitky.[12]

2.2. Součastný stav kontroly materiálu litinových odlitků

Nezbytným prvkem při výrobě odlitků je dokonalý systém komplexní kontroly od hodnocení jakosti výroby tekutého kovu až po hodnocení mechanických vlastností a zahrnuje:

a) vstupní kontrolu surovin (s cílem včasně roztřídit suroviny podle chemického složení pro účely druhování do tavících pecí),
b) kontrola tekutého kovu (podstatou je chemická analýza např. kvantometrie a odlévání zákalkových zkoušek během metalurgických úprav),
c) dodatečné rozbory kovu, různé technologické zkoušky např. zabíhavosti, eventuálně speciální zkoušky na přání zákazníka,
d) stanovení mechanických vlastností v rámci pravidelné kontroly.

Pravidelná kontrola mechanických vlastností představuje zcela zjednodušený přístup pro rychlou charakteristiku pevnostních hodnot.[12]

2.2.1. Zkoušení některých mechanických vlastností grafitických litin

Těmito zkouškami se hodnotí chování materiálu za působení stálých nebo pomalu spojitě se měnících sil. Zkušební těleso se zatěžuje zpravidla jen jednou, a to až do porušení.

Například podle kriteria porušení celistvosti se zkoušky dělí na destruktivní a nedestruktivní. K destruktivním patří: zkouška v tahu a tlaku, zkoušky tvrdosti, zkouška ohybem, zkouška mezi klíny. Nedestruktivní jsou nejvíce používané zejména pro grafitické litiny, přičemž umožňují zjištění vnitřních vad materiálu a některé umožňují určení mechanických vlastností materiálu. Jsou to zkoušky zvukem a ultrazvukem, zkoušky magnetické, prozařovací, indukční, kapilární atd.[6]

2.2.2. Destruktivní zkoušky

Zkouška tahem

Zkouška tahem patří k základním mechanickým zkouškám. Zkušební těleso jednoduchého tvaru (nejčastěji tyč kruhového nebo čtyřhranného průřezu) se ve zkušebním stroji natahuje předepsanou rychlostí ((2,5 až 25) $.10^{-4}$ [s^{-1}]) obvykle za normální teploty (20 [°C]) zpravidla až do porušení. Přitom se zaznamenává závislost osové tahové síly F na prodloužení tyče L, které se sleduje na její vymezené části. Z výsledků normované zkoušky tahem lze kromě získání pevnostních charakteristik (R_e nebo R_p, R_m) a údajů charakterizujících plasticitu (A, Z) soudit i na houževnatost materiálu, jejímž měřítkem je energie, která se spotřebuje na deformaci a porušení zkušebního tělesa. Východiskem je plocha pod křivkou diagramu a je pro každý okamžik zatěžování úměrná energii spotřebované na jednotkový objem tyče pro její deformaci a lom.

Pro LLG je tato zkouška předepsaná ČSN 420330 (zkušební tyč má tvar tzv. „diabolo“) umožňuje pouze určení meze pevnosti R_m [MPa], nebo ČSN 420325 (zkušební tyč je kruhová prismatická se závitovými hlavami) při použití vhodných snímačů prodloužení lze u litin stanovit i tažnost.

Zkouška tlakem

Zkoušky tlakem se užívá především u křehkých materiálů, které jsou namáhány na tlak. Zkušební tělesa (většinou válečky o průměru 20 až 30mm a stejné výšky) se postupně zatěžují, až dosáhnou určité deformace nebo až do rozdrcení. Litiny se poruší v podstatě bez trvalé deformace (těleso se rozdrtí), kdežto u tvárných kovů se přetvoření zkušebního tělesa trvale zvětšuje a k porušení vůbec nedojde. Z diagramu lze obdobně jako u zkoušky tahem určit mez kluzu v tlaku R_{et} a pevnost v tlaku R_{mt}, která se určí pouze při porušení tělesa.

Zkouška ohybem

Zkouška se užívá pro hodnocení křehkých materiálů a pro svarové a spájené spoje. Pro houževnaté materiály, u nichž k porušení ohybem nedochází, se zkouška

neuplatňuje. Při zkoušce se zkušební tyč (většinou kruhového průřezu) uložená na dvou podporách zatěžuje uprostřed plynule rostoucí silou až do porušení. Zjišťuje se pevnost v ohybu R_{mo} a průhyb tyče, které odpovídají porušení. Zkoušky ohybem se zpravidla užívají u šedé litiny, kde se z průhybu tyče usuzuje i na houževnatost. Rozměry odlitých zkušebních tyčí se volí podle směrodatné tloušťky stěny odlitku (ČSN 420361-83). Tyče jsou neobrobené, pouze očištěné. Vzdálenost podpor bývá 20d.

Zkouška tvrdosti

Tvrdost je definována jako odpor proti vnikání cizího tělesa do povrchu zkoušeného materiálu. Posuzujeme ji podle velikosti stopy, která vznikla vtlačováním tělesa vhodného tvaru (kulička, kužel, jehlan) a z dostatečně tvrdého materiálu (kalená ocel, slinutý karbit, diamant) do zkoušeného vzorku určitou silou za definovaných podmínek. Měření tvrdosti je ve srovnání s ostatními mechanickými zkouškami rychlé a jednoduché. Výhodou je i možnost zkoušet hotové výrobky bez jejich destrukce nebo znehodnocení. Proto patří zkoušky tvrdosti mezi provozně i laboratorně nejvíce užívané mechanické zkoušky.

Zkouška mezi klíny

Zkouška je určená pro LLG (ČSN 420341), její použití je omezeno na materiály s nízkou tažností. Zkouška spočívá v tom, že protilehlé klíny vnikají do zkušebního tělesa (např. ve tvaru válcové tyče nebo plochého kotouče) až do lomu. Poměrem nejvyššího zatížení a počátečního průřezu zkušebního tělesa je hodnota pevnosti mezi klíny R_e [MPa].[6]

2.2.3. Nedestruktivní zkoušky

Zkoušky prozařováním

Používá se zejména ke kontrole celistvosti svarových spojů, odlitků a výkovků dílců pro tepelná i jaderná energetická zařízení, dálkových potrubí a dalších exponovaných součástí strojů a zařízení v rozhodujících provozech, kde by přítomnost

defektů byla zvlášť závažná. Prozařovací metody jsou vhodné pro kontrolu vnitřních vad, které výrazně zeslabují tloušťku stěny ve směru záření.

K prozařování se používá rentgenového záření a záření gama. Jsou to elektromagnetická vlnění s velmi krátkými vlnovými délkami (10^{-8} až 10^{-11} [m]), které se průchodem daným materiálem zeslabují v závislosti na tloušťce materiálu a jeho chemickém složení.

Zkoušky zvukem a ultrazvukem

Zkoušky zvukem se používají jako nejjednodušší kontrola některých odlitků a jiných výrobků na necelistvosti. Záleží v rozlišení zvuku dobré a poškozené součásti po úderu kladivem. Výrobky bez vnitřních vad vzdávají jasný čistý zvuk, výrobky s vadami dutý a nečistý zvuk.

Zkoušky ultrazvukem využívají odrazu ultrazvuku na rozhraní dvou prostředí, které existuje např. v místě trhliny, pórů, dutin apod. Používá se podélných a příčných ultrazvukových vln o frekvenci 1 až 10 [MHz]. Vada se zjišťuje porovnáním energie zachycené sondou po projití materiálem neporušeným a materiálem s vadami.

Zkoušky magnetické

Magnetická metoda prášková je jednou z nejpoužívanějších zkoušek pro zjišťování povrchových vad polotovarů a výrobků z feromagnetických materiálů. Indikace vady je umožněna změnou magnetického toku v zmagnetizovaném materiálu. Vady lokálně zvyšují magnetický odpor, a proto v místě vady dochází k zhuštění a zakřivení magnetických siločar, přičemž některé vystupují na povrch. K indikaci rozptylového toku se používá suchý feromagnetický prášek nebo detekční kapalina (řídký olej s rozptýleným feromagnetickým práškem).[6]

2.2.4. Nedostatky dosavadního hodnocení tahové zkoušky

Při rozboru deformačních křivek získané klasickým měřením, které předepisuje pro litiny ČSN se vyhodnocuje zejména pro litinu s lupínkovým grafitem (LLG) pouze mez pevnosti R_m [MPa]. Tato hodnota se vypočte jako poměr maximální síly F [N]

ku počátečnímu průřezu S_o [mm^2] zkoušené tyče a je to pro konstruktéry údajem pouze informativním, neboť pro ně mají daleko větší význam hodnoty mezních stavů napětí. Postrádán je také modul pružnosti E [MPa] v tahu. Neznalost dovolených hodnot pak sebou přináší řadu potíží jako je zbytečná předimenzovanost strojních součástí a tím i nadměrná hmotnost, nebo naopak vypočítané rozměry součástí nejsou dostatečné vzhledem k namáhání a výsledkem může být jejich porušení.

Rovněž okolnost, že tahové zkoušky jsou prováděny většinou na předem obrobených tyčích , zpravidla kruhového průřezu neodpovídá skutečnosti, neuvažuje se vliv povrchové – tzv. licí vrstvy u odlitků, které se používají v neobrobeném stavu.

2.3. Hodnocení vlastností litin podle tahových deformačních charakteristik

U šedé litiny s lupínkovým grafitem bylo dosud velmi obtížné (kromě meze pevnosti na tyčích pro zkoušku tahem) stanovit dostatečně přesně jakékoliv další hodnoty, které by charakterizovaly její pružně – plastické vlastnosti a umožnily určit mezní podmínky statického namáhání. Normy pro šedou litinu hodnotí vlastnosti šedých litin zatím prostou zkoušku tahem na obrobených tyčích, bez měření prodloužení nebo zúžení. Takto definované normované standartní zkoušky nesplňují ani požadavky konstruktérů pro stanovení dovolených namáhání pro pevnostní výpočty, ani požadavky metalurgů pro výstižnější kontrolu materiálu ve zkušebních tyčích i materiálu v odlitku. Dosavadní stav znalostí chování litin při jejich zatěžování tak značně zaostává za obdobnými znalostmi a zkušenostmi v oboru ocelí. Složitou problematiku šedých litin jako strukturně nehomogenního konstrukčního materiálu dále komplikuje značná citlivost krystalizace šedých litin, a tím i jejich vlastností na různé tloušťky stěn,technologické parametry výroby odlitku, použitý materiál pro formy a jádra, metalurgické podmínky při tavení, úpravě taveniny i odlévání. V tomto smyslu je u stávajících zkoušek nepříznivé i to, že se zkoušejí pouze obrobené tyče kruhového průřezu, zatímco odlitky se zpravidla používají jen minimálně opracované s větším či menším vlivem tzv. licí kůry na napěťové poměry povrchových vrstev. Znalost reálných vlastností šedé litiny postrádáme hlavně v tenkých stěnách pod cca 10 mm, u kterých se všechny uvedené vlivy projevují zvláště významně a které bývají

velmi častým konstrukčním prvkem dynamicky namáhaných složitých odlitků strojů – postrádáme zejména přesné stanovení modulu pružnosti E, dále vlastnosti analogické meze kluzu, příp. meze únavy. Bez znalostí těchto hodnot nelze prakticky určit dovolené namáhání litin pro pevnostní výpočty a měření napěťových poměrů při zatěžování odlitků.[2]

2.3.1. Nová metodika hodnocení tahových deformačních charakteristik

Na vytváření konkrétních vlastností šedých litin při různých typech statického i dynamického zatěžování se limitujícím způsobem podílejí tahové složky napětí, jako projev specifické aktivní role grafitu. Základní podmínkou úspěšnosti řešení je však překonání tradičního přístupu ke stanovení statických vlastností šedé litiny v tahu a k hodnocení tahové deformační charakteristiky „napětí – poměrné prodloužení". V tuzemských podmínkách převládly v posledních letech zejména matematicko – analytické interpretace rozboru deformačních charakteristik, postupně stále více podmíněné aplikací moderní měřicí a výpočetní techniky.[2]

Aby bylo možné sledovat prodloužení litin s lupínkovým grafitem, je nezbytný přechod na zkoušení tyčí tvarově obdobných pro zkoušky litin s grafitem kuličkovým a ocelí. Takové tyče mají definovanou prismatickou část pro sledování prodloužení.

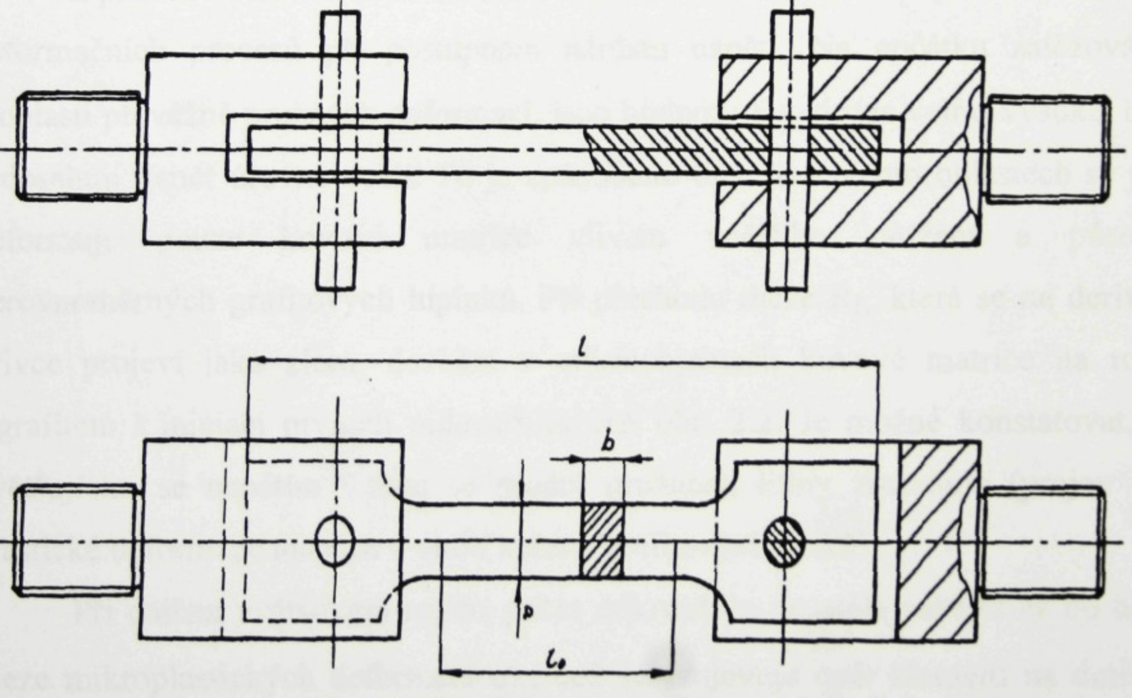
Velmi důležitým prvkem pro znázornění tahové charakteristiky je velmi citlivé snímání prodloužení zkušební tyče až do přetržení. Takovým snímačem může být extenzometr (např. který mění změnu měřeného prodloužení na elektrický signál). Zajímavé je použití snímačů pracujících na principu tzv. laserextenzometrů, kdy se na měřenou část nanesou značky a laserový paprsek při tahové zkoušce „sleduje" povrch zkušební tyče a snímá prodloužení tyče mezi jednotlivými značkami. To umožňuje velmi přesné a komplexní měření prodloužení zkoušené tyče i mezi krajními značkami základní měřené délky.[12]

Způsob stanovení deformační charakteristiky je poměrně velmi rychlý a výhodou je získání plynulé křivky na rozdíl od dřívějšího zdlouhavého a méně přesného postupného zatěžování s nutností propojit jednotlivě změřené body, jejichž počet je však z praktických důvodů poměrně omezen. K získání grafu deformační

charakteristiky musíme uskutečnit zkoušku tahem na tělesech pro zkoušku tahem se závitovými hlavami.

Dalším zcela novým metodickým prvkem zkoušení šedých litin, zejména pak pro hodnocení vlastností šedé litiny v konkrétních odlitcích, je způsob zkoušení plochých tyčí (zvlášť odlitých nebo vyjmutých z odlitku) zatěžovaných jednoose přes čepy v upínacích hlavách – viz. obr. 2.1. (zásadně nelze upínat ploché tyče do plochých čelistí trhacích strojů). Tento způsob umožňuje i výhodné zkoušení tyčí s tzv. „licí kůrou", tedy s maximálním přiblížením strukturálním poměrům v odlitku. U obou typů tyčí musí být – opět analogicky ocelím – vytvořena úměrně dlouhá prismatická část pro přesné měření prodloužení, tj. pro novou metodiku hodnocení litin nelze používat dosud velmi rozšířený a jednodušší tvar tyčí kruhového průřezu typu „diabolo".[2]

Měření tahových charakteristik na prvotně zatěžovaných tyčích tzv. „panenských" je také novým prvkem pro hodnocení mezních stavů grafitických litin a vyplívá ze závěrů práce EXNERA [1,2,3], protože tvar deformačních charakteristik tyčí předzatížených a prvotně zatěžovaných je u litin odlišný.



Obr.2.1 *Plochá tyč upnutá pomocí čepů*

2.3.2. Teorie mikroplastických deformací

Při podrobném rozboru dějů, které vznikají při deformačním procesu v oblasti

mikroplastických deformací zjišťujeme, že pod σ_I musí existovat mezní stav jako mez převážně pružných deformací R_E (tj. mezní napětí, při kterém bude velikost nepružných deformací zanedbatelná), která rozděluje původní oblast mikroplastických deformací I na dvě oblasti.

EXNER [1,2,3] popisuje určování hodnoty R_E podle průběhu první derivace „panenské deformační křivky“. Důvodem, proč EXNER pracoval s prvotně zatěžovaným materiálem je, že tvar deformační křivky předzatíženého tělesa a tělesa prvotně zatěžovaného je u litin odlišný. Příčinou je nerovnoměrný tvar grafitových lupínků, který se projeví narušením průřezu kovové matrice s následnou koncentrací napětí. Tato koncentrace způsobí, že v mikroobjemech dojde přes nízké zatížení k plastické deformaci. Z toho vyplívá, že litiny se neřídí Hookovým zákonem.[11]

Přítomnost grafitu v litině má za následek PLENÁRD [10]:

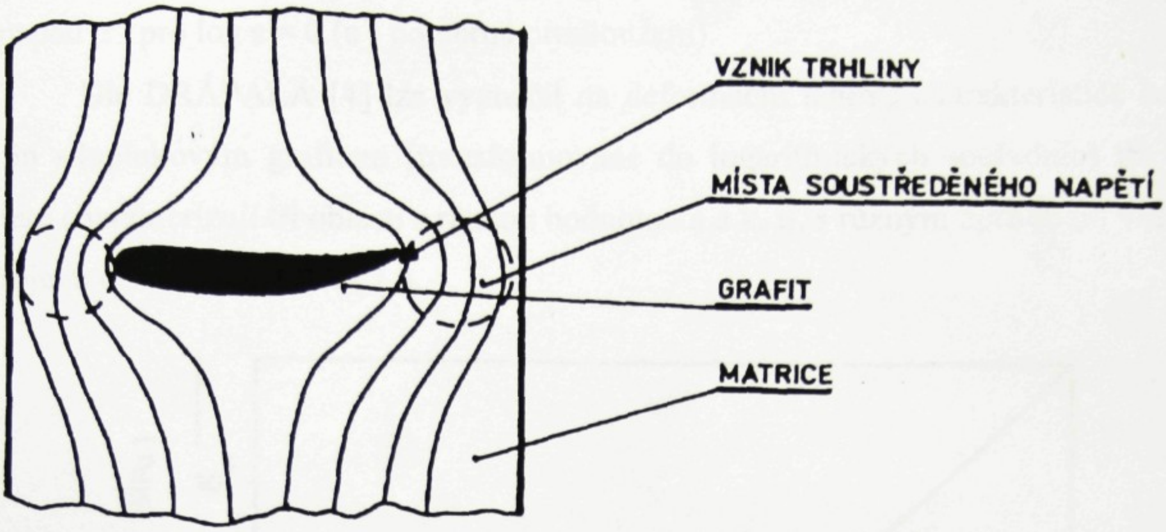
a) zmenšení nosného průřezu,

b) zejména lupínkový grafit působí vrubovými účinky

Z průběhu deformační charakteristiky lze dobře popsat mechanismus deformačních procesů při postupném nárůstu napětí. Na počátku zatěžování, tj. v oblasti převážně pružných deformací, jsou hodnoty $E = d\sigma/d\varepsilon$ velmi vysoké, blíží se a dosahují téměř úrovně ocelí. To je způsobeno tím, že v těchto oblastech se pružně deformuje pouze kovová matrice vlivem vnějšího zatížení a působením nerovnoměrných grafitových lupínků. Při přechodu meze R_E, která se na derivované křivce projeví jako zlom, dochází v mikroobjemech kovové matrice na rozhraní s grafitem k iniciaci prvních mikrotrhlin viz. obr. 2.2. Je možné konstatovat, že se zvětšujícím se napětím v tahu se modul pružnosti litiny zmenšuje (projev lokální plastické deformace matrice v okolí kořene grafitových lístků).

Při dalším zvětšování napětí počet mikrotrhlin neustále narůstá až do hodnoty meze mikroplastických deformací σ_I , což se projevuje opět zlomem na derivované křivce. Při zvyšování napětí se úměrně rozšiřuje podíl plasticky deformovaných oblastí dalším rozvojem poruch a po překročení meze pružně – plastických deformací σ_{II} (další zlom na křivce) dochází k rychlému rozvoji poruch až do destrukce označené jako mez pevnosti R_m. Dojde prakticky k zhroucení celého skeletu kovové matrice

litiny narušené grafitovými útvary i poruchami a hodnoty modulu pružnosti v této oblasti klesají o jeden až dva řády.[11]



Obr.2.2 *Vliv grafitového lupínku na vznik mikrotrhliny*

2.3.3. Řešení a rozbor deformačních charakteristik grafitických litin

Např. GILBERT [8] a KARAMARA [9] prováděli pouze přímý rozbor deformačních charakteristik, PLÉNARD [10] sledoval závislost růstu deformační práce, v tuzemských podmínkách převládaly v posledních letech zejména matematicko – analytické interpretace rozboru deformačních charakteristik postupně stále více podmíněné aplikací moderní měřící a výpočetní techniky.

DRÁPAL [4] aplikoval na litiny známý způsob náhrady skutečných křivek „napětí – poměrné prodloužení“ obecnými parabolami s různými exponenty *n* ve tvaru: :

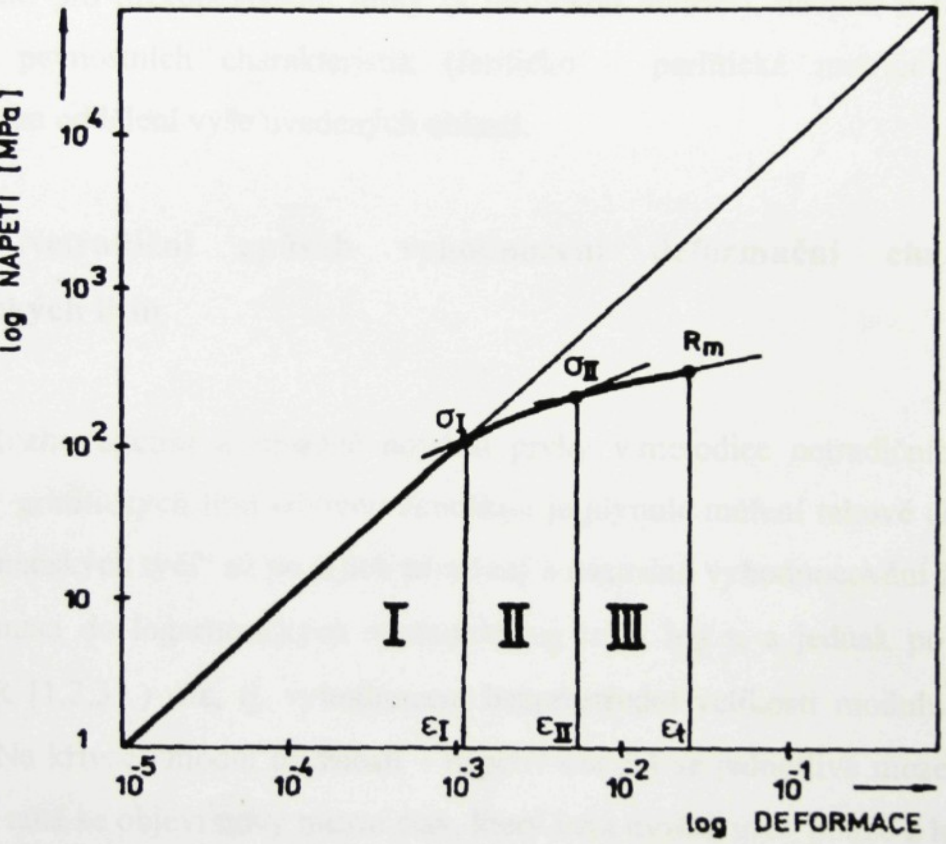
$$\sigma = k \, . \, \varepsilon^{n} \qquad (2.5),$$

kde hodnoty k a n jsou materiálovými konstantami v dané oblasti charakteru deformace. Tento náhradní zjednodušený matematický model má výhodu zejména při rychlém ručním zpracování deformačních charakteristik s možností převodu náhradní křivky do logaritmických souřadnic a znázorněním každé její části ve tvaru přímek podle obecné rovnice

$$\log \sigma = \log E + \log \varepsilon \qquad (2.6),$$

kde hodnota n se stává směrnicí přímky a hodnota k představuje konstantní člen na ose „napětí σ“ pro $\log \varepsilon = 0$ (ε - poměrné prodloužení).

Dle DRÁPALA [4] lze vyznačit na deformační tahové charakteristice šedých litin s lupínkovým grafitem (transformované do logaritmických souřadnic) tři části, které charakterizují tři oblasti s různou hodnotou a a k, tj. s různým způsobem vnějšího projevu deformace viz obr 2.3.



Obr.2.3 *Deformační logaritmovaná charakteristika*

První oblast (I) se označuje celá jako oblast mikroplastických deformací, tj. deformací probíhajících pouze místně v mikroobjemech na rozhraní útvarů grafitu, aniž by se navenek projevovaly měřitelnou zbytkovou deformací. Exponent n bývá zpravidla od 0,85 do 1,0.

V druhé (II) oblasti dochází již k pružně – plastické deformaci, avšak s málo významným časovým rozvojem deformace. Exponent n bývá v mezích od 0,4 až 0,7.

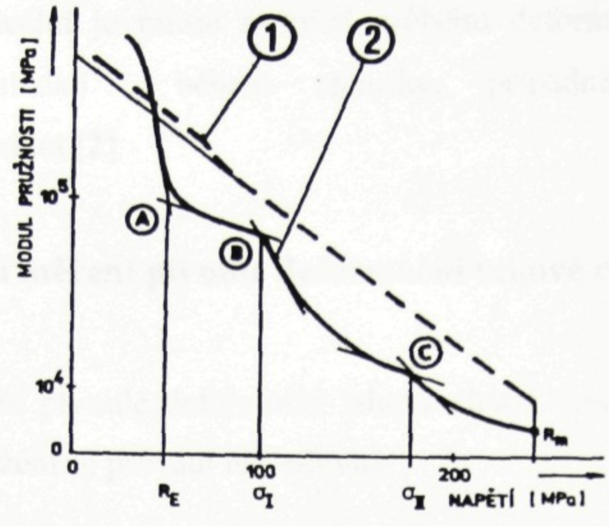
V třetí oblasti dochází také k pružně plastické – deformaci, ale již s velmi významným časovým rozvojem deformace. Exponent n bývá v rozmezí od 0,18 až 0,4. Rozhraní mezi uvedenými oblastmi dané průsečíky přímek pak charakterizují dvě mezní hodnoty: σ_I – mez mikroplastických deformací a σ_{II}, nad kterou začíná spontánní deformace litiny již s minimálním nárustem napětí.[2]

Zajímavým jevem VALDMANOVÁ [11] je splývání oblastí odlišujících se mechanismem deformace v závislosti na typu litiny. Jedná se o děj, kde se slučují oblasti, ve kterých trhliny vznikají a rychle se šíří. Tento jev je charakteristický především pro nízkopevnostní litiny (s feritickou matricí), naopak u litin středně a vysoko pevnostních charakteristik (feriticko – perlitická matrice) dochází ke zřetelnému oddělení výše uvedených oblastí.

2.3.4. Netradiční způsob vyhodnocení deformační charakteristiky grafitických litin

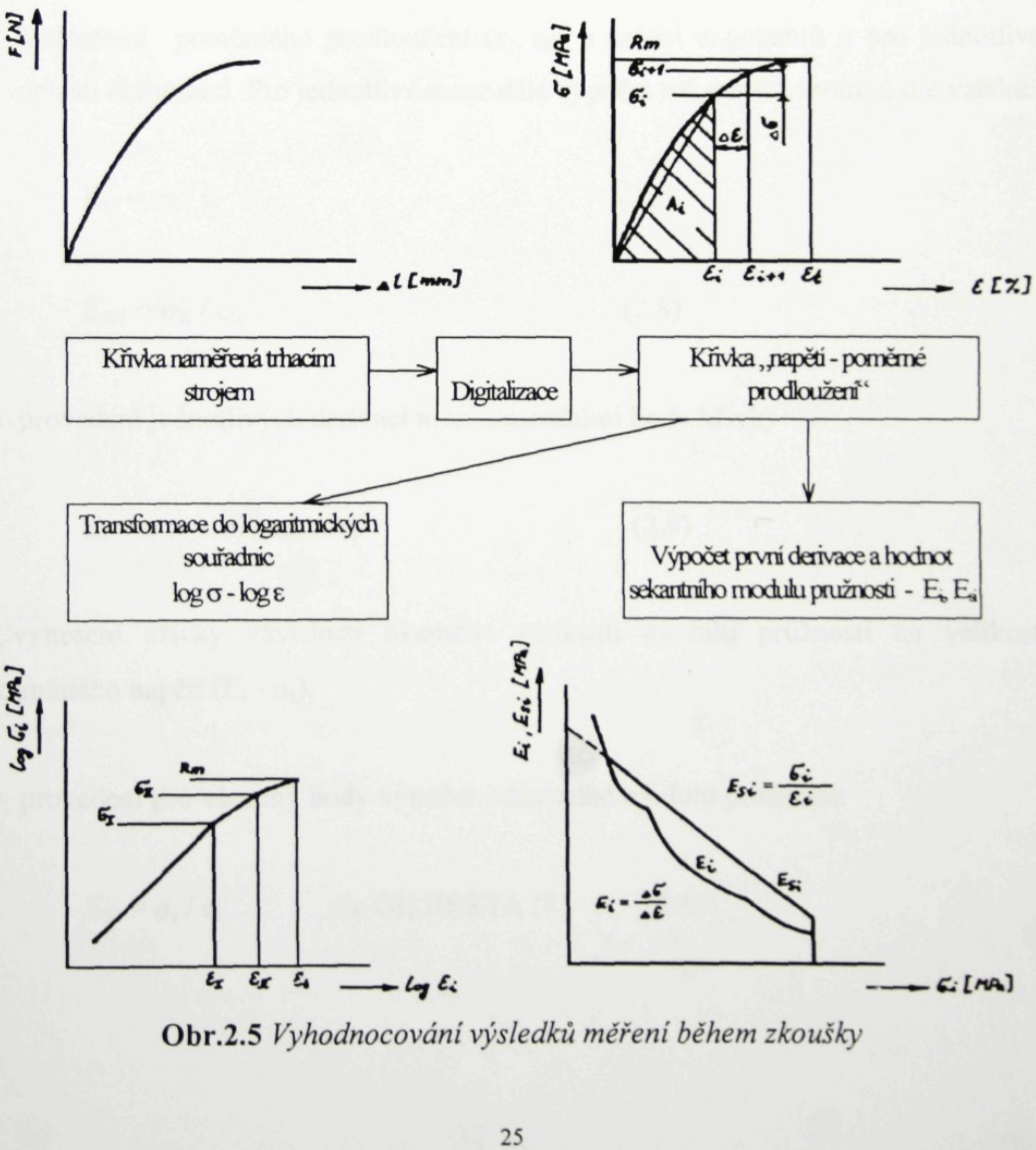
Rozhodujícími a zásadně novými prvky v metodice netradičního hodnocení zkoušky grafitických litin tahovou zkouškou je plynulé měření tahové charakteristiky tzv. „panenských tyčí" až po jejich přetržení a následné vyhodnocování jednak po její transformaci do logaritmických souřadnic log σ_i - log ε_i a jednak po její derivaci (EXNER [1,2,3]) σ/ε, tj. vyhodnocení bezprostřední velikosti modulu pružnosti E_i [MPa]. Na křivce "modul pružnosti – napětí" obr.2.4 se jednotlivé meze projeví jako zlomy a také se objeví nový mezní stav, který není možné určit pouze z logaritmované křivky a určuje tzv. mez pružných deformací R_E [MPa].

Ke znázornění tahové charakteristiky je nutné pro registrování především prodloužení využívat moderních zkušebních strojů např. ZWICK, INSTRON atd., nebo alespoň nových typů přesných elektrických snímačů síly a prodloužení (až do přetržení). Pokud není k dispozici trhací stroj s přímým výstupem dat, je nutno získaný graf deformační charakteristiky co nejpřesněji strojně digitalizovat na dvojice souřadnic pro 40 až 100 bodů (poslední bod je stav při přetržení) a tyto údaje použít jako vstupní data číslicového počítače obr.2.5.



Obr.2.4 *Závislost modulu pružnosti E na napětí σ - 1. Sekantní modul pružnosti E_s*

2. derivovaná křivka E_i



Obr.2.5 *Vyhodnocování výsledků měření během zkoušky*

Více méně ideální je přímé snímání průběhu deformace na počítači PC a vyhodnocování výsledků během zkoušky, případně i s vyhodnocením charakteristických hodnot.[2]

2.3.5. Vyhodnocení měření plynulé deformační tahové charakteristiky

Vyhodnocování plynulé deformační tahové charakteristiky tzv. „panenských" tyčí až do stavu přetržení se provádí následovně:

a) převedení do logaritmických souřadnic, určení mezí mikroplastických deformací σ_I, pružně – plastických deformací σ_{II} , meze pevnosti R_m s odpovídajícími hodnotami poměrného prodloužení (ε_I, ε_{II}) a určení exponentů n pro jednotlivé oblasti deformací. Pro jednotlivé meze dále výpočet sekantních modulů dle vztahů:

$$E_{SI} = \sigma_I / \varepsilon_I \qquad (2.7)$$

$$E_{SII} = \sigma_{II} / \varepsilon_{II} \qquad (2.8)$$

b) provedení jednotlivých derivací mezi sousedními body křivky:

$$E_i = \sigma_{i+1} - \sigma_i / \varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i \qquad (2.9)$$

a vynesení křivky závislosti okamžité velikosti modulu pružnosti na velikosti okamžitého napětí (E_i - σ_i).

c) provedení pro všechny body výpočet sekantního modulu pružnosti:

$$E_{Si} = \sigma_i / \varepsilon_i \qquad \text{dle GILBERTA [8]} \qquad (2.10)$$

d) provedení integrace plochy pod křivkou deformačního odporu v logaritmických souřadnicích a tím vypočet práce: $Ai = f(\varepsilon_i)$.

2.3.6. Mezní stavy při stanovení deformační charakteristiky

Netradiční metodika vyhodnocení tahové zkoušky dovoluje u šedých litin získat kromě meze pevnosti R_m ještě další hodnoty napětí:

a) mez nestabilního šíření makroplastických deformací - σ_{II}, po jejímž překročení dochází ke spontánnímu nekontrolovanému porušování soudržnosti s přechodem do lomu;

b) mez mikroplastických deformací σ_I, která svou fyzikální podstatou je analogická mezi kluzu u ocelí;

c) mez pružných deformací R_E, která ohraničuje tu počáteční oblast tahové charakteristiky litiny, kdy dochází k převážně pružným deformacím základní kovové hmoty ještě bez výraznějšího ovlivnění nukleací a vznikem prvních mikrotrhlin, tj. svou fyzikální podstatou je analogická mezi pružnosti či úměrnosti u ocelí.

Přesné stanovení meze pružných deformací R_E je u litin velmi obtížné, protože přesné měření deformací řádu 10^{-5} a menších je velmi náročné a dále též proto, že i nehomogenní napěťové poměry uvnitř kovové matrice se mohou v průběhu zatěžování měnit, aniž bychom tyto změny měli možnost přesně měřit.

Nová metodika ke stanovení meze pružných deformací R_E z plynule změřené „panenské křivky" vylučuje většinu dosavadních potíží tím, že určuje tuto mez podle průběhu křivky první derivace „panenské" deformační charakteristiky obr.2.4., tj. s výraznějšími rozdíly ve změnách okamžitého modulu pružnosti E_i, na rozdíl od dřívějších způsobů hodnocení deformační charakteristiky, kdy se do výsledných

nepřesností vlastního měření deformací superponoval ještě vliv stupňovitého nebo cyklovaného zatěžování při měření a mez R_E vlastně v naměřené křivce „zmizela“.

Nově stanovenou mezí pružných deformací R_E došlo k rozdělení původně označené oblasti mikroplastických deformací I na dvě oblasti výše uvedených charakterem deformace obr.2.3.[2,3]

2.3.7. Závěry hodnocení tahové deformační charakteristiky

Uvedené závěry a interpretace tahové zkoušky šedé litiny vyplynuly z několika sérií zkoušek různých typů litin nelegovaných i nízkolegovaných. Statistickým zhodnocením naměřených hodnot byli získány tyto relace mezních stavů vůči výsledné mezi pevnosti[2]:

pro šedé litiny nelegované:

$$R_E = (0,28 - 0,32) \,.\, R_m \qquad (2.11)$$

$$\sigma_I = (0,39 - 0,46) \,.\, R_m \qquad (2.12)$$

$$\sigma_{II} = (0,70 - 0,85) \,.\, R_m \qquad (2.13)$$

pro šedé litiny nízkolegované:

$$R_E = (0,32 - 0,36) \,.\, R_m \qquad (2.14)$$

$$\sigma_I = (0,48 - 0,52) \,.\, R_m \qquad (2.15)$$

$$\sigma_{II} = (0,84 - 0,88) \,.\, R_m \qquad (2.16)$$ [2]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1. Úvod do experimentu

Cílem praktické části a provedených měření této práce je aplikace metodiky zkoušení grafitických litin a jejich deformačních charakteristik podle EXNERA [1,2,3], jejíž princip je podrobně vysvětlen v teoretické části této diplomové práce. Hlavním cílem je, za pomocí realizace netradičního měření deformačních charakteristik grafitických litin, odstranit dosavadní problémy spojené s určováním jednotlivých mezních stavů za pomoci počítačového zpracování a vyhodnocení. Mezi mezní stavy patří mez pružných deformací R_E, mikroplastických deformací σ_I, pružně plastických deformací σ_{II} a hodnoty modulů pružnosti v tahu E.

Dalším velmi důležitým předpokladem úspěšného řešení studia deformačních charakteristik je přesné sledování prodloužení jednotlivých zkušebních tyčí. Pro měření daného prodloužení bylo navrženo měřící zařízení renomované firmy HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK (HBM).

Při zkoušení grafitických litin a vyhodnocování jejich deformačních charakteristik pomocí daného měřícího zařízení se postupuje následovně:

1. Ověření správné funkce a aplikovatelnosti zařízení HBM pro netradiční hodnocení tahových charakteristik grafitických litin,
2. Provedení daného měření na sérii zkušebních vzorků od nízkopevnostních litin (s lupínkovým grafitem) až po litiny s vyššími hodnotami pevnosti (grafit ve formě globulí),
3. Dále vyhodnocení křivky „síla – prodloužení“ přepočtem na „smluvní napětí σ - poměrné prodloužení ε“ a určení meze pevnosti R_m. Po transformaci této křivky do logaritmických souřadnic a výpočtu derivace $E_i = d\sigma / d\varepsilon$ se provede vynesení velikosti do grafu v závislosti na napětí sigma a určí se dané jmenované mezní stavy R_E, σ_I a σ_{II}.

Daným vyhodnocením je porovnání získaných výsledků a poznatků s dosavadně provedenými pracemi v oblasti dané problematiky tahových charakteristik grafitických litin a posouzení vhodnosti navrženého měření .

3.1.1. Trhací zařízení pro tahovou zkoušku

Při měření tahových charakteristik grafitických litin bylo použito univerzálního trhacího stroje označeného FPZ 100 viz obr. 3.1., který je schopen vyvodit sílu od 0 do 100 [kN]. Tahová síla je měřena pomocí indukčních snímačů, které jsou zabudovány přímo na čelistích trhacího stroje. Pro měření tahových charakteristik grafitických litin bylo použito čelistí na upínání tyčí se závitovými hlavami. Závitové hlavy zkušebních vzorků upnutých do čelistí pomocí redukcí vylučuje možnost vzniku přídavných ohybových momentů.

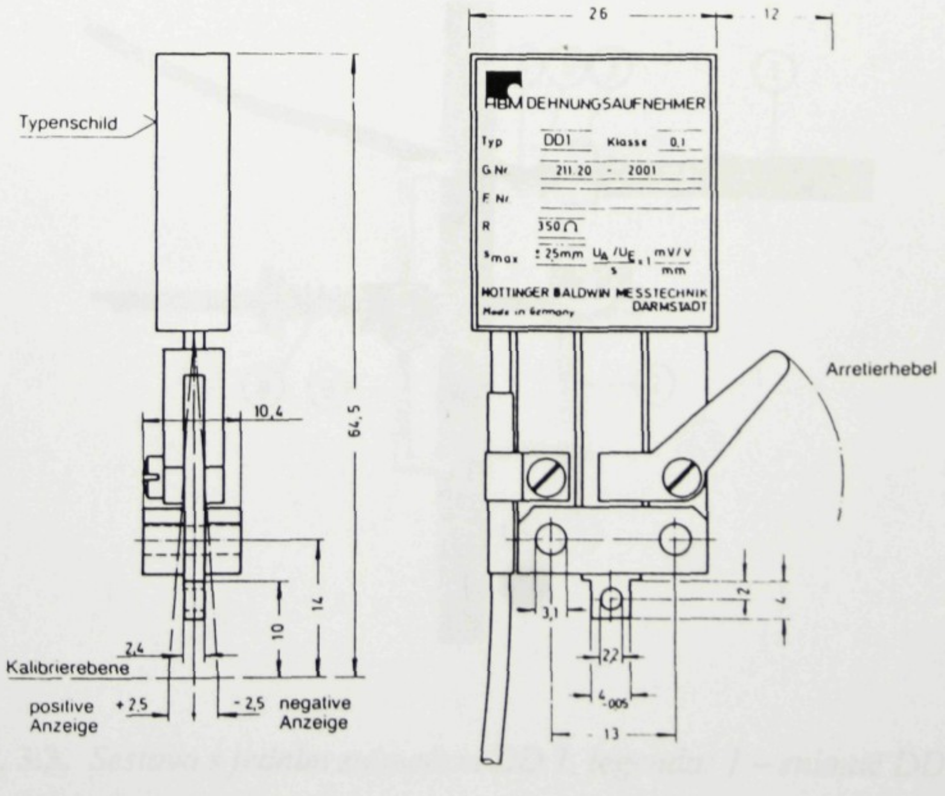
Obr. 3.1. *Universální trhací stroj FPZ 100*

3.1.2. Měřící zařízení HBM

Měřící zařízení firmy Hottinger Baldwin Messtechnik - HBM bylo speciálně vyvinuté na měření změny vzdálenosti např. dvou objektů, pro měření deformace (prodloužení) případně měření ploch a jejich odchylek od rovinnosti atd. Při vypracování této práce je aktuální pouze sestava měřícího zařízení pro vyhodnocení prodloužení zkůšebních tyčí z dané šedé litiny při zkoušce tahem.

Měřící zařízení a jeho popis:

Základem zařízení pro měření prodloužení označené výrobcem DD 1 je snímač, který mění posun hrotu pohyblivého testovacího jazýčku na elektrický signál. Tato přeměna probíhá pomocí extenzometrů umístněných na měřícím jazýčku v přístroji ,a které jsou uspořádány do celomůstkového zapojení. Měřící hrot (jazýček) může snímat prodloužení v rozsahu ± 2,5 [mm] . Deformační snímač má na obou stranách zarážky, aby bylo vyloučeno možné poškození přístroje přetížením.

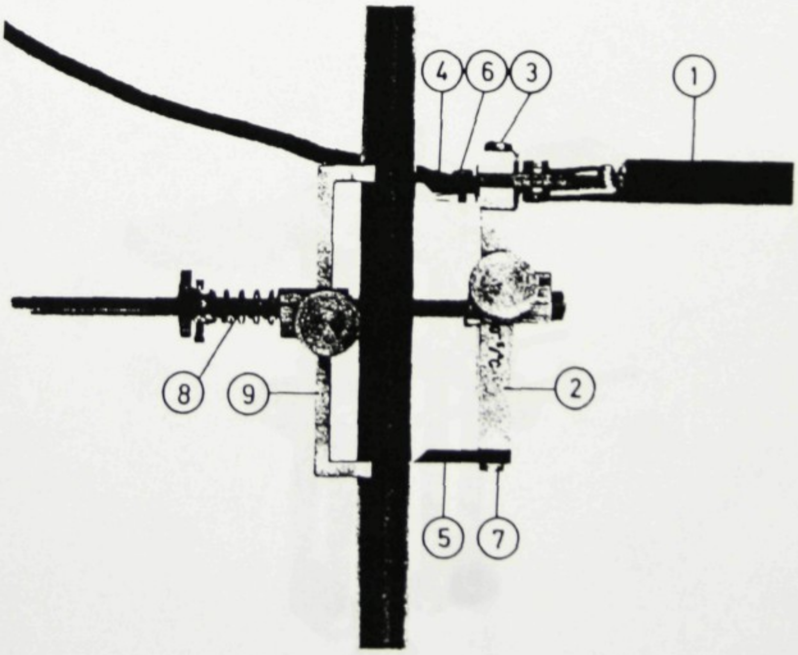


Obr 3.2. *Snímač DD 1 a jeho geometrické rozměry*

V rámci dané měřené dráhy je měřený posun hrotu přeměněn na proporcionální elektrický signál, přičemž odchylka charakteristiky od konečné hodnoty je menší než 0,05 [%]. Snímač DD 1 je s příslušným spojovacím kabelem kalibrován tak, že posuv hrotu o 1 [mm] vyvolá na výstupu přístroje elektrický signál 1 [mV] / [V] napájecího napětí. Posuny do stran s typovým štítkem zařízení vyvolávají pozitivní a v opačném směru negativní elektrické signály. Při teplotách v místnosti je napájecí napětí stejnosměrné a to v hodnotě 10 [V]. Základní geometrické údaje o snímači DD 1 jsou uvedeny na obrázku 3.2.

Sestava dvou snímačů umístněných proti sobě:

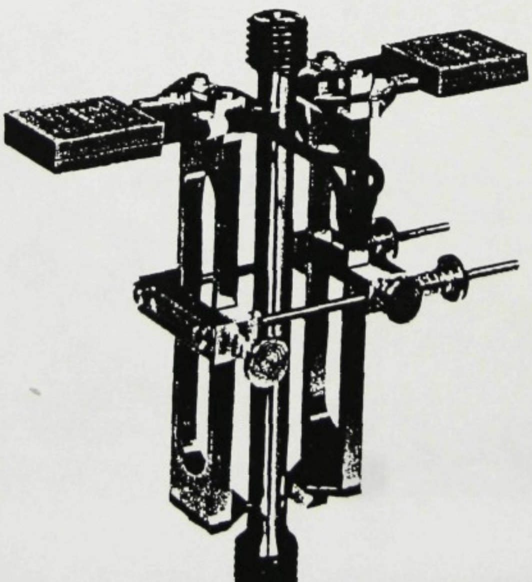
Sestavu pro měření prodloužení pomocí snímače DD 1 je možné realizovat pomocí jednoho základního zařízení viz obrázek 3.3., nebo dvou umístěných proti sobě.



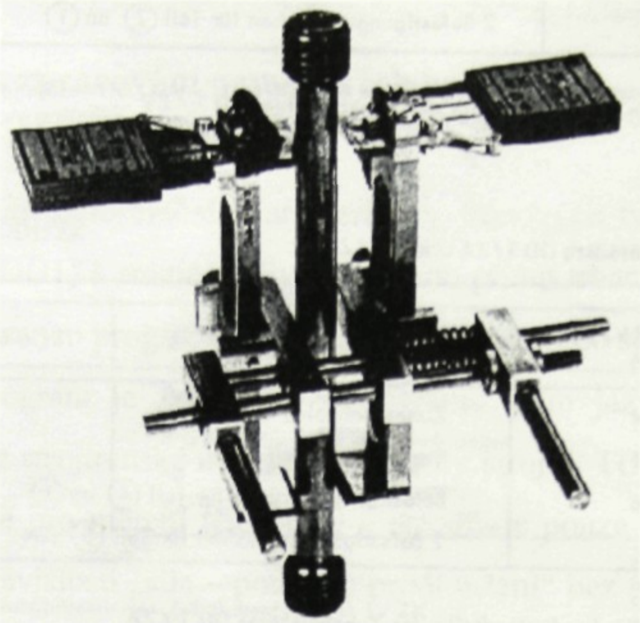
Obr. 3.3. *Sestava s jedním snímačem DD 1, legenda: 1 – snímač DD 1, 2 – nástavný díl (pro l_0 = 50 mm), 3,6,7 – upevňovací šrouby, 4 – snímací hrot, 5 – pevný hrot, 8 – upevňovací svorky, 9 – třmen*

V prvním případě je realizace provedena tak, že měřící zařízení je pouze z jedné strany a proti němu je umístněn třmen. Tato sestava s jedním snímačem je vhodná spíše pro zkoušení deformace homogenních materiálů, neboť dané prodloužení je snímáno pouze na jedné straně zkušební tyče kruhového průřezu.

Pro měření deformačních charakteristik litin je výhodnější zapojení dvou snímačů proti sobě (viz. obr. 3.4. a 3.5.), jelikož tak může být kompenzován vliv jejího nehomogenního chování při působení vnější tahové síly. Měření pomocí dvou snímačů DD 1 vzájemně paralelně propojených vede k tvorbě střední hodnoty ze snímaných hodnot obou extenzometrů. Toto zapojení je možné realizovat bez rychloupínacího nebo s rychloupínacím přípravkem viz obr. 3.4 a 3.5. V této práci bylo použito pro měření prodloužení litinových tyčí zařízení s rychloupínacím přípravkem (obr. 3.5.).V základní sadě měřících přípravků pro sestavu snímačů jsou k dispozici tři třmeny, pomocí nichž je možno měřit při základních délkách zkušební tyče l_0 = 25, 50, 100 [mm]. Pro tuto práci bylo použito měření s přípravkem, který byl sestaven pro základní délku l_0 = 50 [mm].



Obr. 3.4. *Sestava pro měření prodloužení se dvěma snímači DD 1 bez rychloupínacího přípravku*



Obr. 3.5. *Sestava dvou snímačů DD 1 pro měření prodloužen s rychloupínacím přípravkem*

Obr. 3.6. *Zařízení pro měření tahové zkoušky*

3.1.3. Program pro zpracování naměřených hodnot

Pro dané měření deformační charakteristiky litinových tyčí byly hodnoty ze snímačů deformace (DD1) a snímače síly (naměřeno přímo trhacím strojem FPZ 100) zaznamenány počítačovým programem a ukládány do datového souboru.

Počítačový program je zpracován v programovacím jazyce PASCAL a je k dispozici na katedře strojírenské metalurgie, fakulty strojní, TU Liberec. Program je přizpůsoben speciálně pro měření této práce a umožňuje pouze číselné zaznamenání cca sta dvojic bodů závislosti „síla – poměrné prodloužení" bez grafického vykreslení této závislosti při průběhu zkoušky. Naměřené hodnoty lze poté graficky znázornit přenesením do některého zpracovatelského programu jako je například microsoft EXCEL. Pomocí některého z těchto grafických programů se vyhodnotí závislost síly na poměrném prodloužení, následné převedení do logaritmických souřadnic a konečné derivování křivky, což je předpoklad pro vyhodnocení této práce.

Práce a obsluha počítačového měřícího programu je jednoduchá. Po spuštění programu se na monitoru počítače objeví hlavní menu:

ZADEJ POŽADOVANOU VOLBU:

1 – MĚŘENÍ

2 – CEJCHOVNÍ KŘIVKA

3 – KONEC

Volbou č.2 se provede kalibrace rozsahu tahové síly, který je aktuální pro dané měření. Na monitoru počítače se objeví příkaz:

ZADEJ MĚŘÍCÍ ROZSAH A STISKNI a:,

po zadání měřícího rozsahu následuje příkaz :

NASTAV 0 A STISKNI a.

Po stisknutí klávesy **a** se zadává maximální hodnota daného měřícího rozsahu například pro rozsah v mezích 0 – 100 [kN]:

NASTAV 100 A STISKNI a.

Dále po kalibraci měřícího rozsahu se počítač „zeptá“ na název datového souboru, kam se budou během měření ukládat naměřené hodnoty:

ZADEJ JMÉNO SOUBORU:

Například tyč 1.

Tímto je vše připraveno pro měření a stisknutím klávesy **„ENTER“** se program spustí. Na monitoru počítače není graficky znázorňován průběh tahové křivky, ale pouze se zobrazují aktuální naměřené hodnoty . Pokud při zkoušce dojde k poklesu měřené tahové síly cca. o 15 [%] program automaticky ukončí svojí činnost a vrátí se zpět do hlavního menu, kde je opět možno zvolit další měření nebo konec programu. Program pro zaznamenání naměřených hodnot tahových charakteristik je uveden v příloze č.5.1 – 5.3.

3.2. Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku

V první sadě zkušebních vzorků pro měření deformačních charakteristik bylo použito 20 zkušebních tyčí ze šedé litiny s lupínkovým grafitem ČSN 422425 (tyče č.1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20) a ČSN 422420 (tyče č.2, 11, 19). Zkušební tyče kruhového průřezu průměru 10 [mm] a měřené délky l_0 = 50[mm] se závitovými hlavami byly vyrobeny dle ČSN 420316. Rozměry zkušebních tyčí jsou uvedeny v příloze č.2. Hodnoty chemického složení první skupiny zkoušených vzorků jsou uvedeny v tabulce č.3.1. Měřené tyče byly dodány ze slévárny LIBEREC spol.s.r.o.

Tabulka č.3.1. *Chemické složení první sady zkušebních vzorků ze šedé litiny*

Číslo tyče	Chemický obsah prvků v [%]							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
1	3,38	0,55	1,82	0,106	0,075	0,08	0,01	0,12
2	3,49	0,68	1,51	0,111	0,072	0,13	0,01	0,22
3	3,46	0,66	1,74	0,092	0,083	0,12	0,00	0,08
4	3,41	0,71	1,75	0,108	0,085	0,32	0,01	0,34

5	3,46	0,73	1,71	0,114	0,084	0,09	0,01	0,09
6	3,49	0,73	1,94	0,116	0,088	0,08	0,01	0,07
7	3,47	0,86	1,97	0,130	0,090	0,08	0,01	0,08
8	3,26	0,73	2,10	0,149	0,092	0,09	0,01	1,29
9	3,34	0,66	1,87	0,126	0,089	0,10	0,02	0,10
10	3,50	0,73	1,66	0,117	0,068	0,07	0,02	0,10
11	3,44	0,84	2,18	0,109	0,075	0,09	0,01	0,07
12	3,48	0,76	1,85	0,080	0,076	0,07	0,01	0,06
13	3,42	0,72	1,97	0,132	0,074	0,09	0,01	0,07
14	3,42	0,79	1,93	0,143	0,074	0,15	0,01	0,10
15	3,44	0,75	1,91	0,128	0,075	0,12	0,01	0,11
16	3,53	0,78	1,91	0,124	0,078	0,12	0,01	0,11
17	3,44	0,77	1,87	0,118	0,076	0,09	0,01	0,07
18	3,27	0,77	1,80	0,140	0,085	0,09	0,02	0,08
19	3,39	0,79	1,94	0,130	0,083	0,11	0,01	0,08
20	3,54	0,78	1,94	0,118	0,087	0,08	0,01	0,07

Dané vzorky dle tabulky č.3.1mají následující hodnoty uhlíkového ekvivalentu CE:

1. – 3,89
2. – 3,92
3. – 3,95
4. – 3,90
5. – 3,95
6. – 4,04
7. – 4,03
8. – 3,86
9. – 3,87
10. – 3,97
11. – 4,04
12. – 3,98
13. – 3,98
14. – 3,97
15. – 3,98
16. – 4,07
17. – 3,97
18. – 3,79
19. – 3,94
20. – 4,09

Uhlíkový ekvivalent C_E je jedním z nejpoužívanějších kritérií klasifikace litin. Toto kritérium umožňuje přibližně zjistit , zda sledovaná litina je podeutektická, eutektická nebo nadeutektická. U daných 20-ti vzorků nepřesahuje uhlíkový ekvivalent C_E hodnotu 4,3 ,a proto lze usoudit, že se jedná o litinu podeutektickou. Výpočet uhlíkového ekvivalentu je možno spočítat následovně:

$$C_E = \% C + 0,312 \% Si + 0,275 \% P \qquad (3.1)$$

Druhá sada měřených vzorků obsahuje 6 tyčí z litiny s vermikulárním (červíkovitým) grafitem ČSN 420461, která je určena pro výrobu výfukového potrubí. Tyče byly upraveny rovněž do kruhového průřezu ∅ 10 [mm], základní měřené délky l_0 = 50 [mm] se závitovými hlavami a rozměry dle ČSN 420316. Rozměry zkušebních vzorků jsou uvedeny v příloze č.2. Chemické složení těchto šesti tyček je uvedeno v tabulce č.3.2. Měřené tyče byly dodány z AUTO ŠKODA MLADÁ BOLESLAV.

Tabulka č.3.2. *Chemické složení druhé sady zkušebních vzorků*

Číslo	Chemický obsah prvků v [%]							
tyčky	C	Si	Mn	Cr	S	Cu	Ti	Mg
1	3,59	2,57	0,26	0,04	0,018	0,06	0,017	0,014
2	3,68	2,48	0,28	0,04	0,020	0,06	0,016	0,023
3	3,53	2,58	0,27	0,04	0,019	0,06	0,017	0,017
4	3,66	2,57	0,28	0,05	0,020	0,07	0,017	0,020
5	3,67	2,63	0,32	0,05	0,021	0,07	0,017	0,015
6	3,73	2,40	0,30	0,04	0,020	0,06	0,017	0,018

Další měření (sada č.3) zkušebních vzorků představuje 14 tyčí, rovněž kruhového průřezu ∅ 10 [mm], základní měřené délky l_0 = 50 [mm] se závitovými hlavami. Rozměry zkušebních tyčí jsou v souladu s normou ČSN 240316 a jejich rozměry jsou uvedeny v příloze č.2. Chemické složení vybraných zkušebních vzorků

z tvárné litiny (litina s kuličkovým grafitem) ČSN 422304 je uvedeno v tabulce č.3.3. Měřené tyče byly dodány ze slévárny VSETÍN spol. s.r.o.

Tabulka č.3.3. *Chemické složení třetí sady zkušebních vzorků z tvárné litiny*

Číslo tyče (t)	Chemické složení vzorků v [%]						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mg
4	3,57	3,00	0,17	0,048	0,015	0,021	0,033
12	3,05	2,95	0,11	0,046	0,016	0,027	0,036
18	3,00	3,05	0,10	0,050	0,021	0,024	0,039
30	3,40	3,05	3,33	0,038	0,011	0,047	0,032
33	3,60	2,99	0,31	0,047	0,017	0,050	0,030
47	3,60	2,90	0,20	0,052	0,015	0,042	0,040
50	3,48	3,06	0,23	0,038	0,011	0,043	0,036
58	3,70	2,64	0,19	0,090	0,017	0,049	0,030
65	3,68	2,99	0,23	0,080	0,018	0,058	0,033
72	3,67	2,85	0,21	0,070	0,013	0,061	0,032
87	3,56	3,05	0,17	0,080	0,016	0,055	0,030
108	3,68	2,50	0,30	0,050	0,018	0,025	0,026
119	3,40	2,70	0,33	0,070	0,020	0,055	0,030
213	3,50	2,94	0,26	0,044	0,016	0,029	0,033

3.2.1. Hodnocení struktury zkušebních vzorků

V rámci dokreslení pohledů na materiál těchto zkušebních vzorků bylo pouze informativně provedeno jejich metalografické hodnocení s ohledem na velikost, tvar a rozložení grafitu v nenaleptaném stavu a strukturu litiny po naleptání. Vše bylo provedeno ve 100 násobném zvětšení na světelném mikroskopu NEOPHOT 21. Vzorky byly připraveny běžným metalografickým způsobem a hodnocení jejich struktury bylo provedeno dle ČSN 420161. Pro naleptání struktury základní kovové hmoty litiny byl použit NITAL 3 [%].

Vyhodnocení metalografických výbrusů:

Na obrázku č.3.7 je patrný v nenaleptaném stavu tvar, velikost a rozložení grafitu u šedé litiny s lupínkovým grafitem (vzorek č.18, sada č.1). Obr. 3.8 představuje strukturu šedé litiny (vzorek č.18, sada č.1) po naleptání. Rozložení grafitu lze hodnotit jako smíšené, velikosti 4 až 5, což je od 60 do 250 [μm]. Základní kovová hmota je feriticko – perlitická P45, to odpovídá obsahu perlitu od 30 do 60 [%]. Celkový zápis I C 4/5 – P1 – P45 – Pd 1,0 – F2 – Fr1 – Fv2000.

Na obrázku č.3.9 je v nenaleptaném stavu patrný tvar, velikost a rozložení grafitu u litiny s vermikulárním grafitem (vzorek č.6, sada č.2). Obr. č.3.10 charakterizuje strukturu litiny s vermikulárním grafitem (vzorek č.6, sada č.2) po naleptání. Tvar grafitu je červíkovitý místy až nedokonale zrnitý. Velikost grafitu je od 60 do 250 [μm]. Základní kovová hmota je feriticko – perlitická P6 (tj. obsah perlitu 2-10 [%]). Celkový zápis III/V C 4/5 – P1- P6 – Pd 1,0.

Obrázek č3.11 představuje tvar, velikost a rozložení grafitu u litiny tvárné (vzorek č.30, sada č.3) bez naleptání. Na obr. 3.12 je struktura litiny s kuličkovým grafitem (vzorek č.30, sada č.3) po naleptání. Tvar grafitu je pravidelně zrnitý, velikost grafitu je 15 až 60 [μm]. Základní kovová matrice je též feriticko – perlitická P6, což představuje obsah perlitu od 2 do 10 [%] . Celkový zápis VI C 6/7 – P6 – Pd 1,4.

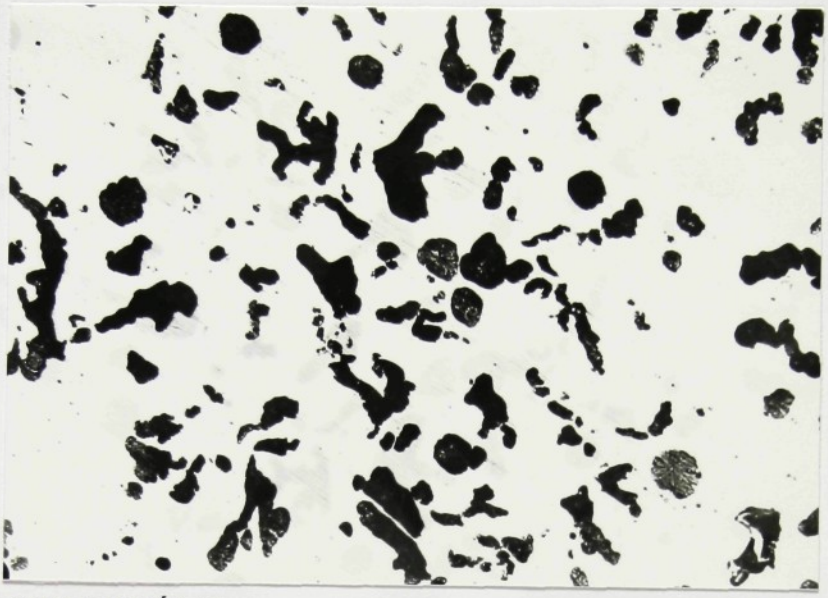
U litiny z vermikulárním grafitem (spíše přechod mezi litinou s lupínkovým grafitem a kuličkovým) je vyhodnocení přizpůsobeno etalonové řadě pro kuličkový a lupínkový grafit z důvodů omezení normou.

NELEPTÁNO 100x

Obr.3.7 *Tvar, velikost a rozložení grafitu*

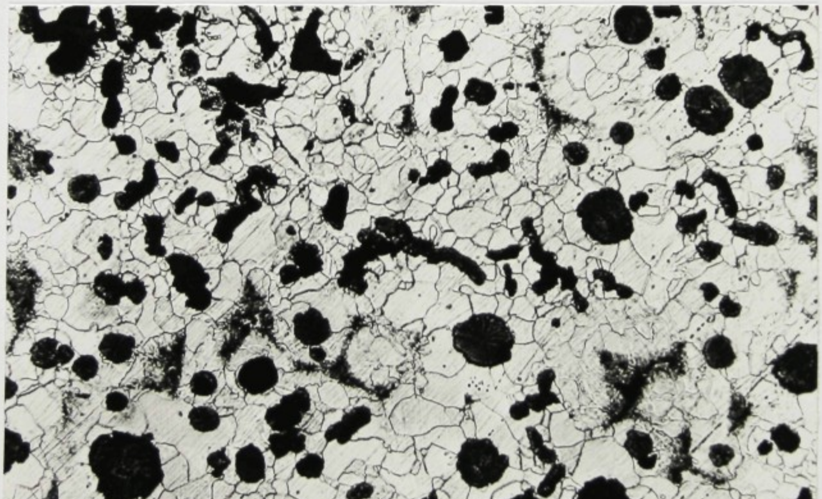
NITAL 100x

Obr.3.8 *Struktura litiny s lupínkovým grafitem, matrice feriticko-perlitická P45, velikost grafitu 60-250 [μm]*



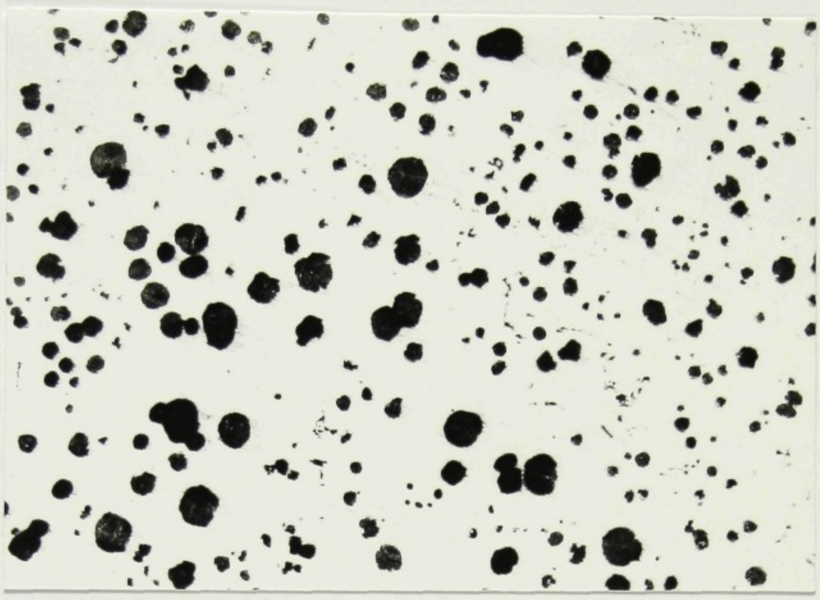
NELEPTÁNO 100x

Obr.3.9 *Tvar, velikost a rozložení grafitu*



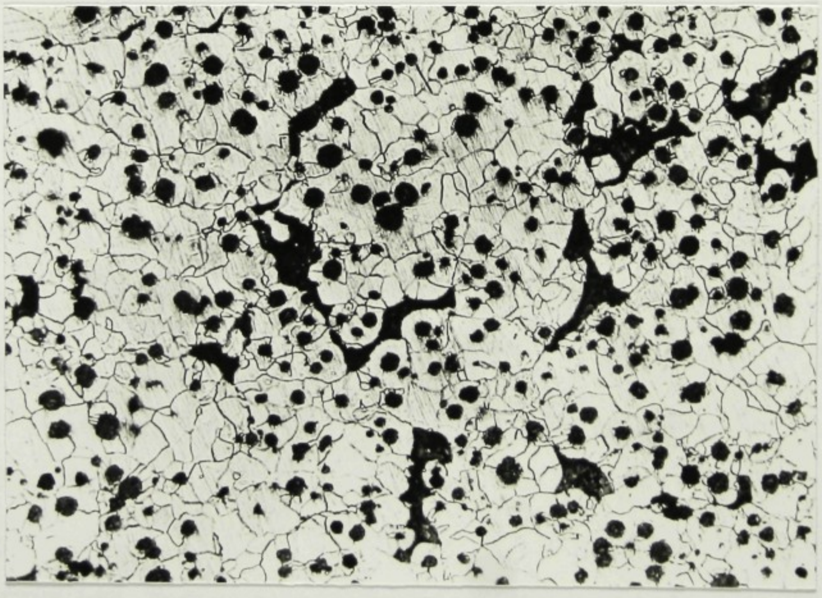
NITAL 100x

Obr.3.10 *Struktura litiny s červíkovitým grafitem, matrice feriticko-perlitická Fe 94, velikost grafitu 60 až 250 [μm]*



NELEPTÁNO 100x

Obr.3.11 Tvar, velikost a rozložení grafitu



NITAL 100x

Obr.3.12 *Struktura litiny s kuličkovým grafitem, matrice feriticko-perlitická Fe 94, velikost grafitu 15 až 60 [μm]*

3.3. Měření tahových charakteristik zkušebních vzorků

Veškeré tahové zkoušky byly provedeny na univerzálním trhacím stroji FPZ 100 za pomocí deformačního snímače firmy Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM).

První bylo provedeno měření dvaceti vzorků ze šedé litiny s lupínkovým grafitem a chemickým složením dle tab. č.3.1. Zkušební vzorky průměru 10 [mm] a měřené délky l_0 = 50 [mm] byly vyrobeny dle normy ČSN 420316 a jejich rozměry jsou uvedeny v příloze č.2.

V druhém měření (sada č.2) bylo zkoušeno šest vzorků vytvořených z kýlového bloku. Chemické složení těchto tyčí je uvedeno v tabulce č.3.2. Byly použity taktéž vzorky průměru ∅ 10 [mm], základní měřené délky l_0 = 50 [mm] vyrobené dle ČSN 420316.

Třetí měření obsahovalo čtrnáct vzorků z tvárné litiny ČSN 422304 o chemickém složení dle tabulky č. 3. Použity byly zkušební vzorky průměru 10 [mm], měřené délky l_0 = 50 [mm] vyrobené dle ČSN 420316. Rozměry vzorků jsou uvedeny v příloze č. 2.

3.3.1. Popis měření tahových deformačních charakteristik

Do čelistí universálního trhacího stroje FPZ 100 se upínaly pomocí závitové redukce (viz příloha č.3) zkušební tyče kruhového průřezu ∅ 10 [mm], základní měřené délky l_0 = 50 [mm]. Zkušební vzorky se závitovými hlavami byly vyrobeny dle ČSN 420316 a jejich geometrické rozměry jsou uvedeny v příloze č.2. Po upnutí tyče do čelistí trhacího zařízení a vymezení vůlí se na měřený vzorek upnul přípravek pro měření prodloužení (viz. obr. 3.6.). Následně proběhla kontrola správného seřízení trhacího stroje FPZ 100. Zařízení pro snímání prodloužení bylo propojeno s počítačem za pomoci kabelů (modulů) a poté bylo zapotřebí ověření funkčnosti počítačového programu zaznamenávajícího naměřené hodnoty, aby nedošlo k nezdarům měření. Dále bylo zapotřebí propojení mezi trhacím strojem a počítačem z důvodů zaznamenávání hodnot zátěžných sil. Současným zahájením tahové destruktivní

zkoušky dané zpuštěním trhacího stroje byl spuštěn program pro snímání měřených veličin (prodloužení, síla, čas).

Rozsahy vyvozované zátěžné síly trhacího zařízení FPZ 100 byly voleny dle předpokládané meze pevnosti zkoušených vzorků. Pro první sadu tyčí byl zvolen rozsah 0 až 40 [kN], pro druhou a třetí sadu tyčí byl zvolen rozsah 0 až 100 [kN]. Rychlost posuvu čelistí trhacího stroje byla nastavena na 3[mm/min].

Po přetržení (destrukci) zkušebního vzorku program zaregistroval pokles zátěžné síly a automaticky došlo k ukončení snímání měřených hodnot.

3.3.2. Vyhodnocení tahových deformačních charakteristik

Naměřené hodnoty síly F a prodloužení Δl byly z datových souborů uložených v počítači převedeny do programu microsoft EXCEL, který umožňuje grafické a matematické vyhodnocení naměřených hodnot.

Postup při vyhodnocení deformační charakteristiky

Nejdříve bylo nutno z naměřených hodnot síly F a prodloužení Δl provést přepočet na smluvní napětí σ [Mpa] a poměrné prodloužení ε [-] dle vztahů:

$$\sigma = F / S_0 \qquad (3.2),$$

kde F je zátěžná síla v [kN], S_0 počáteční průřez zkušebního vzorku v [mm^2].
Závislost smluvního napětí na poměrném prodloužení:

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 \qquad (3.3),$$

kde Δl je měřené prodloužení v [mm], l_0 počáteční měřená délka v [mm].

Dále byla znázorněna grafická závislost „smluvní napětí – poměrné prodloužení“, která je uvedena v příloze č.5. Následovala transformace křivky do logaritmických souřadnic log σ - log ε uvedená v příloze č.6.

Vyhodnocení velikosti bezprostředního modulu pružnosti v tahu bylo provedeno podle vztahu 2.9 pro první derivaci křivky „napětí – prodloužení“. Derivované křivky jsou uvedeny v příloze č.7.,č.8.,č.9.

$$E_i = (\sigma_{i+1} - \sigma_i) / (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \qquad (2.9)$$

V neposlední řadě došlo k vyhodnocení meze pevnosti R_m [Mpa] podle vztahu:

$$R_m = F_{max} / S_o \qquad (3.4)$$

3.3.3. Tabulky naměřených a vypočtených hodnot

Tabulka č.3.4 *Hodnoty mezních stavů zkušebních vzorků sady č.1.*

Číslo tyče	R_m[MPa]	R_E[MPa]	σ_I[MPa]	σ_{II}[MPa]
1	246	77	156	177
2	185	53	90	142
3	222	69	95	180
4	260	82	116	223
5	230	51	109	196
6	216	50	106	*
7	200	70	105	167
8	254	59	*	210
9	242	91	*	205
10	217	*	101	176
11	220	63	108	175
12	183	61	*	140
13	214	55	125	194
14	229	59	119	210
15	225	37	104	196
16	212	49	110	194
17	212	46	104	194
18	268	54	118	216
19	246	102	*	212
20	198	78	*	150

Pozn.: * hodnoty se nepodařili z grafů odečíst

Tabulka č.3.5 *Hodnoty mezních stavů zkoušených vzorků sady č.2.*

Číslo tyče	R_m[MPa]	R_E[MPa]	σ_I[MPa]	σ_{II}[MPa]
1	361	*	202	304
2	487	*	239	372
3		ŠPATNÉ	MĚŘENÍ	
4	384	139	257	325
5	378	*	*	305
6	356	119	213	301

Tabulka č.3.6 *Hodnoty mezních stavů zkoušených vzorků sady č.3.*

Číslo tyče	R_m[MPa]	R_E[MPa]	σ_I[MPa]	σ_{II}[MPa]
4	504	132	308	438
12	524	167	*	383
18	512	124	331	423
30	525	*	365	441
33	482	*	312	407
47	472	134	279	372
50	343	123	263	337
58	387	134	265	333
65	177	61	96	144
72	513	*	275	394
87	115	32	65	107
108	475	158	286	391
119	448	84	274	374
213	457	*	264	378

Pozn.: * hodnoty se nepodařilo z grafu odečíst

4. Diskuse výsledků a jejich shrnutí

Cílem této diplomové práce bylo měření a následné vyhodnocení tahových charakteristik grafitických litin, kdy pro měření prodloužení bylo použito extenzometrů renomované německé firmy Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), označené výrobcem jako DD1. Pro vyhodnocení tahových charakteristik bylo použito počítače pro zaznamenání naměřených hodnot a následné převedení do grafického programu microsoft EXCEL.

Provedené experimenty zaměřené na deformační charakteristiku grafitických litin přinesly očekávaný výsledek především u litin s kuličkovým grafitem, přičemž některé nedostatky a možnosti měření lze spatřovat v následujících skutečnostech:

a) Z provedených měření zkušebních tyčí je zřejmé, že snímání hodnot prodloužení při tahové zkoušce pomocí extenzometrů DD1 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), je dostačující pro zachycení a následné možné vyhodnocení deformačních charakteristik některých (hlavně pevnostnějších) grafitických litin. Některé nepřesnosti lze spatřit ve „skocích“, které představují řádový rozdíl v hodnotách měřených prodloužení. Tyto hodnoty (skoky) bylo možno zjistit z grafické závislosti např. „síla – prodloužení“, která obsahovala cca 80 až 500 hodnot podle meze pevnosti jednotlivých vzorků, a museli být pro daný účel akceptovány. Z uvedených okolností je zřejmé, že skutečně změřená charakteristika pak nemá hladký průběh, což přináší řadu potíží nejen při vyhodnocení, ale také zejména nespojitost derivace a tím i zkreslení výsledků měření.

b) Další nedostatek zařízení DD1 firmy HBM je, že není možné změřit přesně prodloužení pokud je větší než 5 [mm], což má za následek nepřesnosti při měření a tím i spjaté nepřesné vyhodnocení deformační charakteristiky. Při snímání prodloužení, které přesahuje 5 [mm], je nutné zařízení DD1 přepnout a jazýčky přístroje nastavit tak, aby byly schopny opět měřit prodloužení. Tím při tahové zkoušce nedochází ke zkreslení naměřené křivky.

c) Důležitým požadavkem je dále přesné nastavení počátku souřadnic „síla – prodloužení „ tak, aby předpětí na zkušební tyči při nulovém prodloužení

bylo co nejmenší. Nesprávné vymezení vůlí při upnutí zkušební tyče do čelistí trhacího stroje má za následek nesprávné zaznamenávání hodnot,což se projevuje zejména v logaritmické závislosti „napětí – deformace“ při zobrazení počátečních bodů deformační charakteristiky a to může vést k zastínění bodů meze pružných deformací příp. mikroplastických deformací.

d) Zmíněné nedostatky nebylo možno přesně ověřit pomocí měření prodloužení např. na jiném zařízení a tím tudíž porovnat výsledky prováděných zkoušek navzájem s hodnotami naměřenými extenzometrickými snímači DD1 firmy HBM. Porovnání výsledků by bylo možné vyzkoušením zařízení např. firmy ZWICK, u něhož se jazýčky extenzometru pouze dotýkají zkušební tyče. Měřící aparát není na zkušebním vzorku upnutý celý, jako je to v případě používaných snímačů pro možnost vyhodnocení deformační charakteristiky grafitických litin, která je tématem této diplomové práce. Další možností je použití zařízení pro snímání prodloužení pomocí laserextenzometrů,kdy je deformace zkušební tyče „sledována“ bezdotykově laserovým paprskem. Ovšem toto zařízení je po finanční stránce velmi náročné.

Na uskutečněných se nepodařilo objasnit a zjistit proč se na tahových deformačních charakteristikách objevují výše zmiňované skoky. Proto je tento jev nutné objektivně posoudit a případně provést určité úpravy z důvodů sejmutí hladké křivky pro vyhodnocení první derivace závislosti „napětí –prodloužení“.

Odčítání některých mezních hodnot z grafů křivek derivace bylo velmi obtížné z důvodů velkého rozptylu naměřených hodnot a proto se provedlo proložení přímek mezi těmito body. Tímto však dochází k nepřesnostem a odchylkám při stanovení již zmíněných mezí napětí. To se projevuje především u litin s lupínkovým grafitem (menší pevnost).

Celkově lze konstatovat, že zařízení pro snímání prodloužení s extenzometrickými snímači firmy HBM spolu se sestaveným programem pro zaznamenávání měřených hodnot dává uspokojivé výsledky u pevnostnějších litin (litiny s kuličkovým grafitem) a náhled na danou problematiku týkající se deformačních charakteristik grafitických litin.

5. ZÁVĚR

Tématem a cílem této diplomové práce bylo měření tahových deformačních charakteristik grafitických litin pomocí zařízení obsahující extenzometrické snímače DD1 (zabudované přímo v měřícím přípravku upnutém na zkušební tyči), renomované německé firmy HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik), za pomoci počítače s programem pro zaznamenávání naměřených hodnot zátěžné síly a prodloužení. Vyhodnocení bylo provedeno podle metodiky určování mezních stavů grafitických litin dle EXNERA a ČECHA [2], kdy se hodnoty zátěžné síly i prodloužení naměřené trhacím strojem FPZ 100 a měřícím zařízením DD1 zaznamenávaly (ukládaly) v průběhu zkoušky do paměti počítače jako soubory dat. Programové vybavení počítače pro záznam snímaných hodnot tahových zkoušek bylo připraveno již dříve a neumožňovalo přímé vykreslení grafické závislosti „síla – prodloužení" na monitor počítače. K tomuto účelu muselo být použito programu microsoft EXCEL, který umožňuje grafické znázornění závislostí.

Pro měření deformačních charakteristik bylo v sadě č.1 použito dvacet vzorků (tyč 1 až 20) litiny z nízkou pevností ČSN 422420 a 422425 (grafit ve formě lupínků) o pevnosti 200 – 250 [MPa]. V sadě č.2 se měřilo šest vzorků (tyčky 1 až 6) litiny s vermikulárním (červíkovitým) grafitem o pevnostech v rozmezí 350 – 450 [MPa] . V poslední sadě č.3 bylo čtrnáct vzorků (t 4, t 12, t 18, t 30, t 33, t 47, t 50, t 58, t 65, t 72, t 87, t 408, t 119, t 213) z tvárné litiny ČSN 422304 (grafit kuličkový) s vyššími pevnostními hodnotami (v rozmezí cca 450 – 520 [MPa]) než u litiny s lupínkovým grafitem. Všechny zkušební tyče byly vyrobeny válcové ∅ 10 [mm], základní měřené délky $l_0 = 50$ [mm] se závitovými hlavami dle ČSN 420316.

Prováděním experimentu byla zjištěna vhodnost použití navrženého zařízení – extenzometrického snímače firmy HBM pro snímání velmi citlivých charakteristik grafitických litin pro litiny s vyššími pevnostmi (litiny s kuličkovým grafitem), kde lze z křivky derivace odečíst dané pevnostní hodnoty (viz. příloha 9.1-9.14). Neuspokojivé výsledky byly spojené s měřením litiny s lupínkovým grafitem (nízká

pevnost), kde z derivované křivky lze obtížně odečíst meze napětí (viz. příloha 7.1-7.20).

Z daných měření byly graficky znázorněny derivační křivky závislosti „modul pružnosti-napětí" (viz. příloha 7,8,9) a vyhodnoceny dané meze napětí. Hodnoty modulů pružnosti dosahují u litin s lupínkovým grafitem 140000 [MPa] a u litin s kuličkovým grafitem 200000 [MPa]. Pro orientaci byly vyhodnoceny z každé sady měřených vzorků závislosti „síla-prodloužení", „napětí-poměrné prodloužení" a převedení této křivky do logaritmických souřadnic „log σ - log ε (viz. příloha 4,5,6).

Votoal

6. SEZNAM LITERATURY

Literatura:

1. EXNER, J., NOVÁ, I.: Metodika stanovení únavových vlastností materiálů bez výrazné meze kluzu. Technická universita Liberec. Katedra strojírenské metalurgie

2. EXNER, J., ČECH, J.: Hodnocení vlastností litin podle tahových deformačních charakteristik. Slévárenská ročenka, 1993, s. 45 – 51

3. EXNER, J., NOVÁ, I., STRNADOVÁ, M., HAVEL, M.: Metodika stanovení a posouzení vybraných mechanických vlastností grafitických litin. In.: Sborník z 12 konference „Výroba a vlastnosti oceli na výrobky z tvárné litiny". VUT Brno, duben 1996, s. 5 – 14

4. DRÁPAL, S.: Mechanismus deformace šedé litiny. Strojírenství, 1975, č.5, s. 288 – 296

5. NOVÁ, I.: Teorie slévání. [Vybrané kapitoly přednášek prof. EXNERA]. Technická universita Liberec, 1996

6. PLUHAŘ, J. a kolektiv: Nauka o materiálech. Praha 1989

7. ALAXIN, J. a kolektiv: Nauka o materiálu. Liberec 1989

8. GILBERT,G.N.J.: Deformační mechanismus šedé litiny při tahovém a tlakovém namáhání. Slévárenství 1967, č.6, s. 242 – 247

9. KARAMARA, A.: Vztah napětí – deformace u litiny a kritérium její tvarové pevnosti. Slévárenství, 1967, č.6, s. 224 – 227

10. PLÉNARD, E.: Vliv grafitu na některé pevnostní vlastnosti litiny. Slévárenství, 1967, č.6, s. 227 – 230.

11. VALDMANOVÁ, J.: Studium srovnatelnosti výsledků tahové zkoušky a mikroohybové zkoušky u LLG, [Diplomová práce]. Liberec 1994, VŠST,FS

12. LOUDA, J.: Deformační charakteristika grafitických litin, [Diplomová práce]. Liberec 1998, TU, FS

13. PÍŠEK, F., JENÍČEK : Nauka o materiálech. Díl II. Praha 1968

14. NĚMEC, J.: Tvarová pevnost kovových těles. Praha 1971

15. ČSN 420461

7. PŘÍLOHA

Seznam příloh:

č.1. Tabulka nejdůležitějších vlastností grafitických litin

č.2. Rozměry zkušební tyče pro tahovou zkoušku

č.3. Redukce pro upnutí zkušební tyče průměru 10 [mm] do čelistí trhacího stroje

č.4. Tahová deformační charakteristika „ síla – prodloužení“

č.5. Tahová deformační charakteristika „napětí - poměrné prodloužení

č.6. Logaritmovaná křivka „ log napětí - log poměrné prodloužení

č.7.1-7.20. Derivované křivky tahových charakteristik pro sadu č.1

č.8.1-8.5. Derivované křivky tahových charakteristik pro sadu č.2

č.9.1-9.14. Derivované křivky tahových charakteristik pro sadu č.3

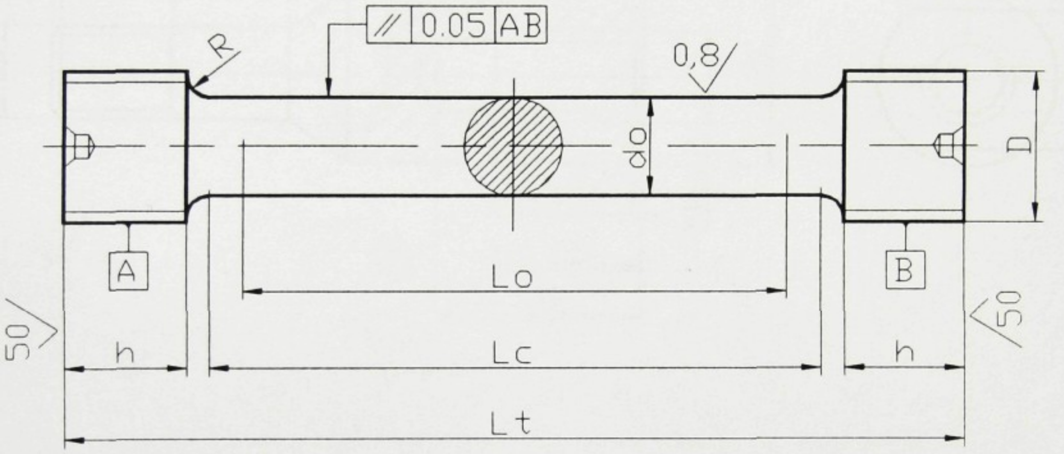
č.10.1-10.3. Počítačový program pro snímání naměřených hodnot

Tab. č.1 *Přehled nejdůležitějších mechanických vlastností grafitických litin*

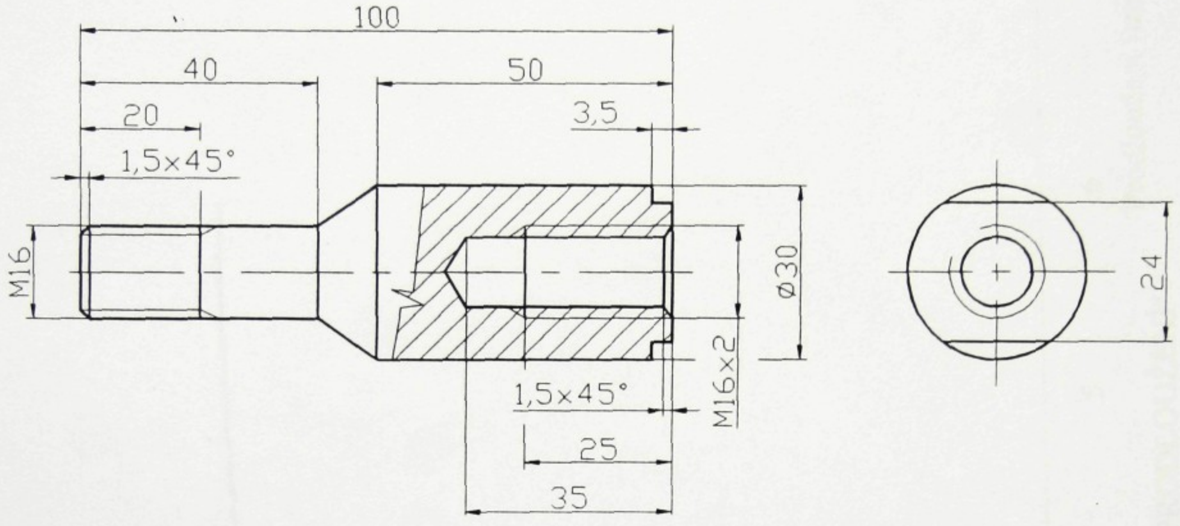
Materiál ČSN		Rp0,2	Rm min	A5min	HB	Mez únavy		
						tah	ohyb	
							plochý	za rotace
		[Mpa]	[Mpa]	[%]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
LČG								
feritická 10 % perl.		260	320	3 až 5	130 až 180	178	180	140
fer.-per. 10 - 90 % perl.		300	400	2	160 až 220	185		
perlitická 90% perl.		380	450	1	200 až 270	208	210	270
(Šedá litina)	42 24 10		100		120 až 180			47
LLG	15		150		140 až 200		70	70
	20		200		160 až 220		100	93
	25		250		180 až 240		120	116
	30		300		200 až 260	90 až 100	150	140
	35		350		210 až 270	110 až 120	180	163
(Tvárná litina)	42 23 03	230	370	17	140 až 150			
LGG	04	250	400	12	150 až 200		200	190
	05	320	500	7	170 až 240		250	
	06	370	600	3	190 až 270		300	250
	07	420	700	2	230 až 300		350	
	08	480	800	2	250 až 350			350
Temperovaná litina:								
s černým lomem	42 25 31		300	6	max. 180			
	32	170	320	8	max. 180			
	33	180	330	10	max. 180			
	34	190	350	12	max. 180			
s bílým lomem	42 25 36		300	7	max. 220		140	
	40	180	360	10	max. 220			
perlitická	42 25 45	260	440	7	max. 200			
	50	300	490	5	max. 230			
	55	330	540	4	max.240			
Ocel na odlitky uhlíková								
	42 26 30	200	370	25	105 až 150			
	40	240	440	22	125 až 170		180	
	50	260	500	20	145 až 185		250	
	60	300	590	12	170 až 210		280	250
	70	380	690	10	200 až 240			

Tab.7.2. *Rozměry zkušebních tyčí dle ČSN 420316*

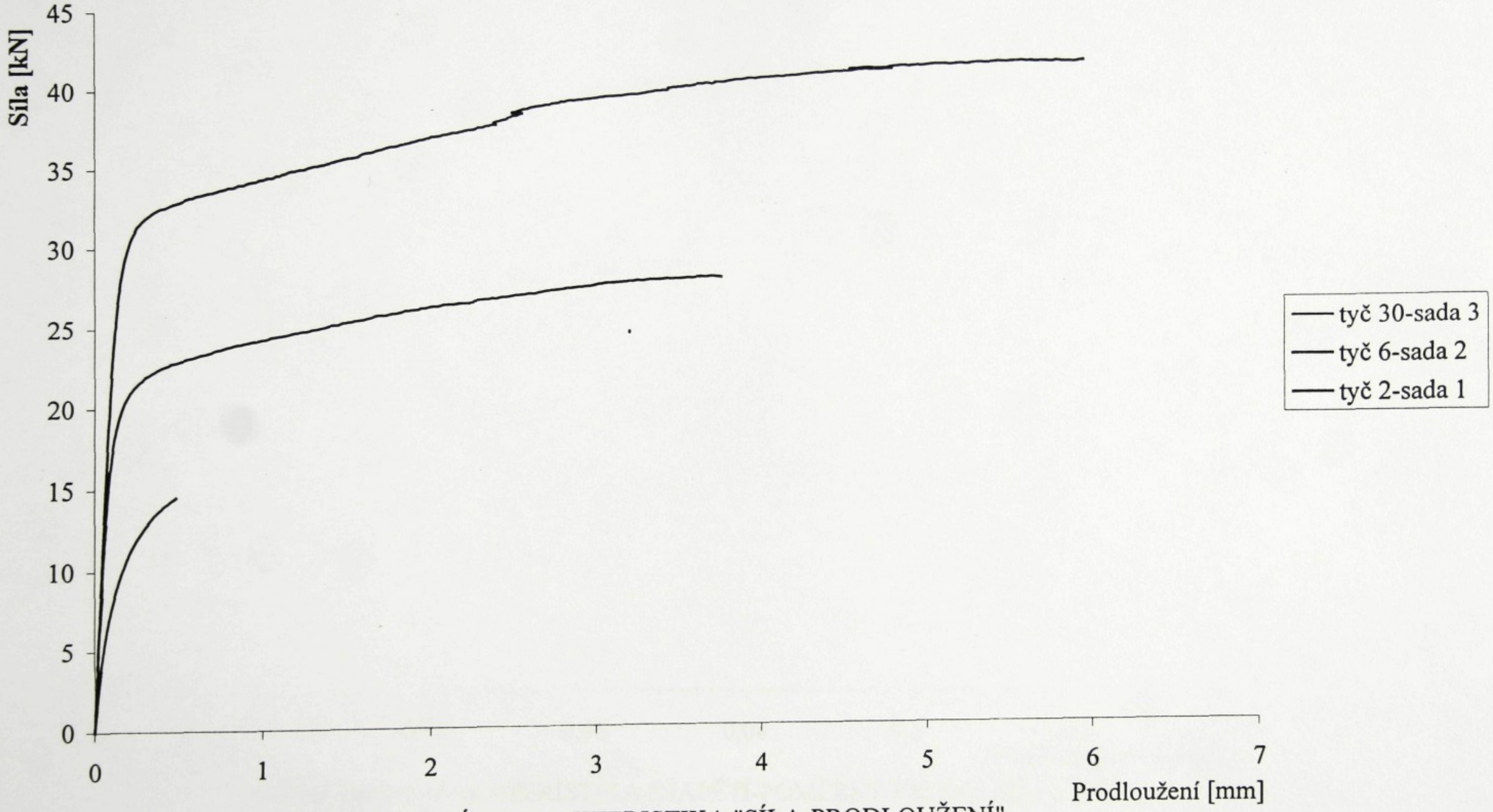
d_0 [mm]	D [mm]	h [mm]	L_0 [mm]	L_c [mm]	L_t [mm]	R [mm]
10	M16x2	12	50	55	85	5



Příloha č.2. Rozměry zkušební tyče pro tahovou zkoušku

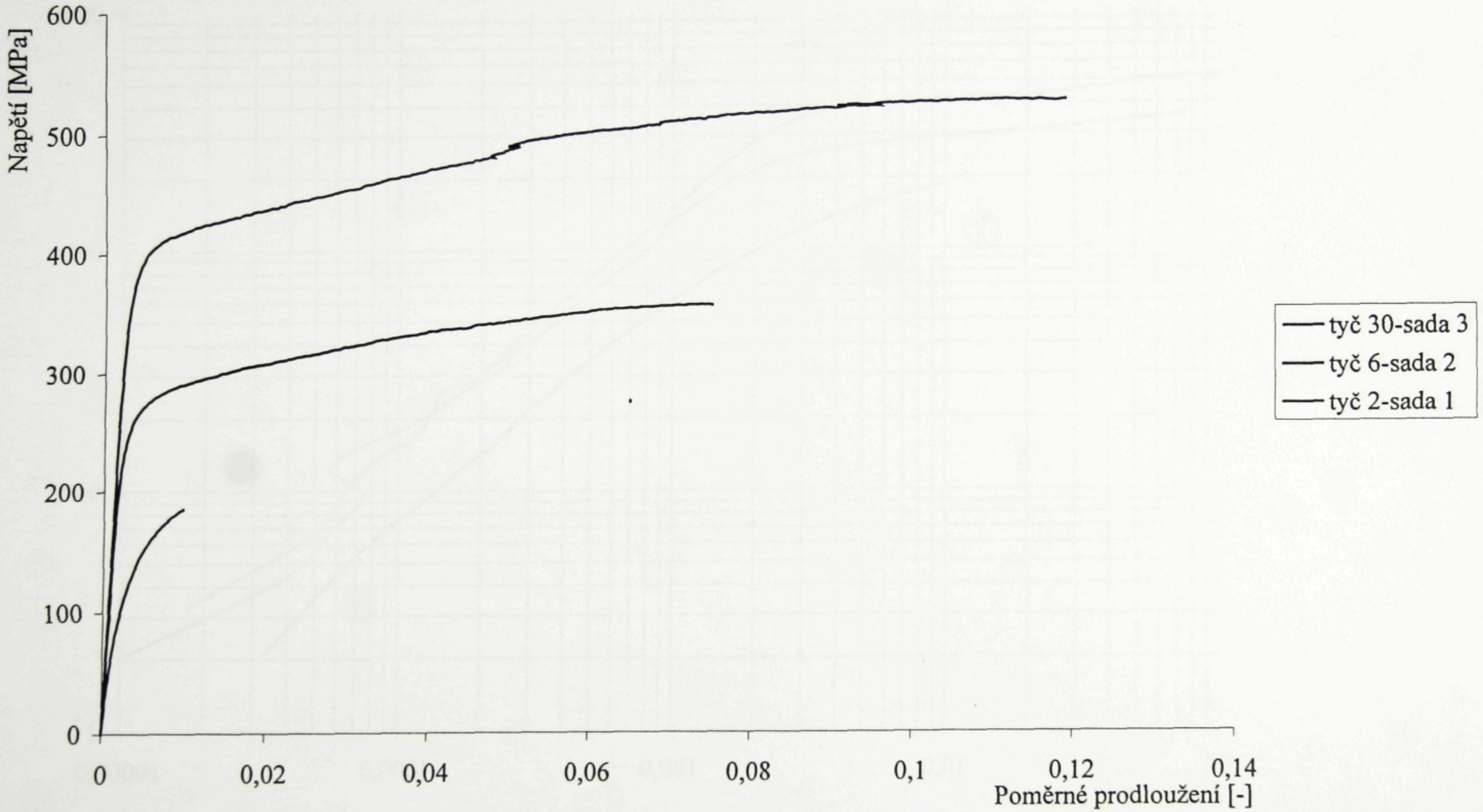


Příloha č.3. Redukce pro upnutí zkušebních tyčí průměru 10 [mm] do čelisti trhacího stroje



TAHOVÁ CHARAKTERISTIKA "SÍLA-PRODLOUŽENÍ"

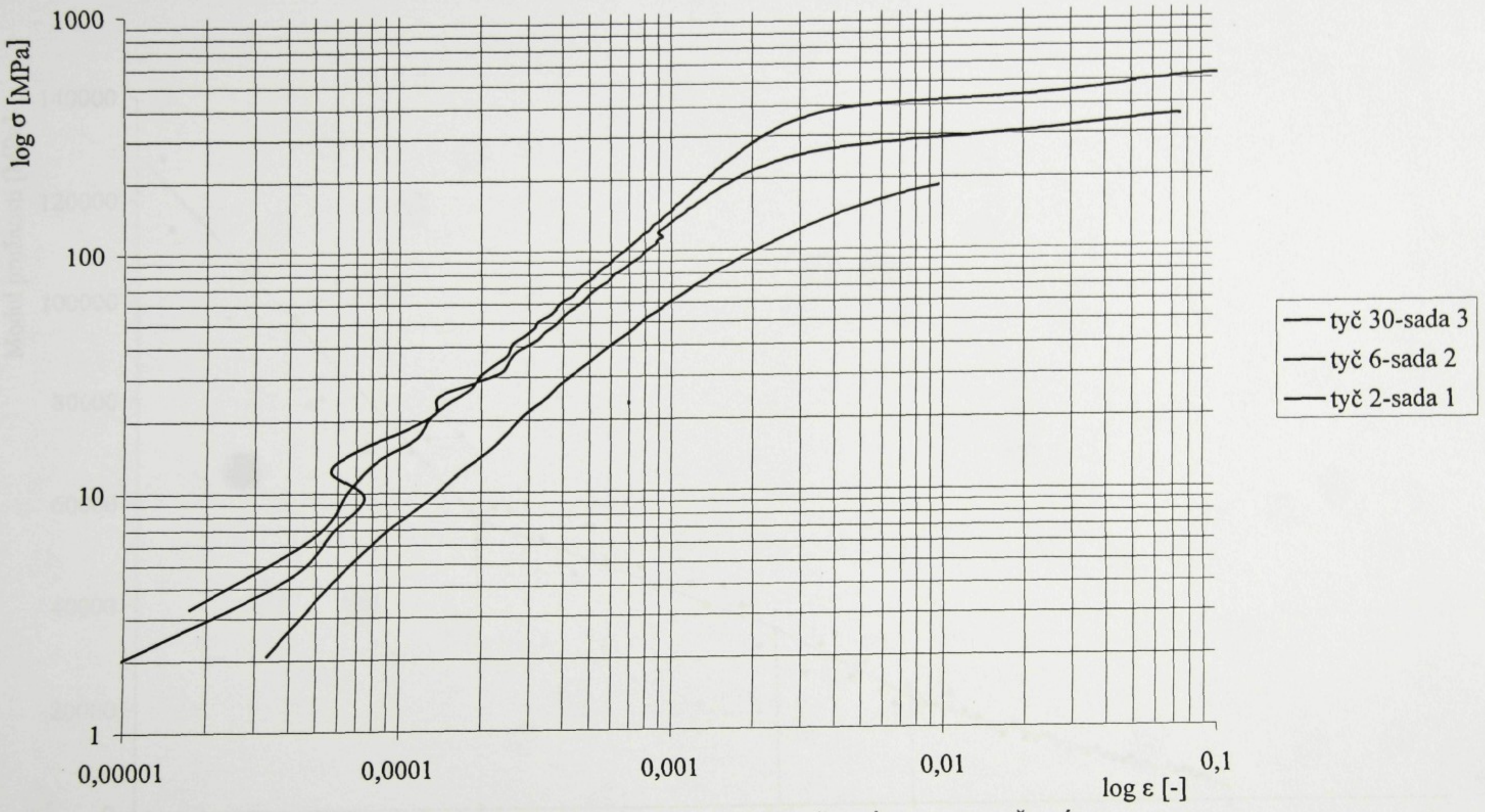
Příloha č.4



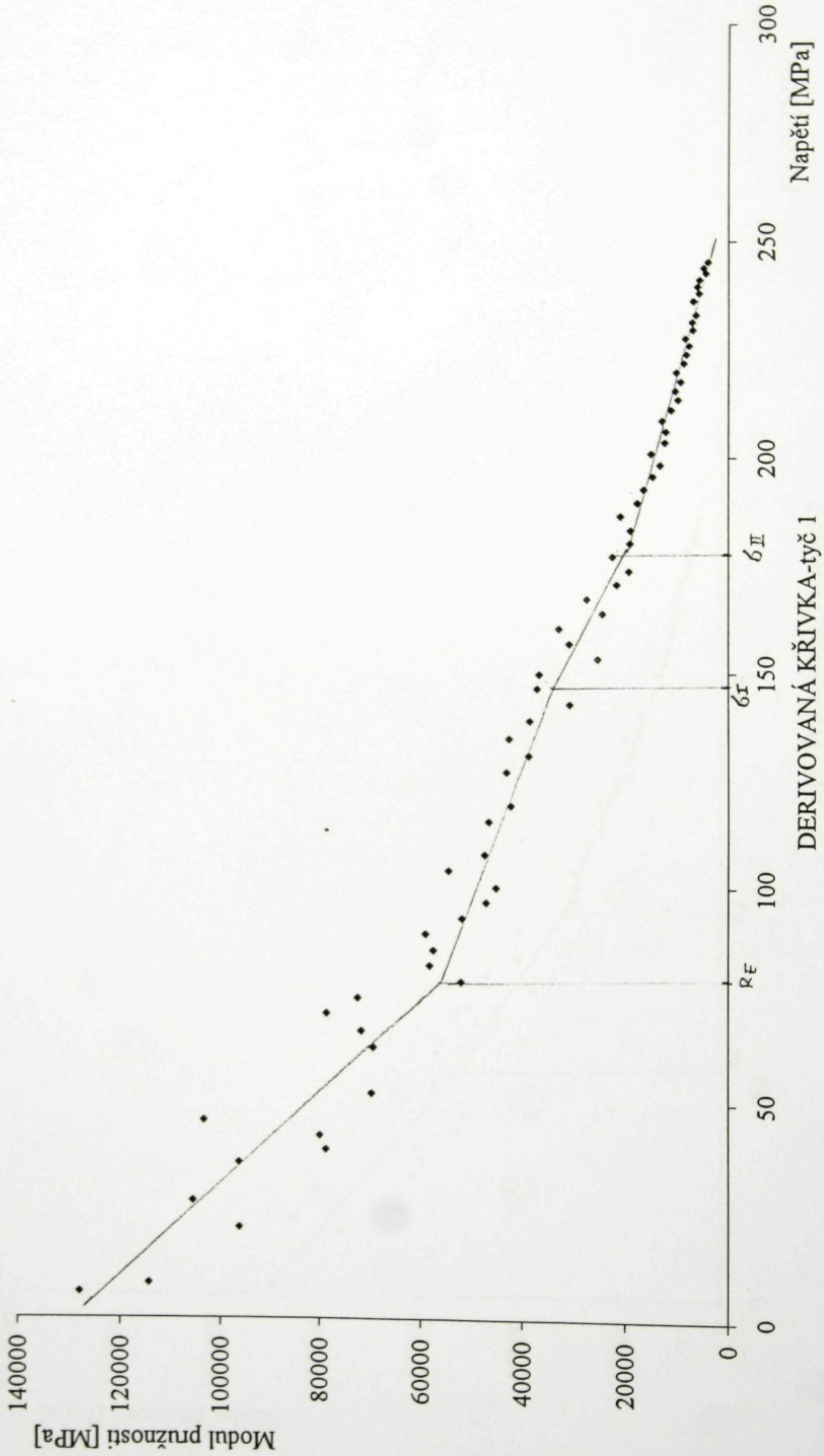
TAHOVÁ CHARAKTERISTIKA "NAPĚTÍ-POMĚRNÉ PRODLOUŽENÍ"

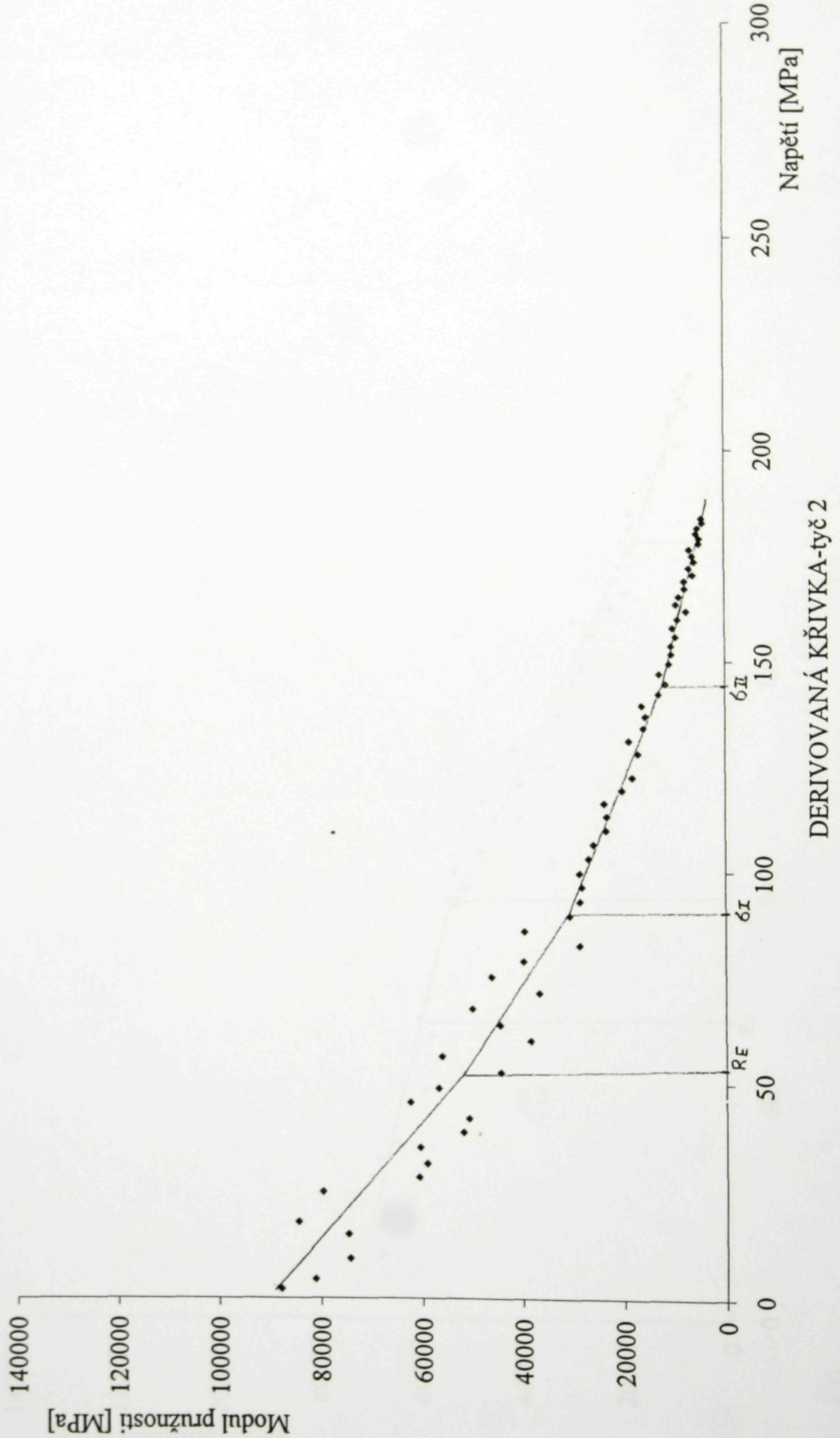
Příloha č.5

Příloha č.6

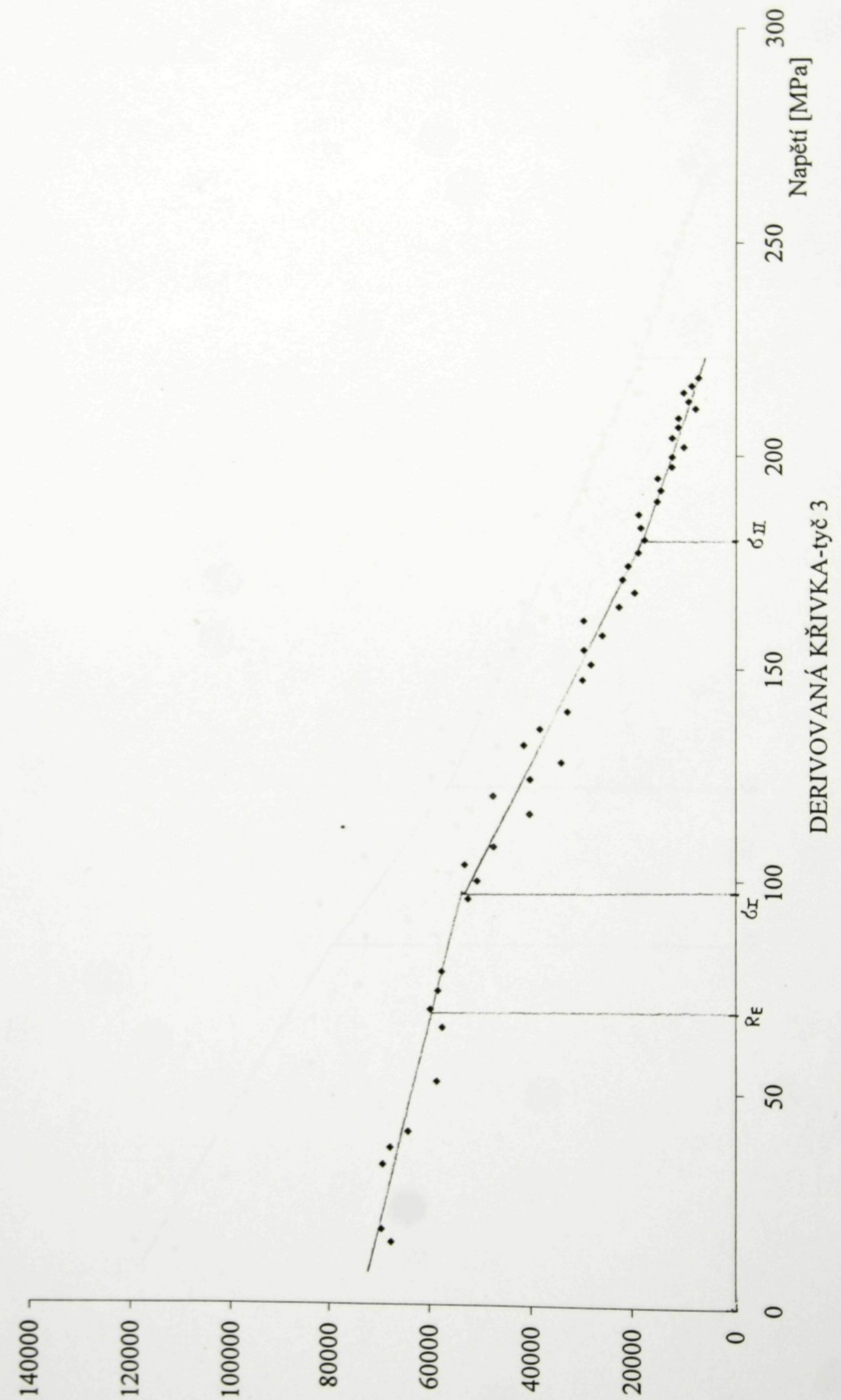


LOGARITMOVANÁ KŘIVKA "NAPĚTÍ-POMĚRNÉ PRODLOUŽENÍ"


Modul pružnosti [MPa]
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
0
50
100
150
200
250
300
Napětí [MPa]
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 1

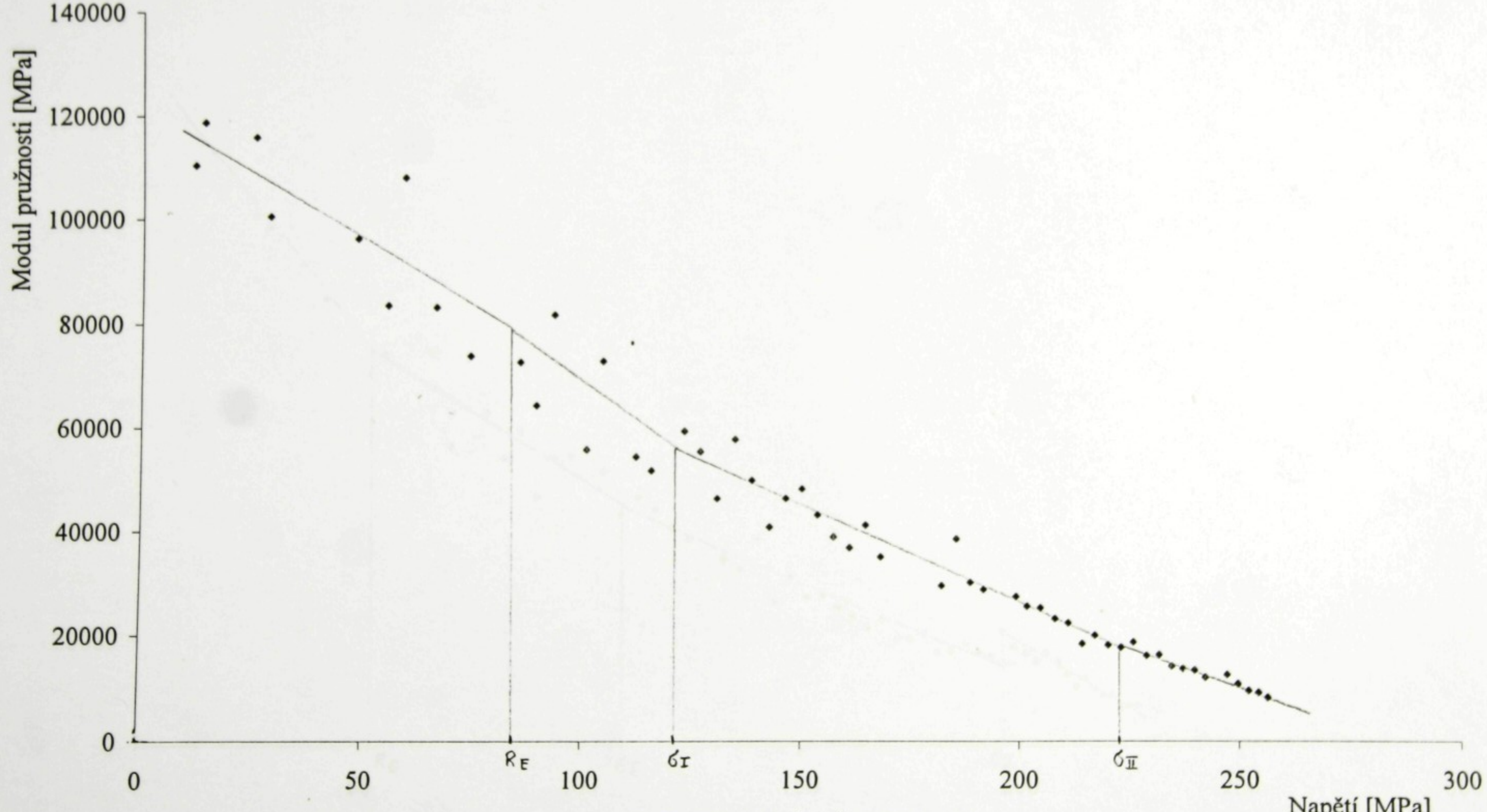

Modul pružnosti [MPa]
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
Napětí [MPa]
0
50
100
150
200
250
300
R_E
σ_I
σ_{II}
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 2

Příloha č.7.2

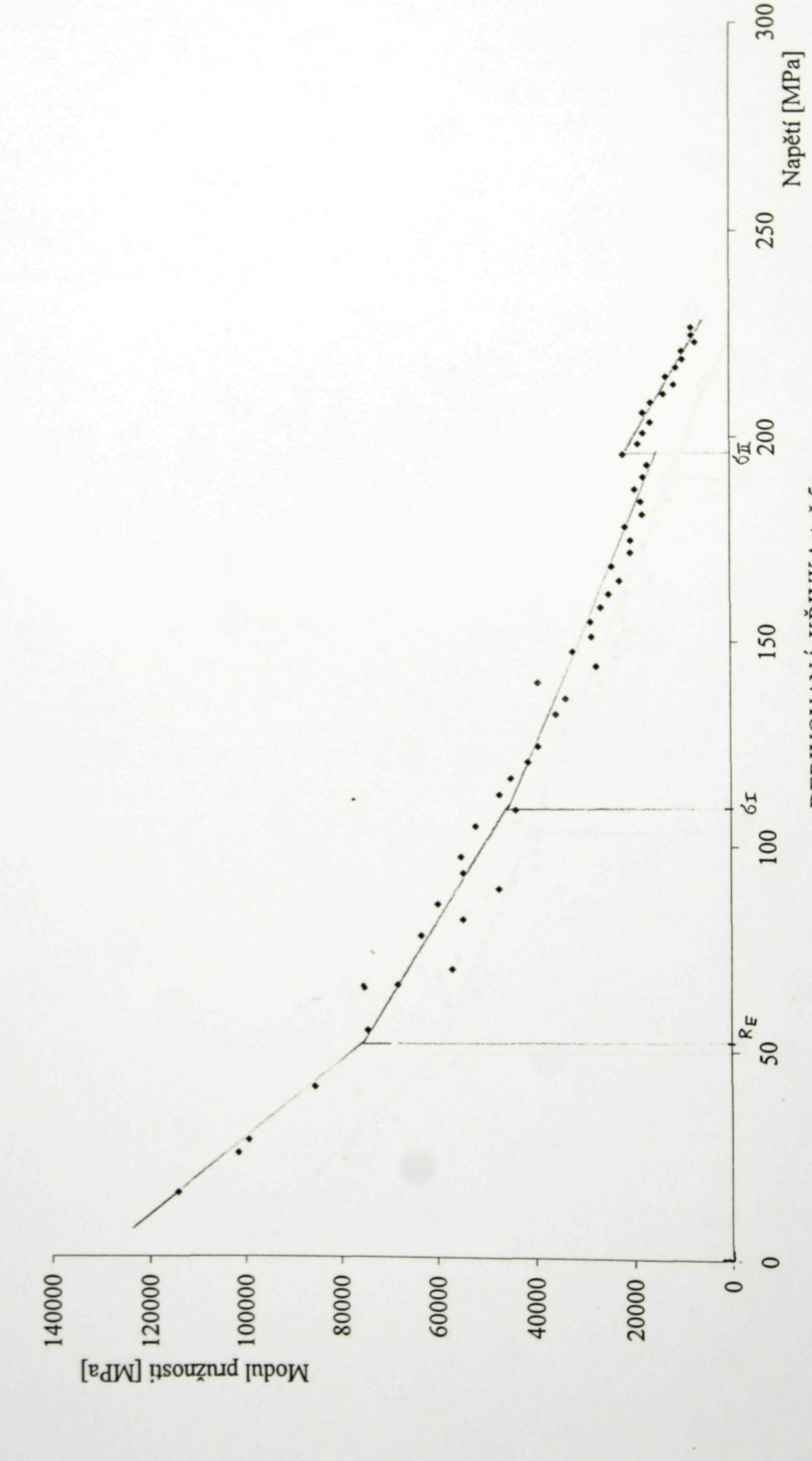


Modul pružnosti [MPa]
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
0
50
100
150
200
250
300
Napětí [MPa]
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 3

Příloha č.7.3

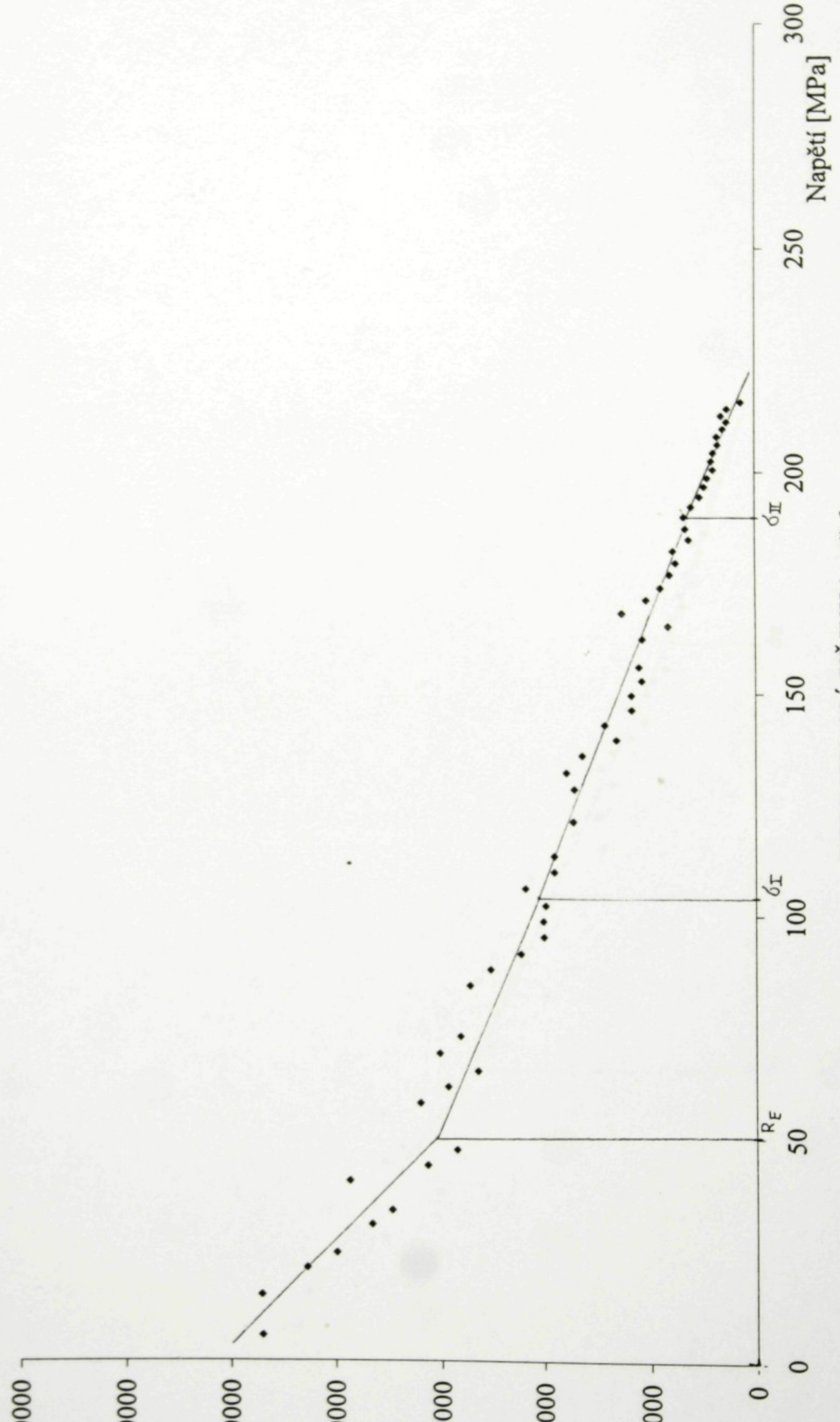


DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč4



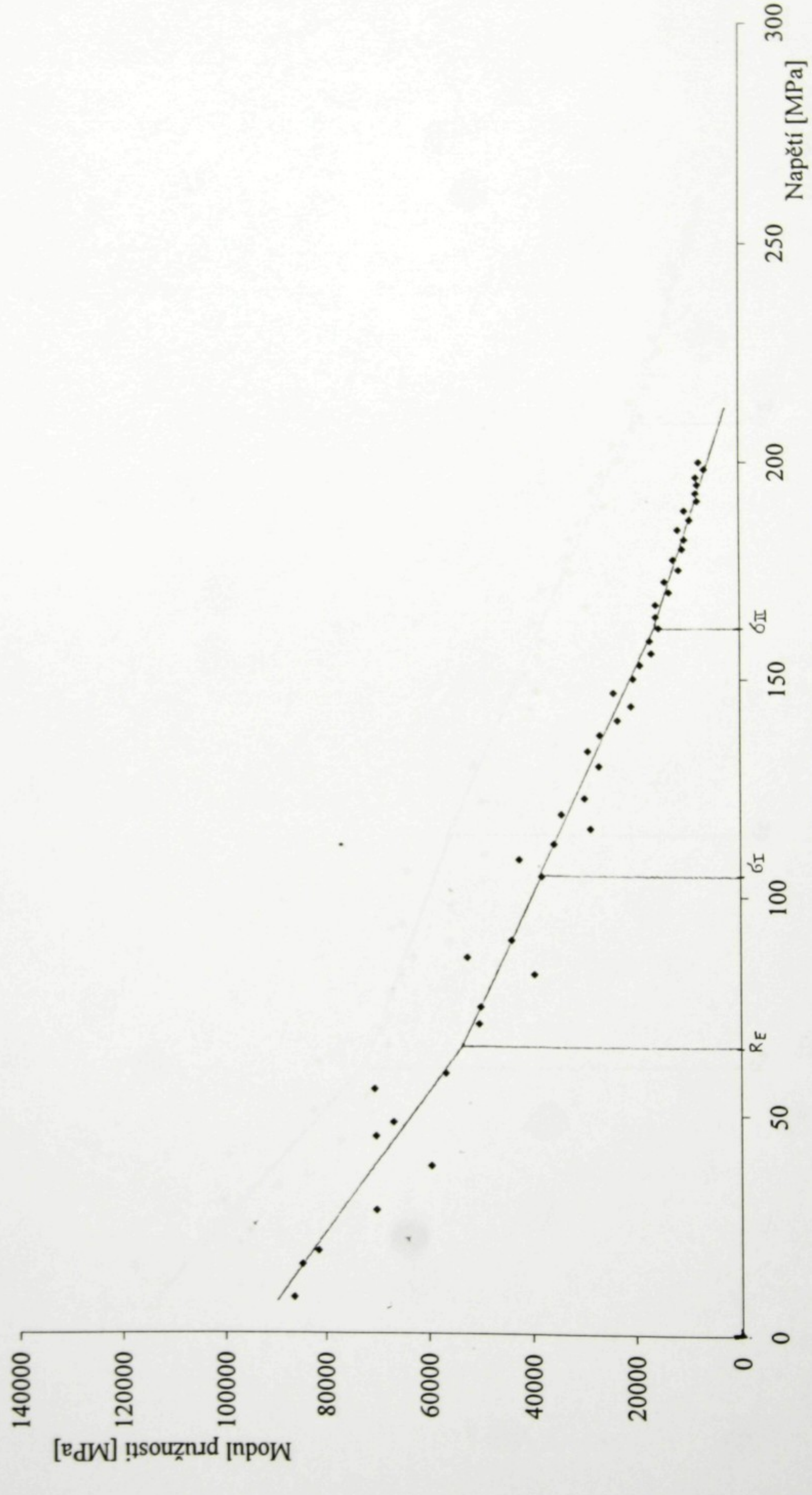
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 5

Příloha č.7.5



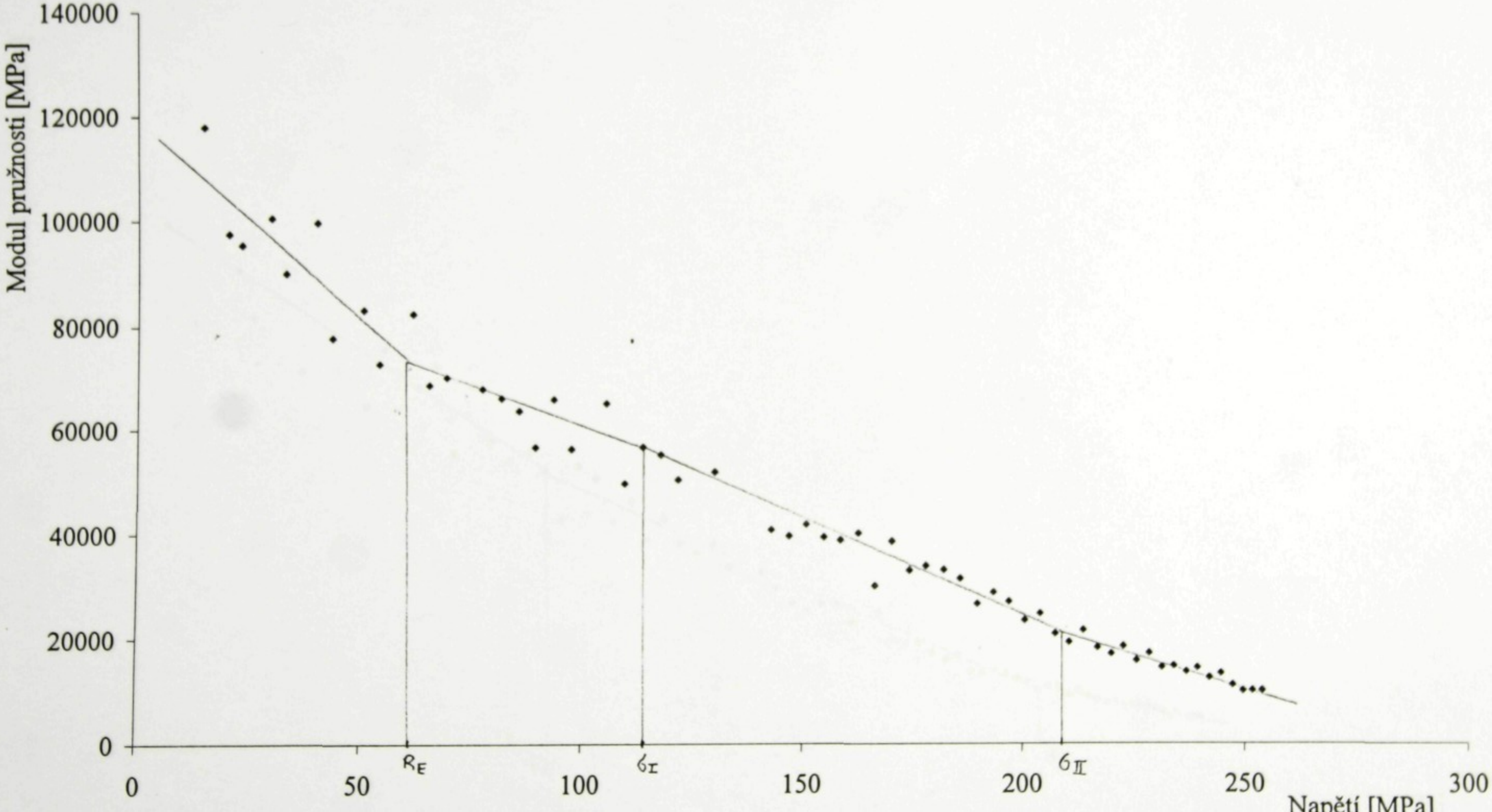
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 6

Příloha č.7.6



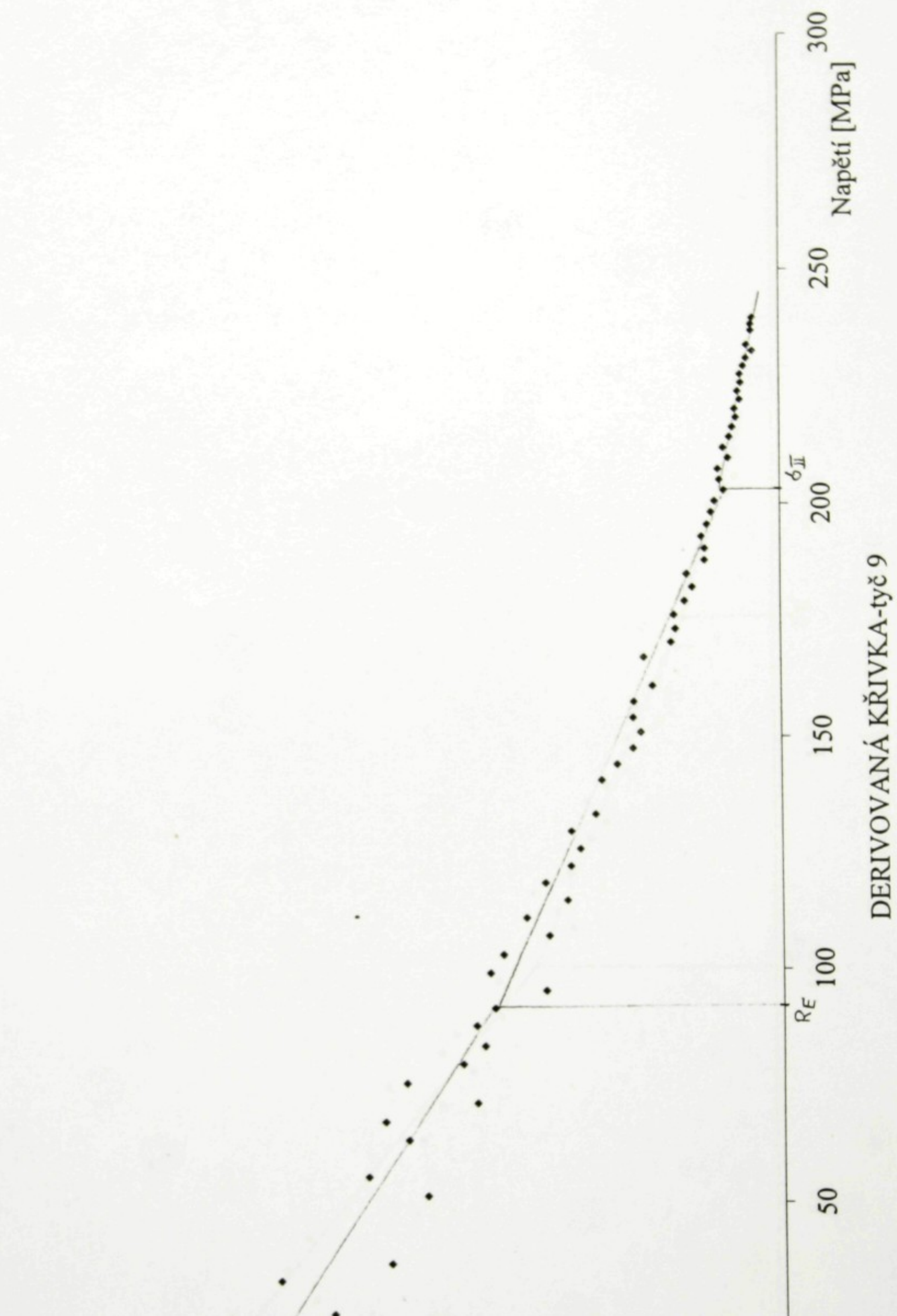
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč7

Příloha č.7.7

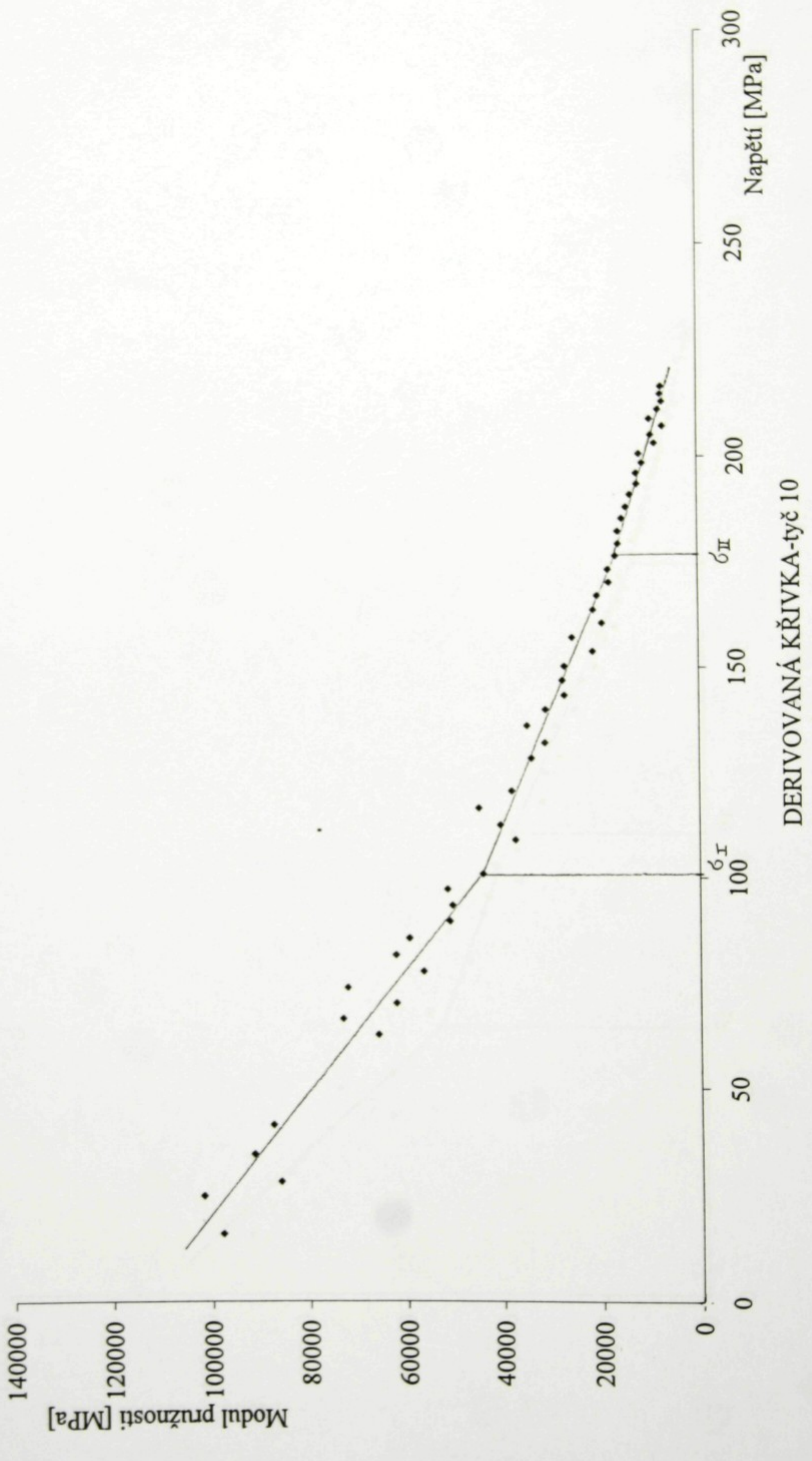


DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč8

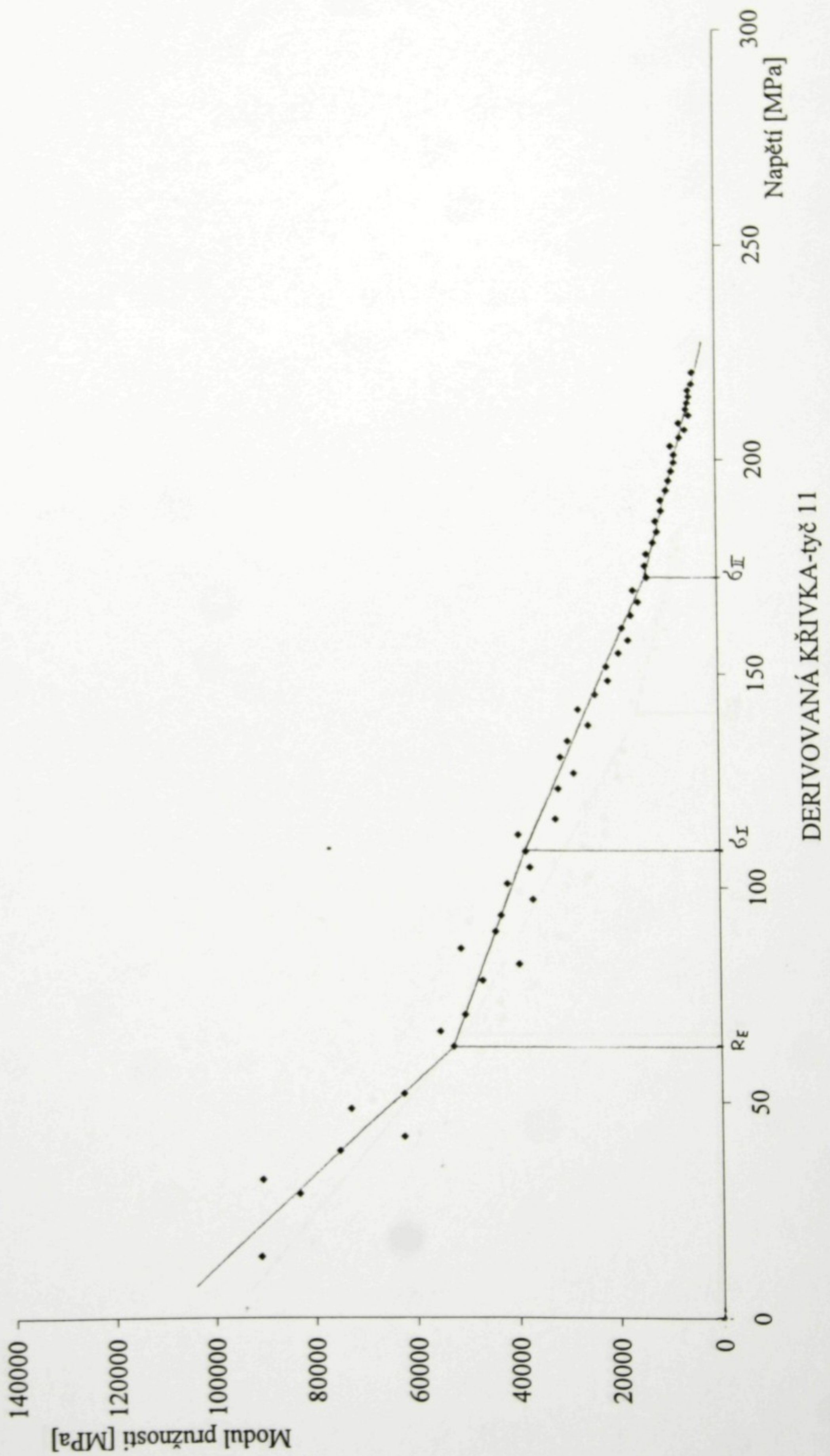
Příloha č.7.8


Modul pružnosti [MPa]
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
0
50
100
150
200
250
300
Napětí [MPa]
R_E
σ_{II}
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 9

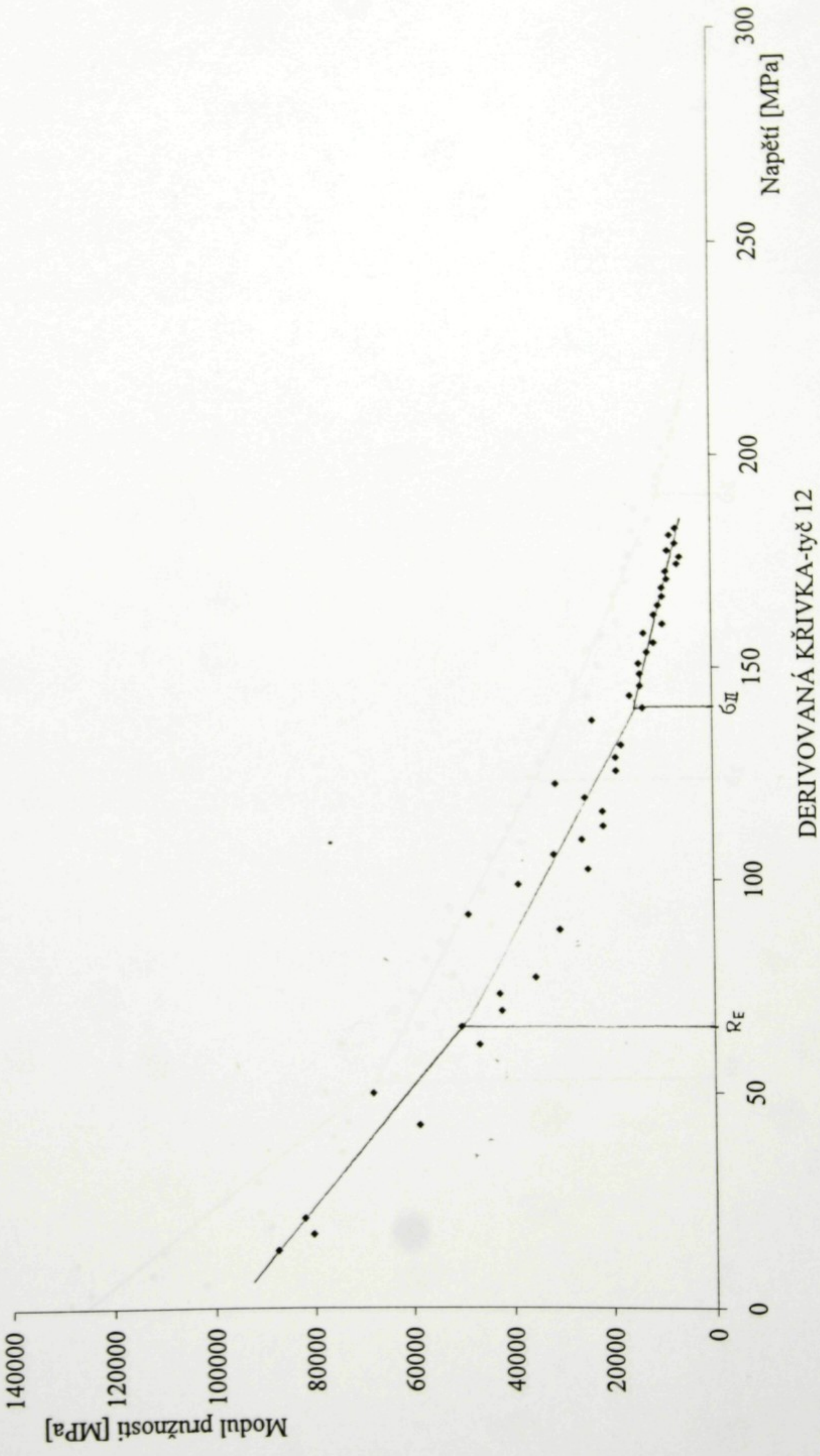
Příloha č.7.9

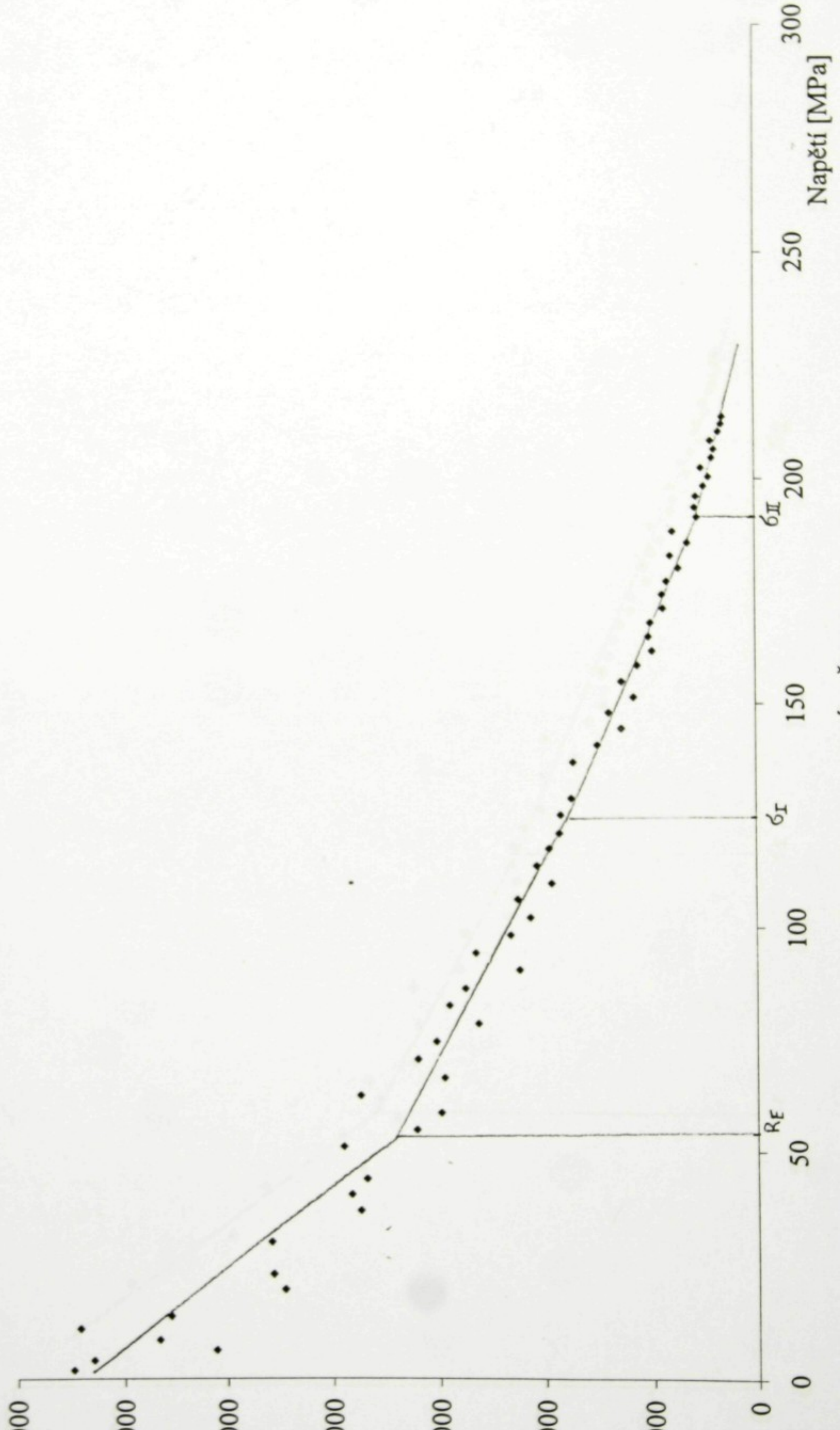


Příloha č.7.10



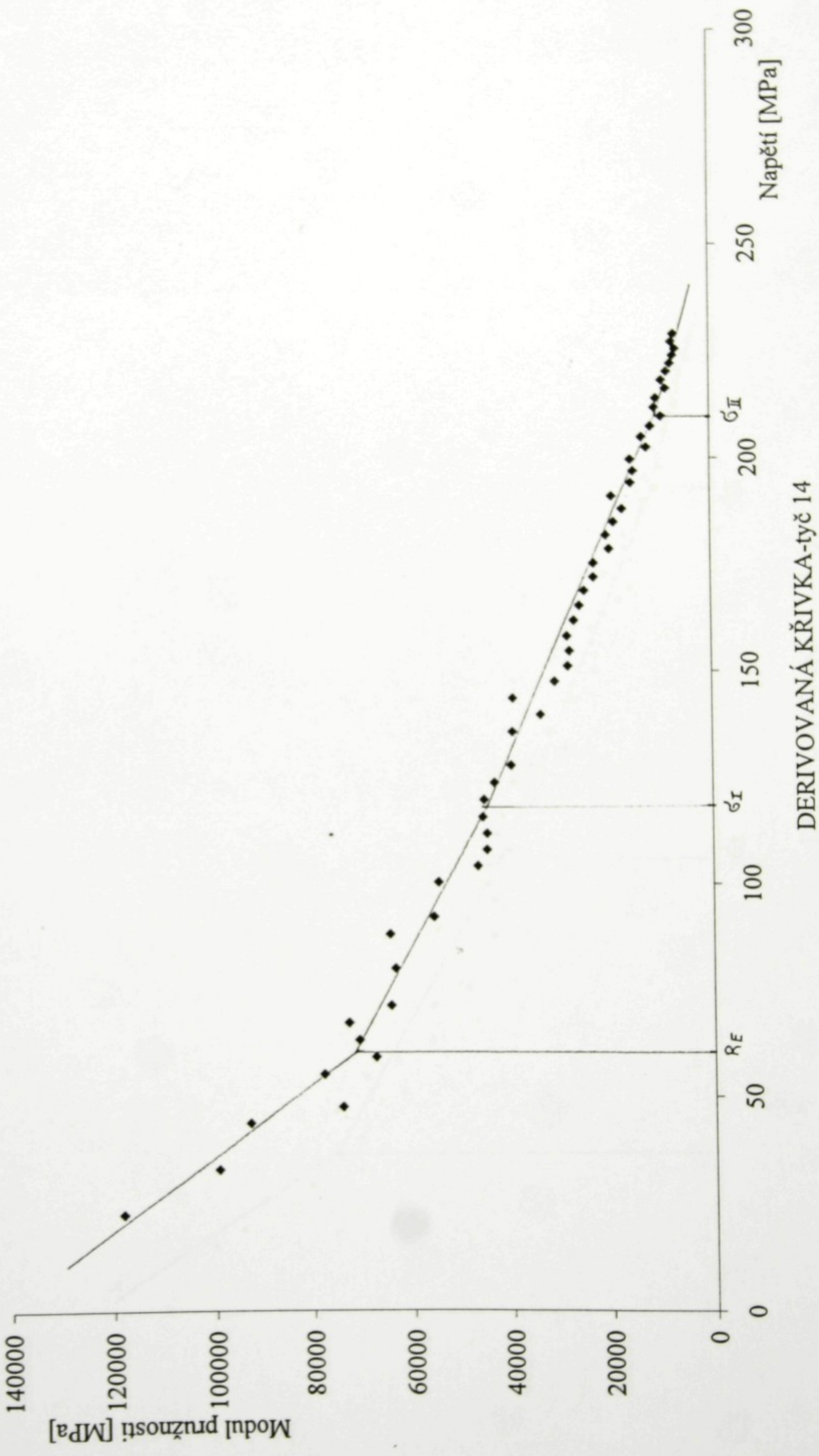
Příloha č.7.11


Modul pružnosti [MPa]
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
0
50
100
150
200
250
300
Napětí [MPa]
R_E
σ_{II}
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 12

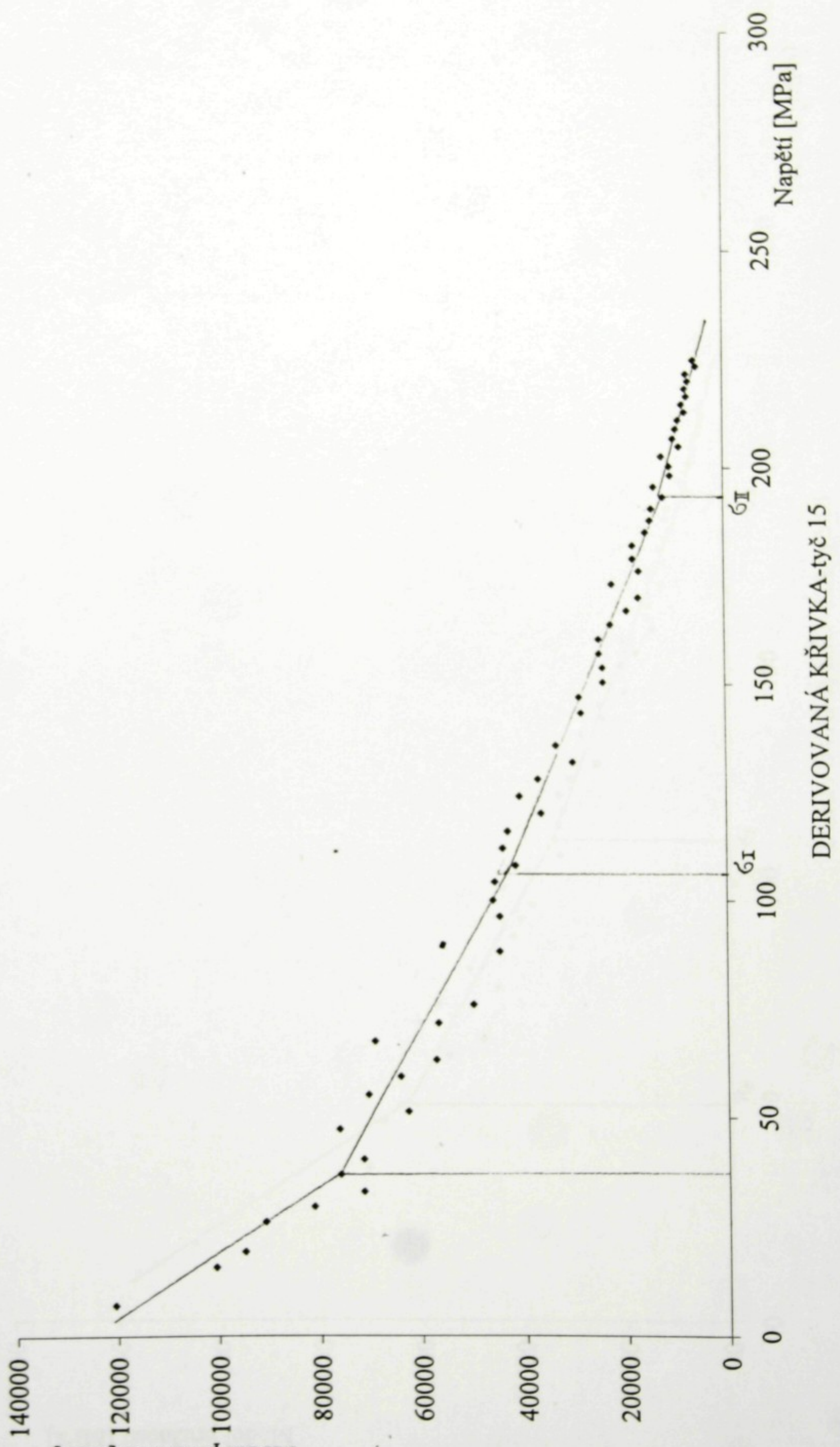


DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 13

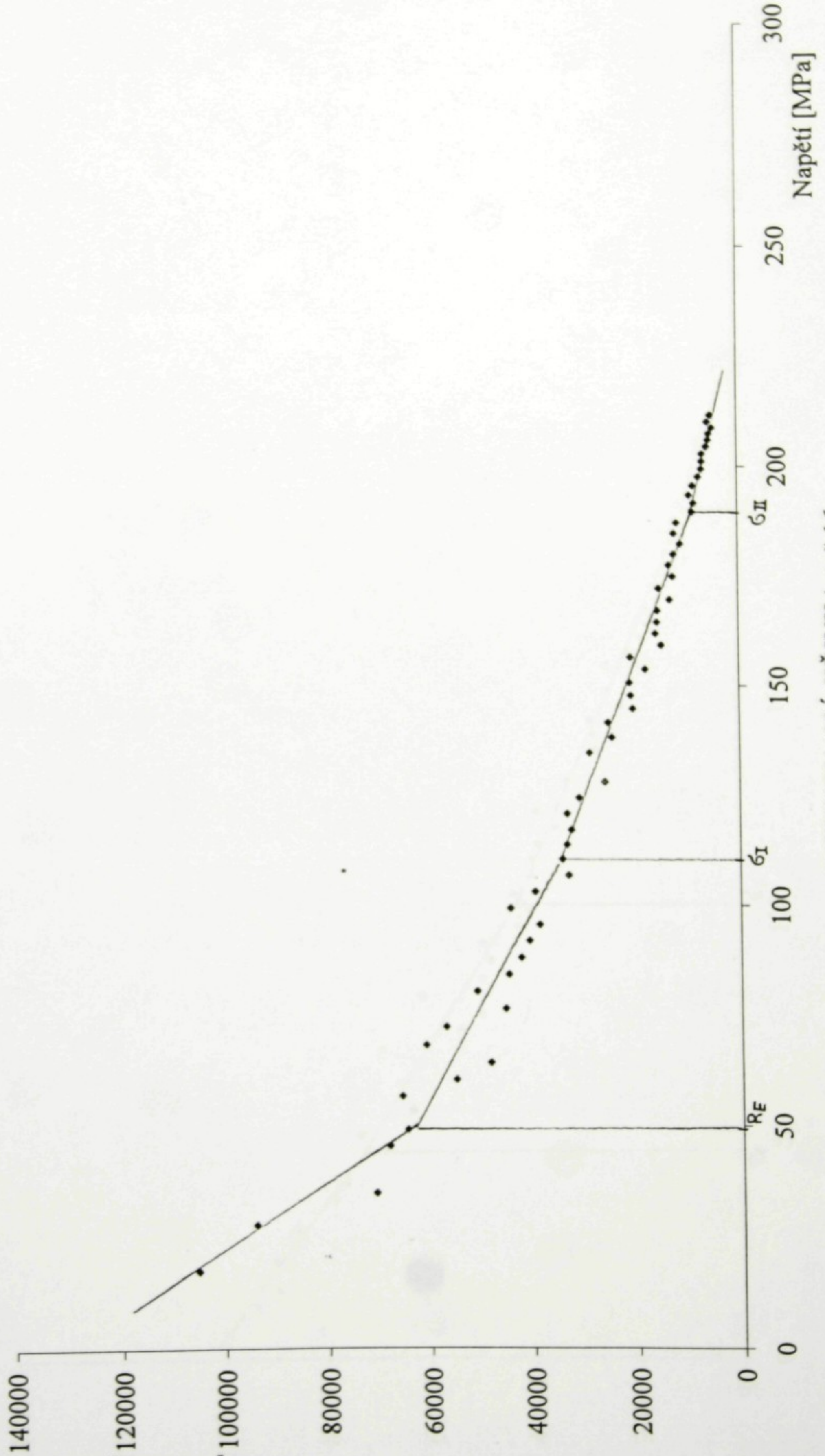
Příloha č.7.13



DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 14
Modul pružnosti [MPa]
Napětí [MPa]
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
140000
0
50
100
150
200
250
300

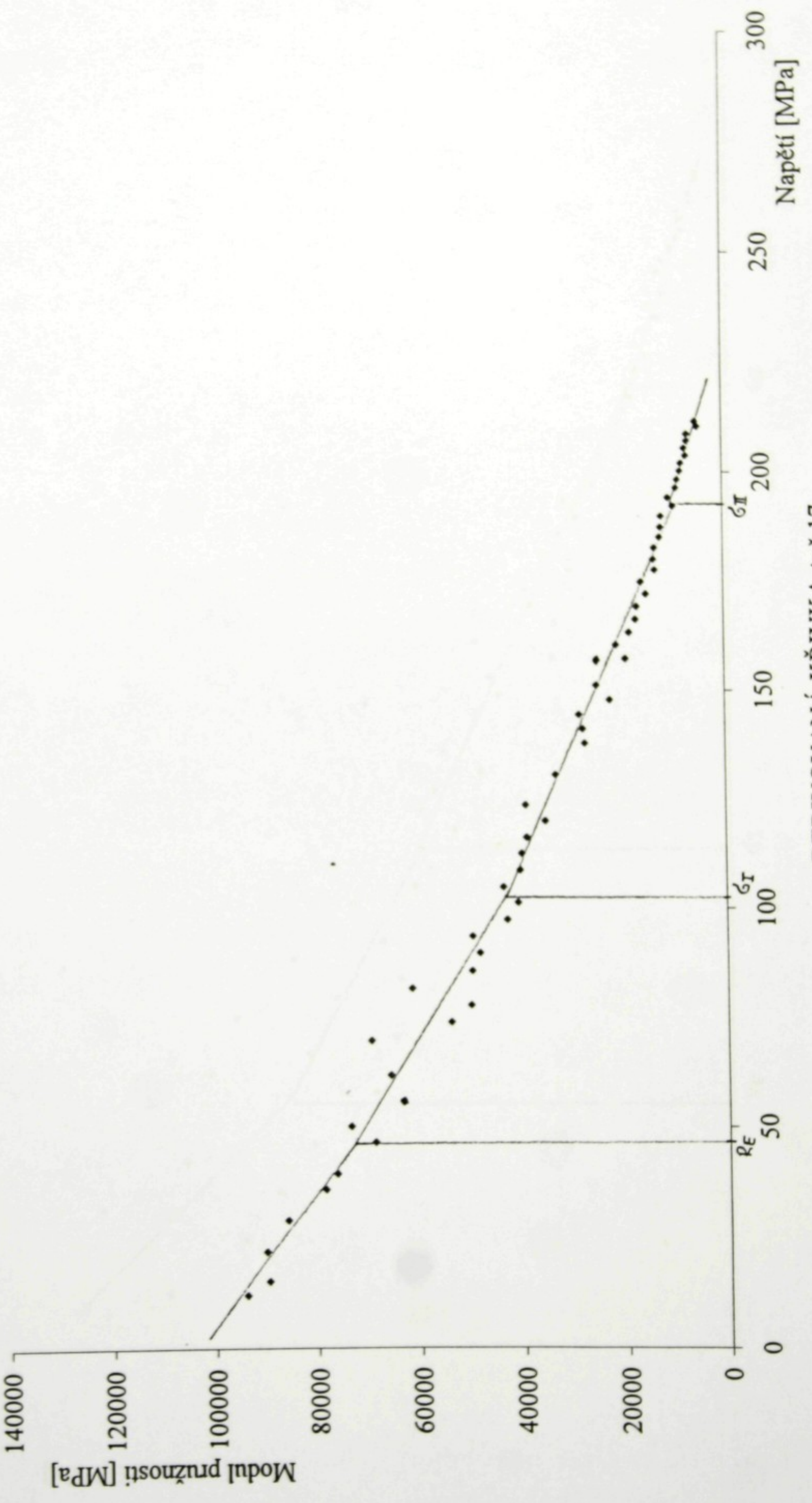


Příloha č.7.15



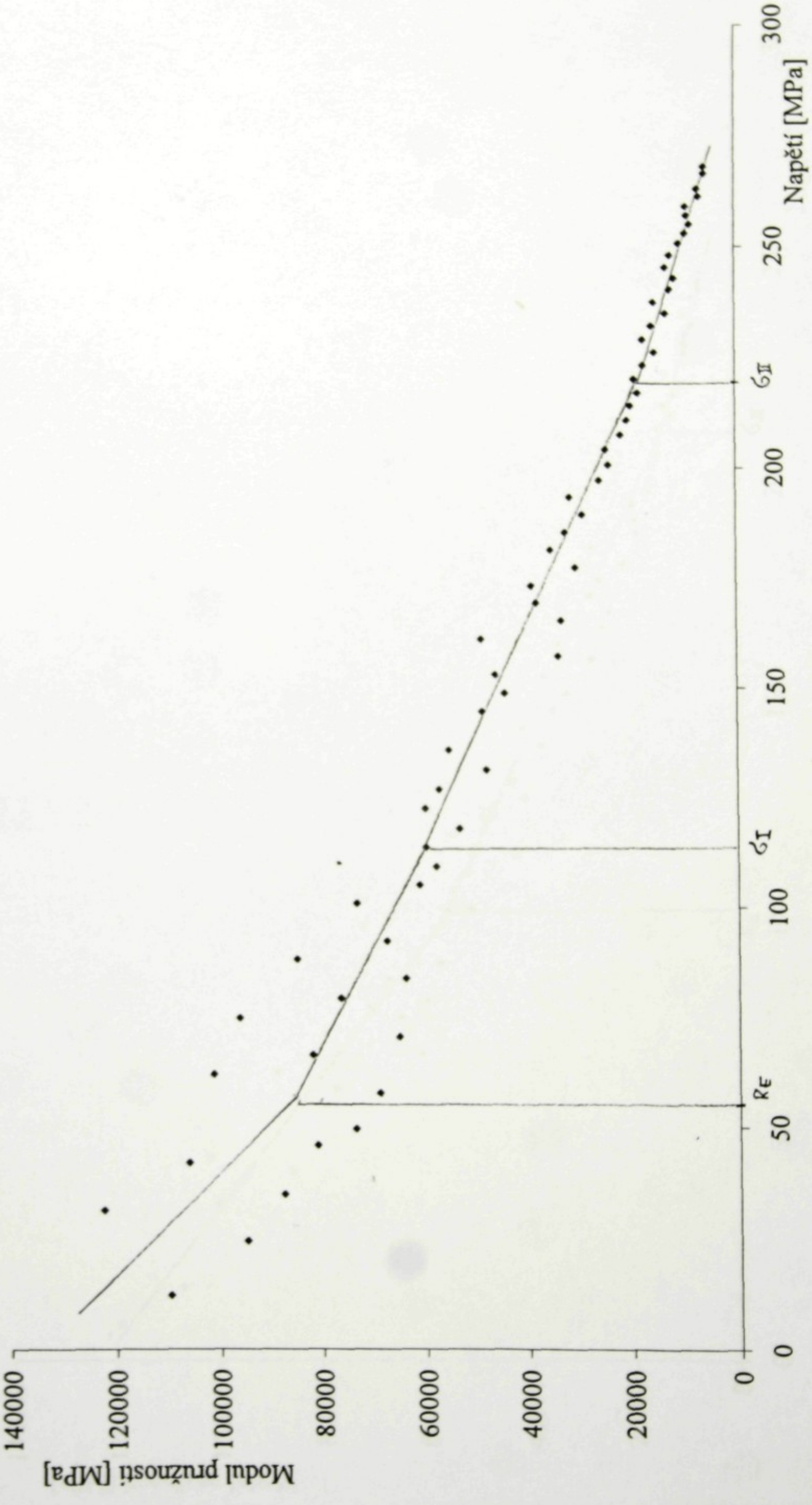
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 16

Příloha č.7.16

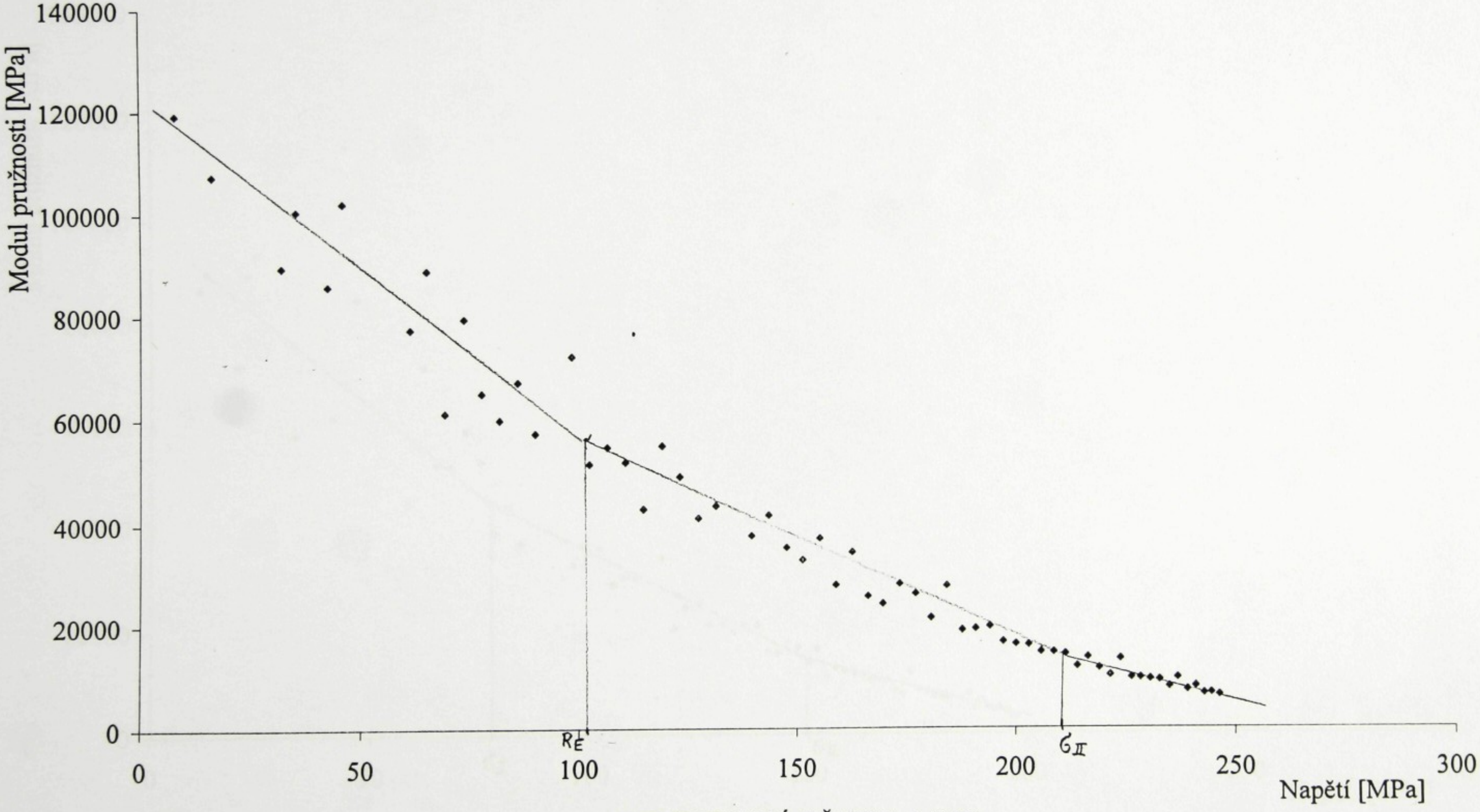


DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 17

Příloha č.7.17

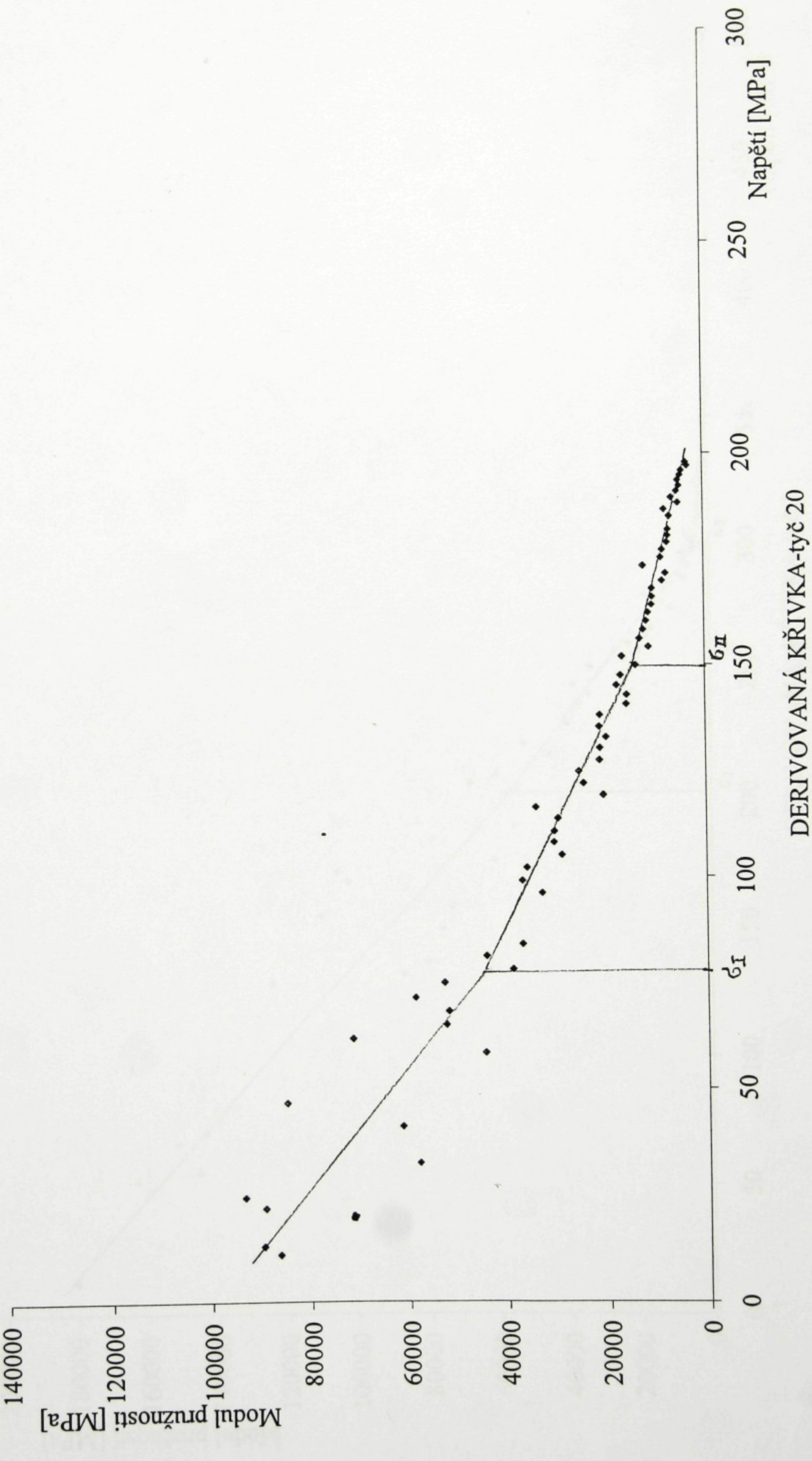


DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 18

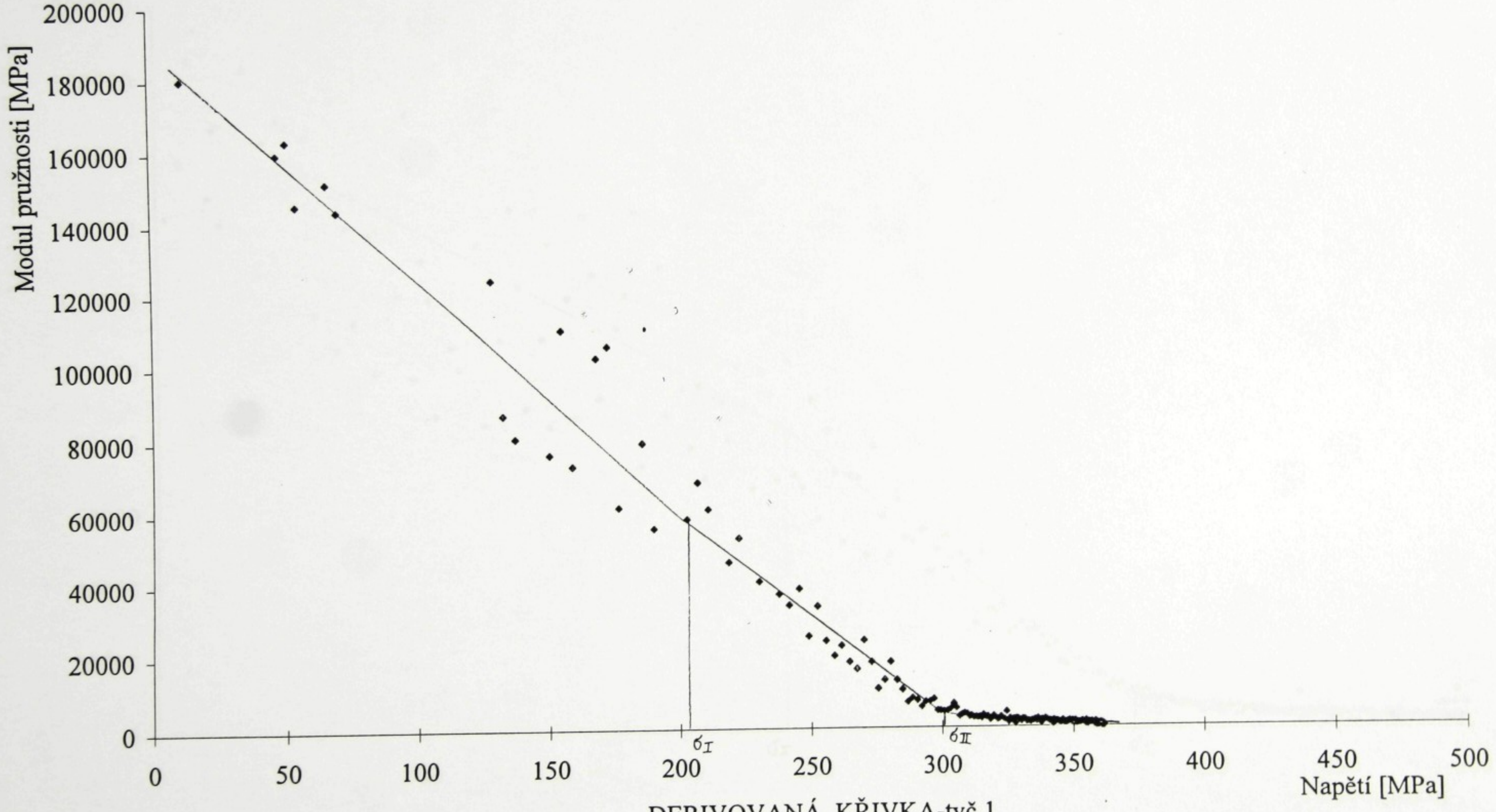


DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 19

Příloha č.7.19

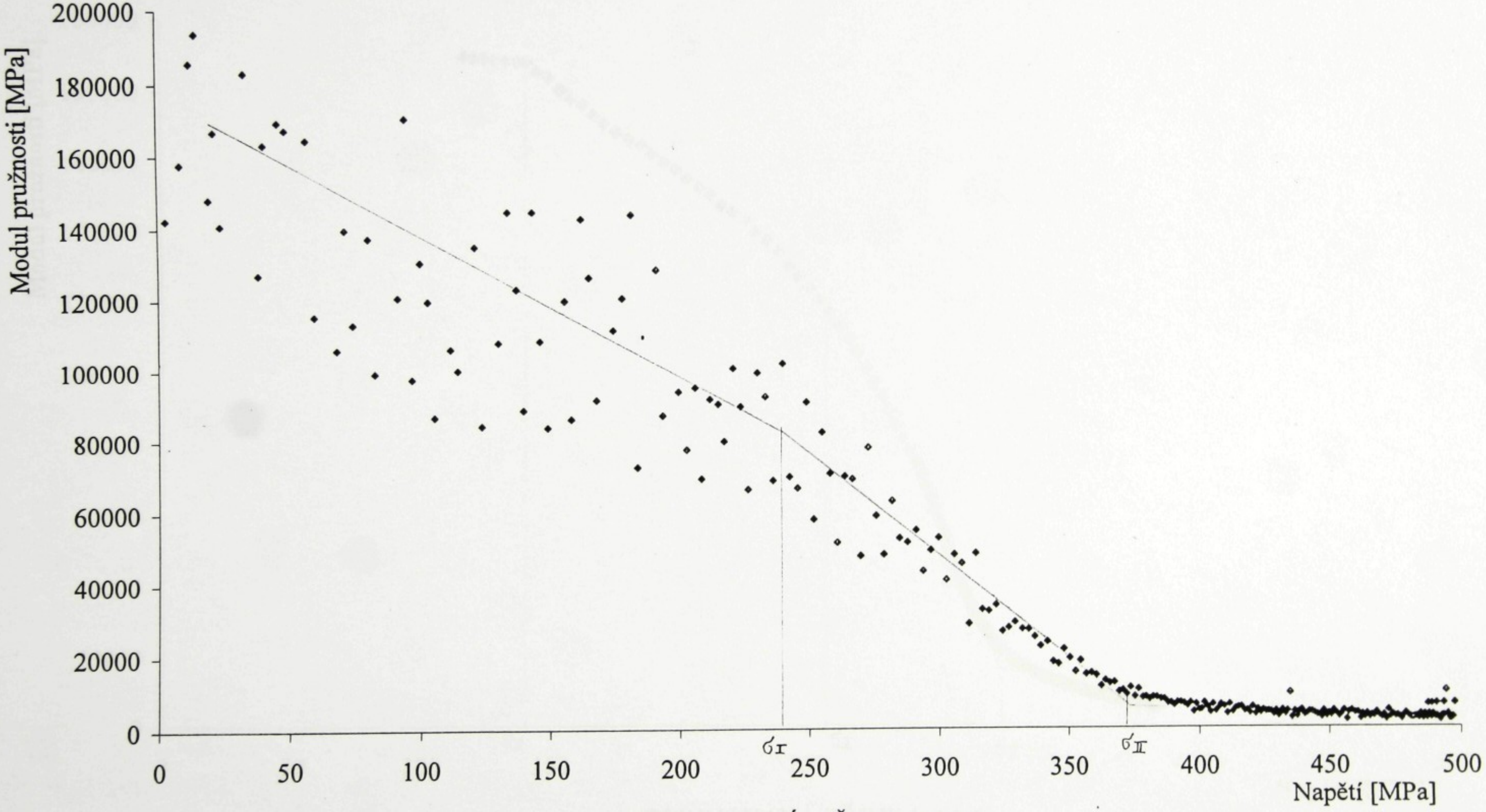


Příloha č.7.20

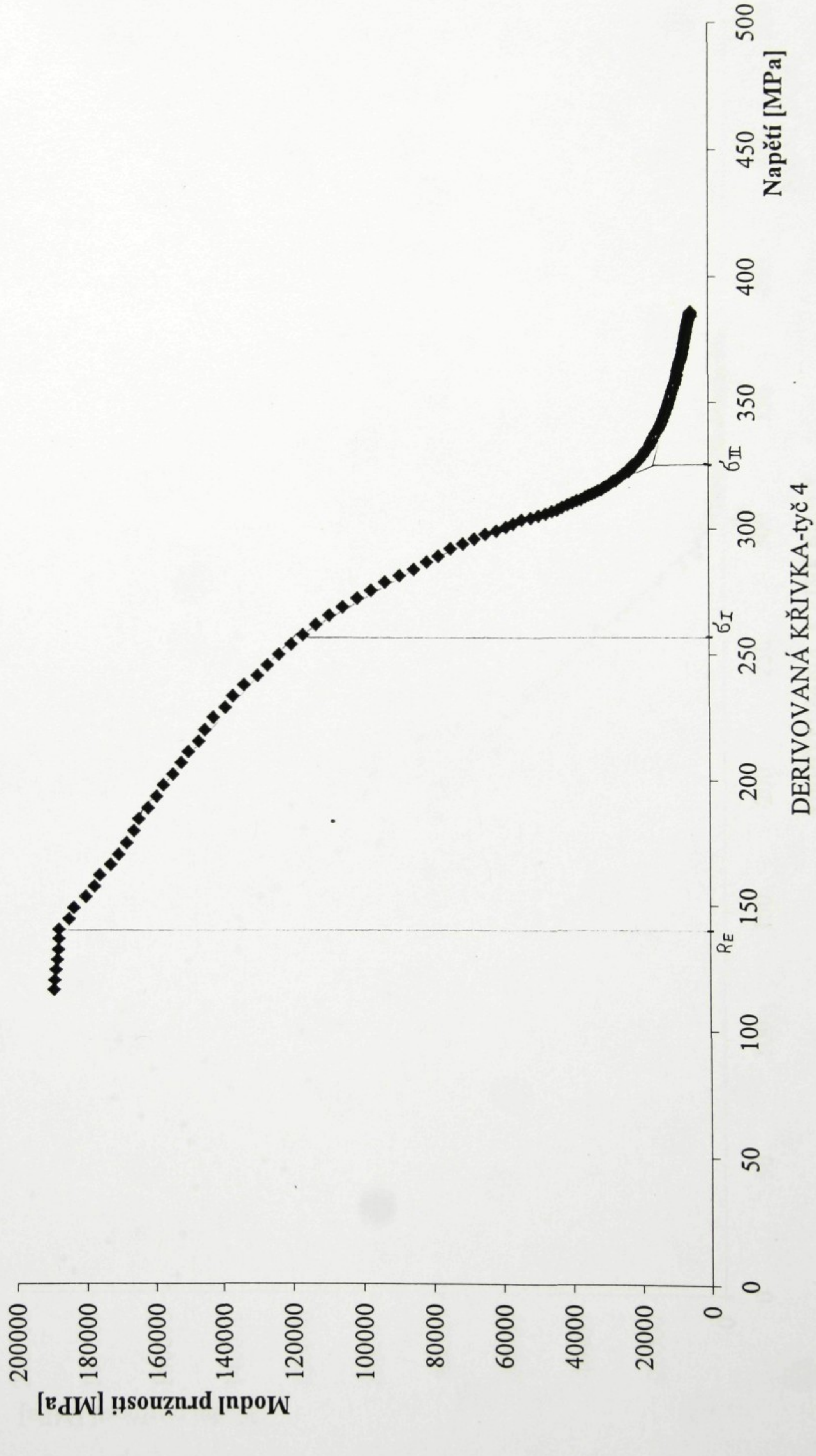


DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 1

Příloha č.8.2

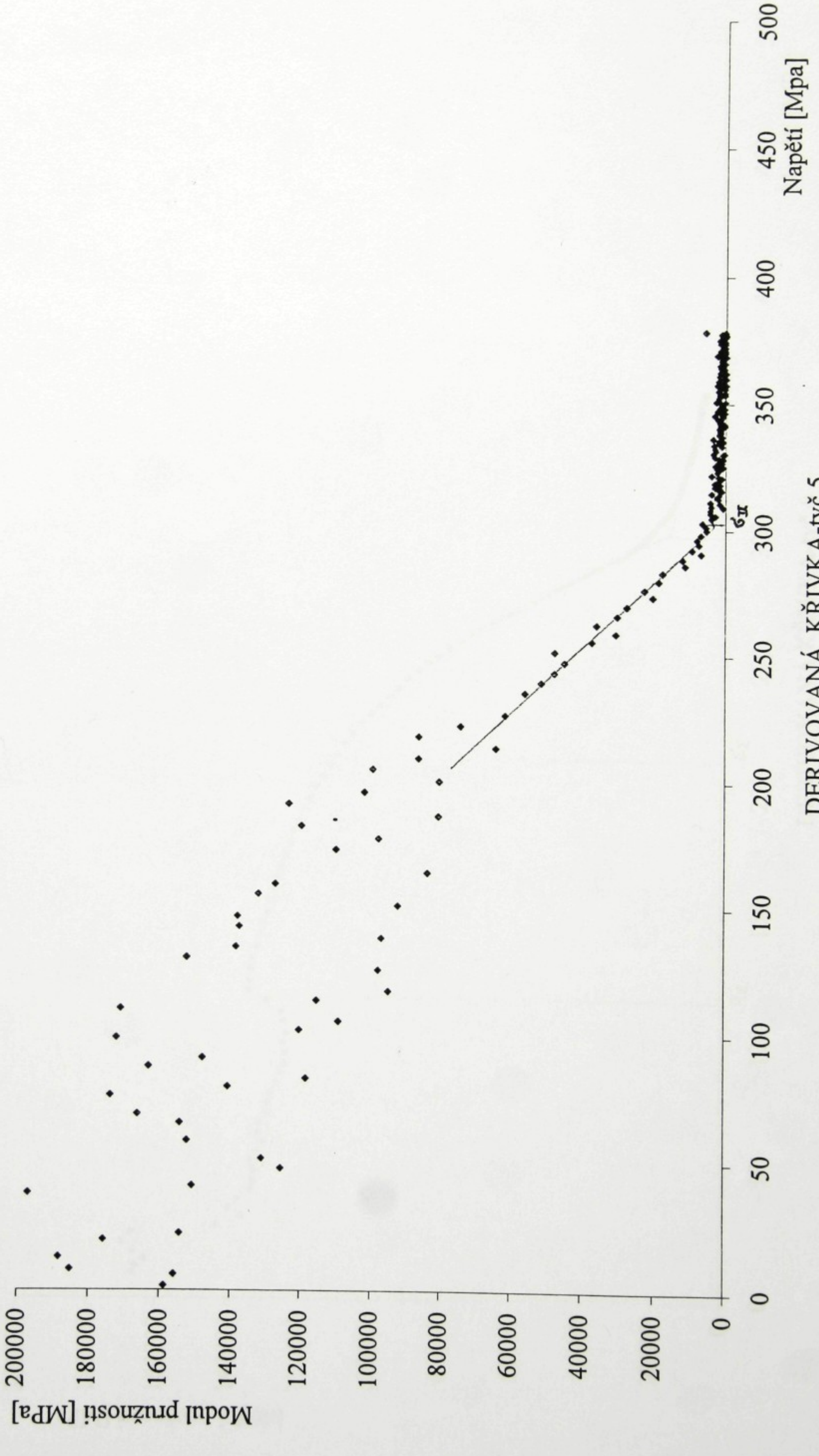


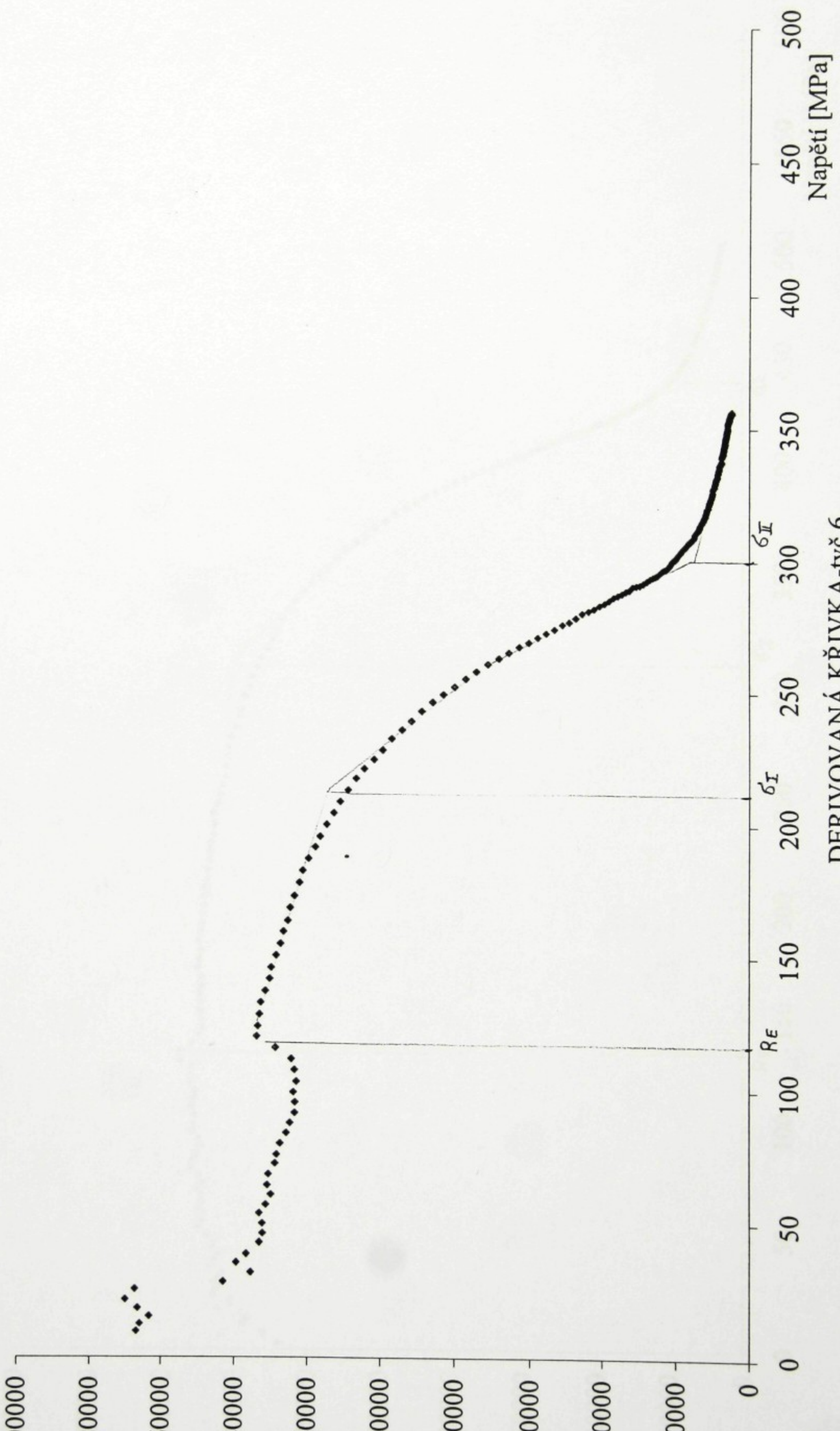
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 2

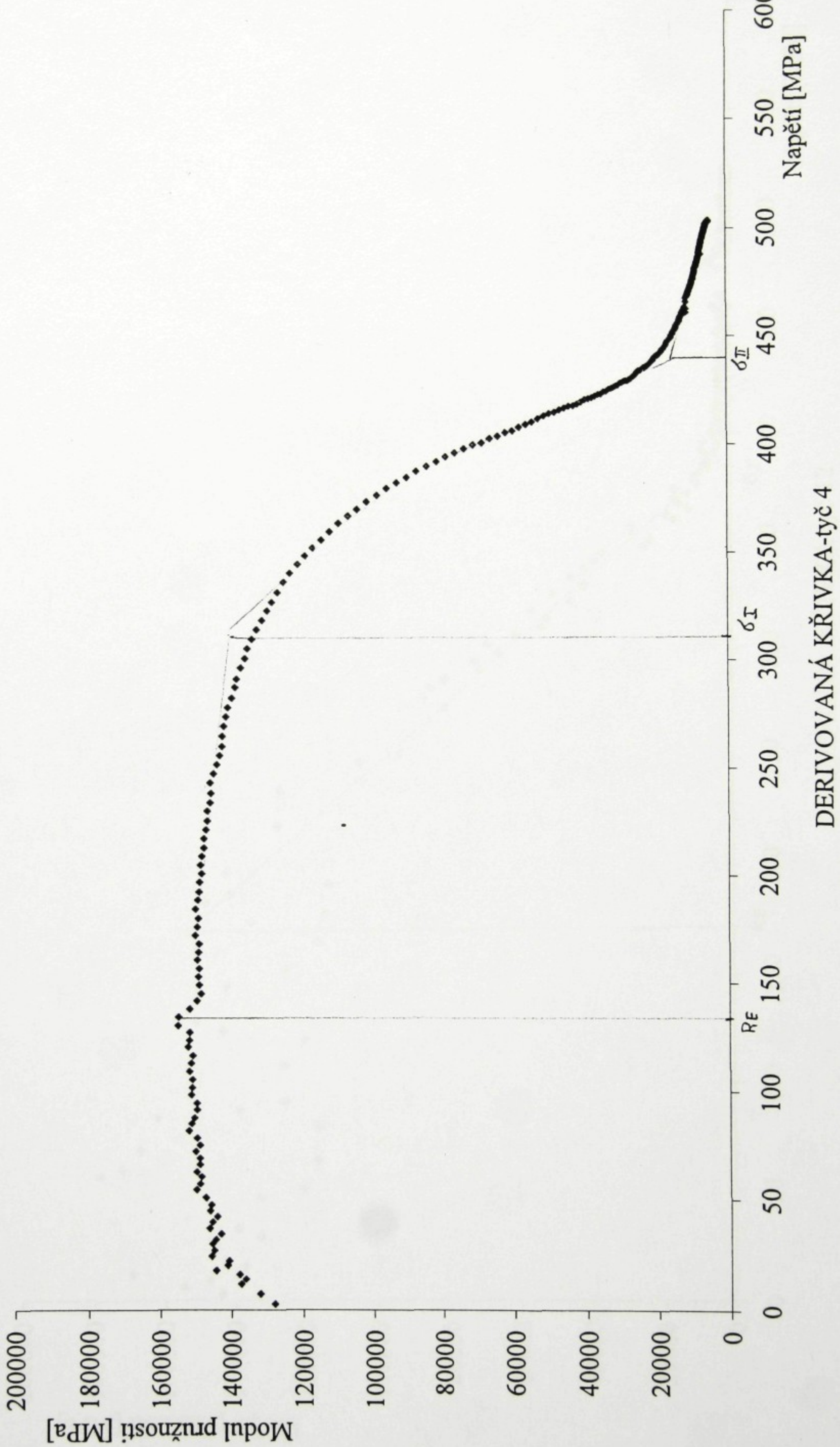


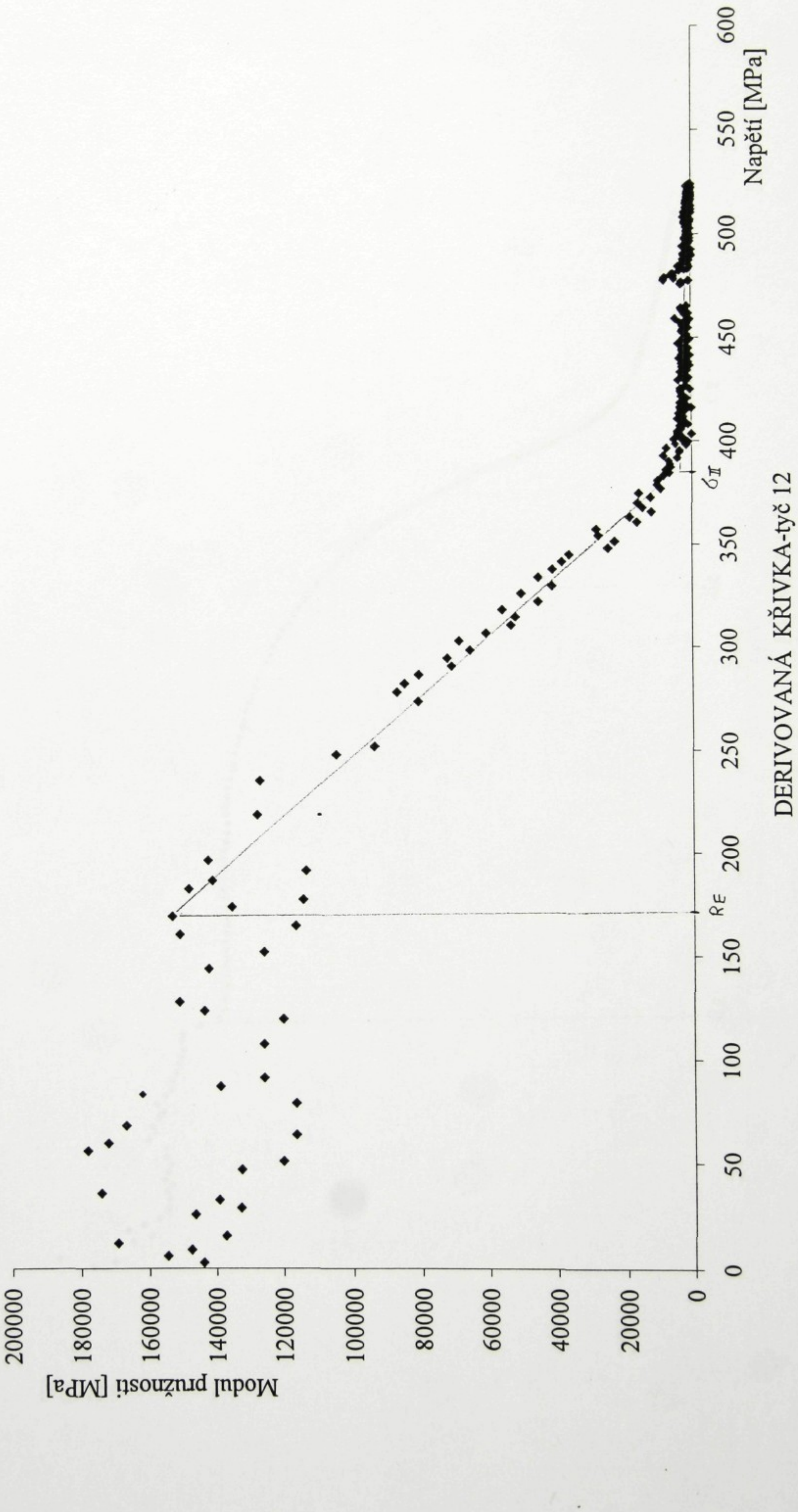
Modul pružnosti [MPa]
200000
180000
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
R_E
σ_I
σ_{II}
Napětí [MPa]
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 4

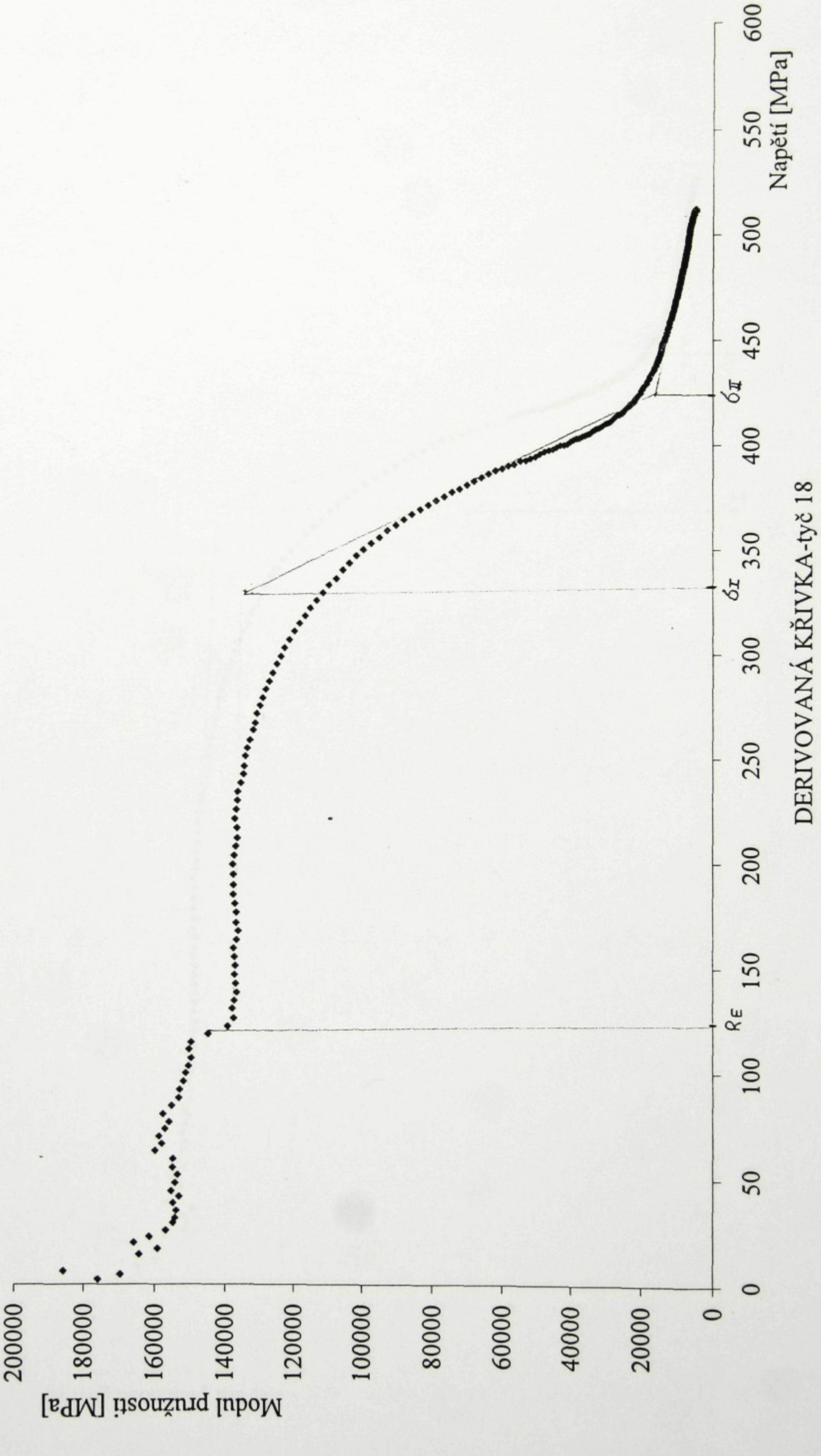
Příloha č.8.4


Modul pružnosti [MPa]
200000
180000
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
Napětí [Mpa]
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 5

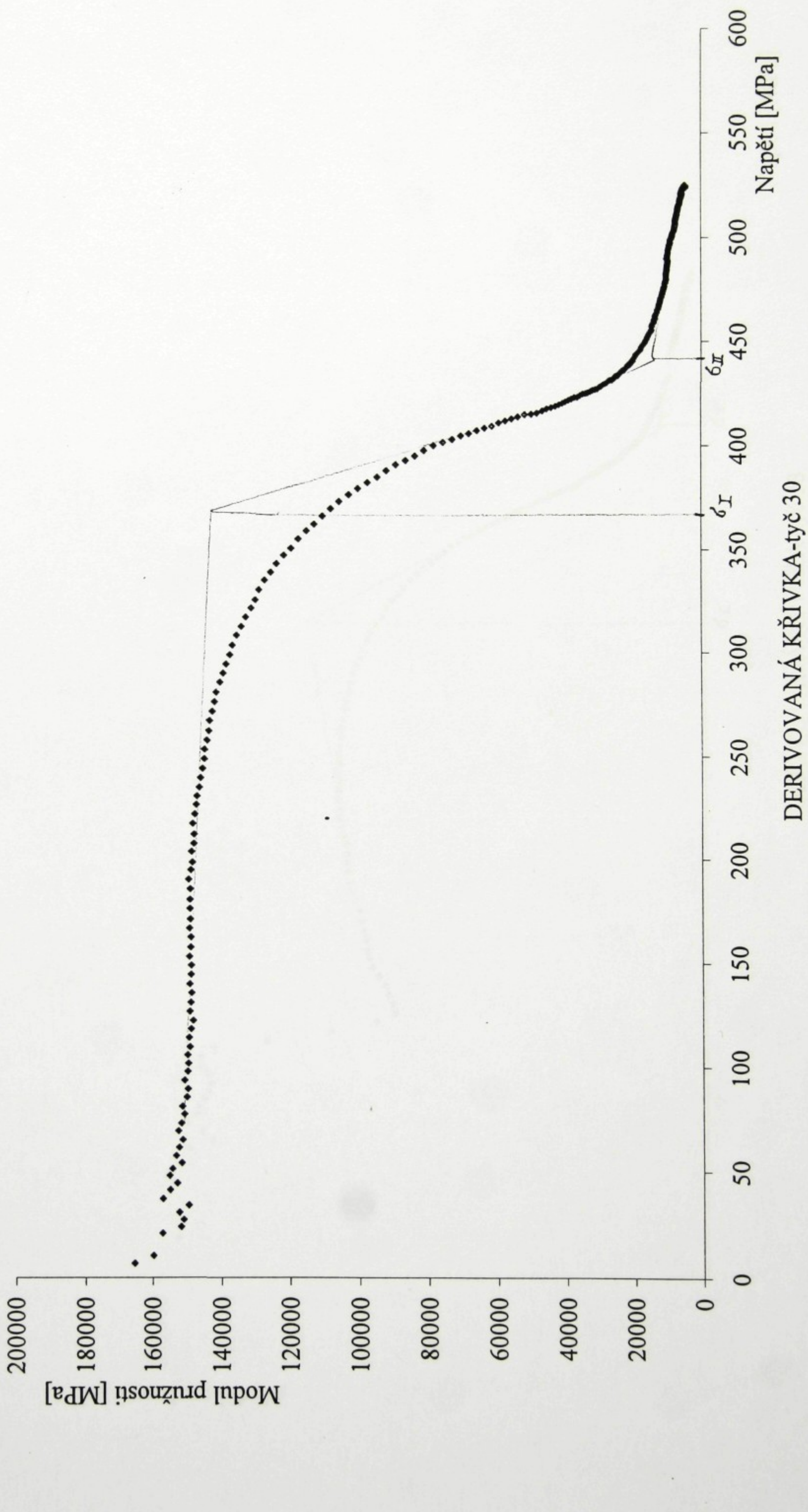

Modul pružnosti [MPa]
200000
180000
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
Napětí [MPa]
R_E
σ_I
σ_{II}
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 6


Modul pružnosti [MPa]
200000
180000
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
Napětí [MPa]
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 4

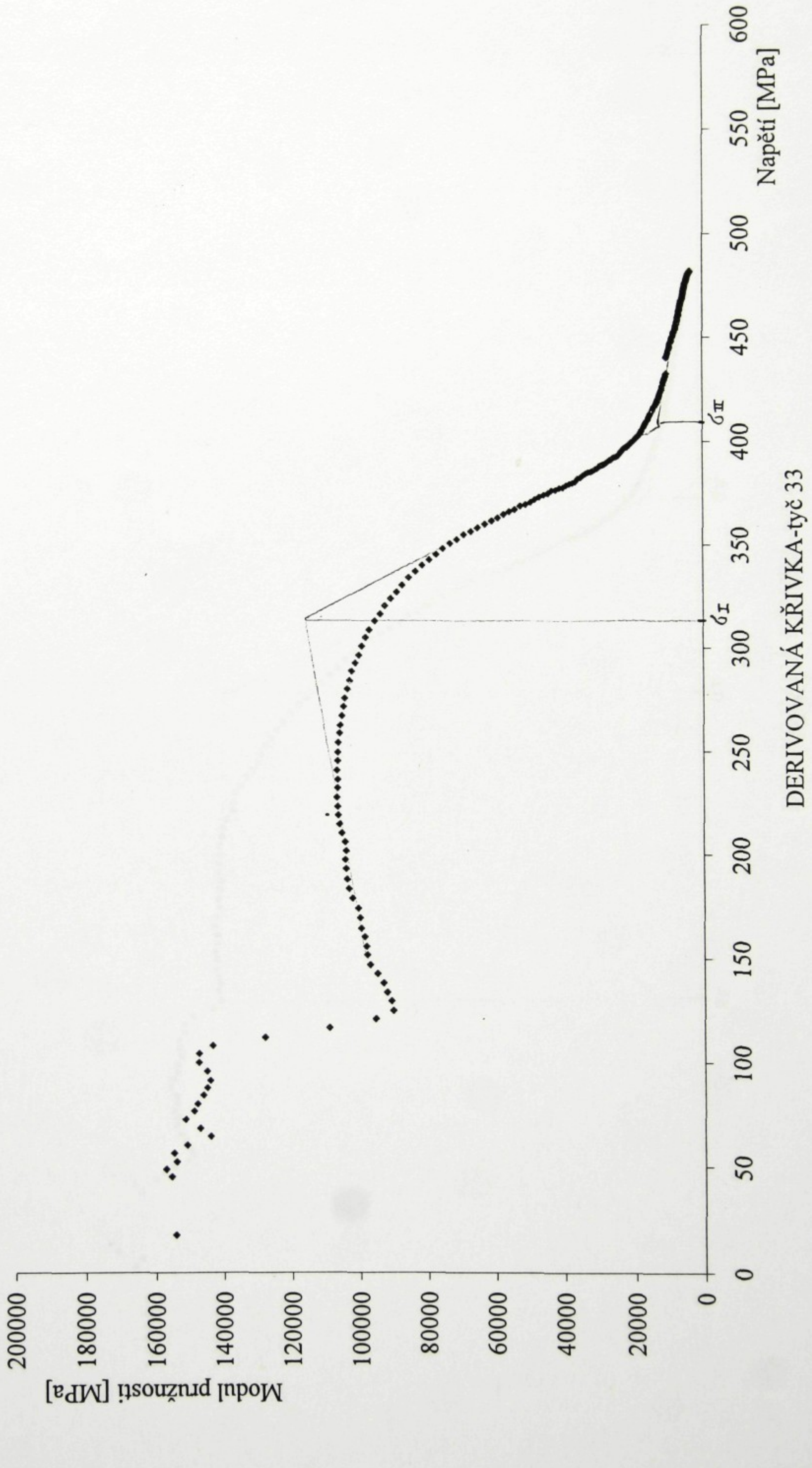

Modul pružnosti [MPa]
200000
180000
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
R_E
σ_{II}
Napětí [MPa]
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 12

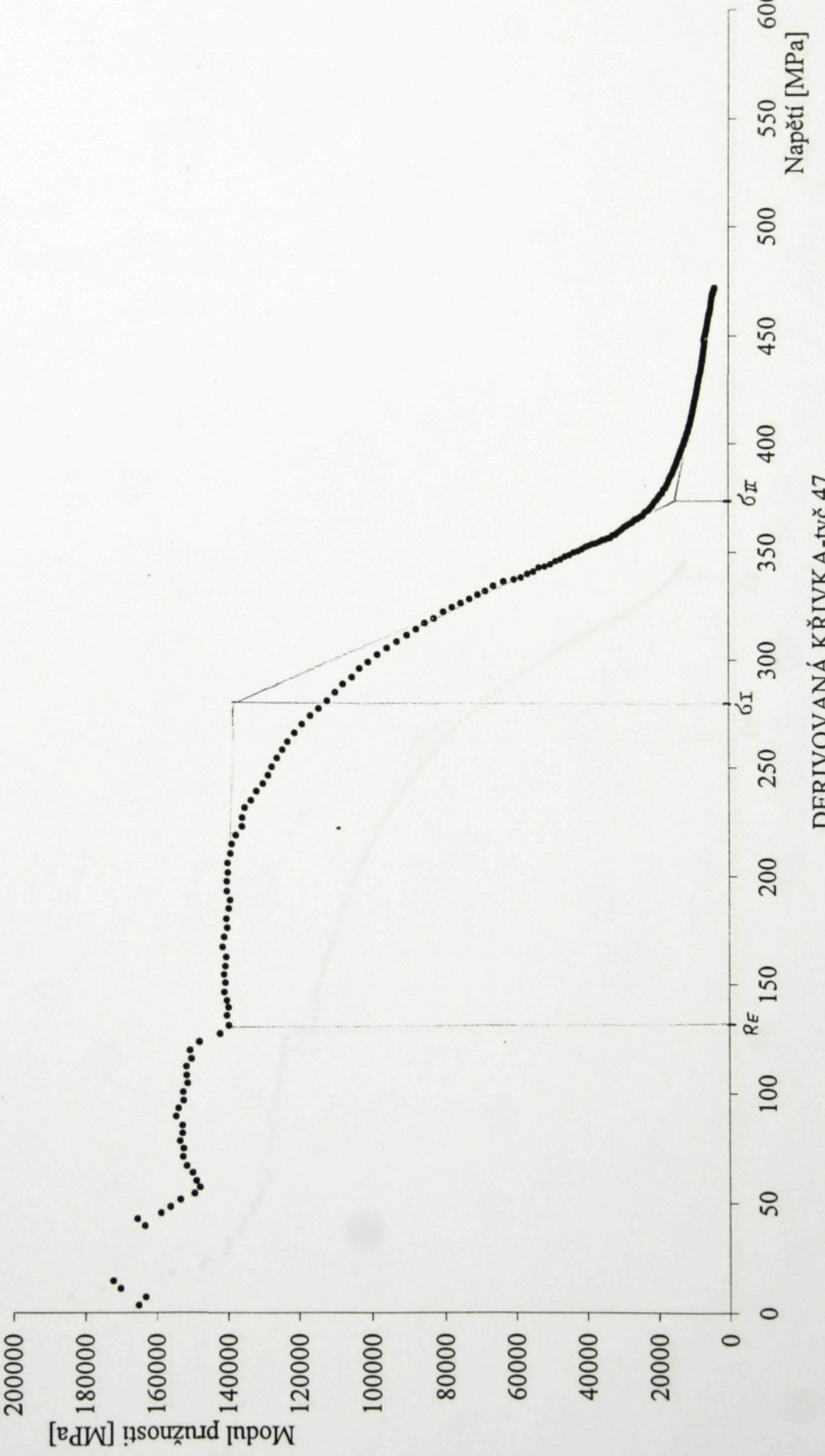

DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 18
Modul pružnosti [MPa]
Napětí [MPa]
200000
180000
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
R_E
σ_I
σ_{II}

Příloha č.9.3

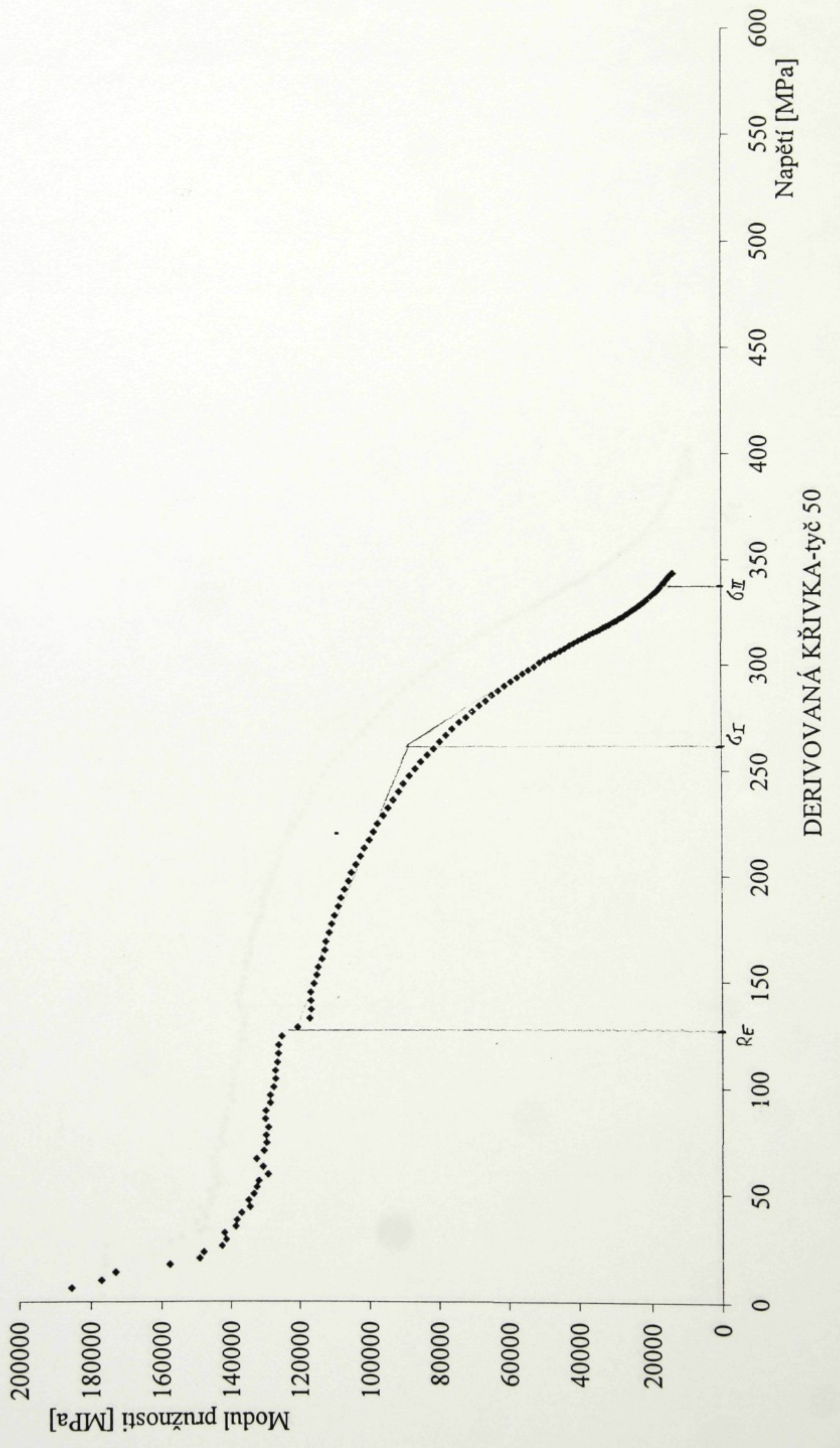

DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 30
Modul pružnosti [MPa]
Napětí [MPa]
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
140000
160000
180000
200000
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
σI
σII

Příloha č.9.4

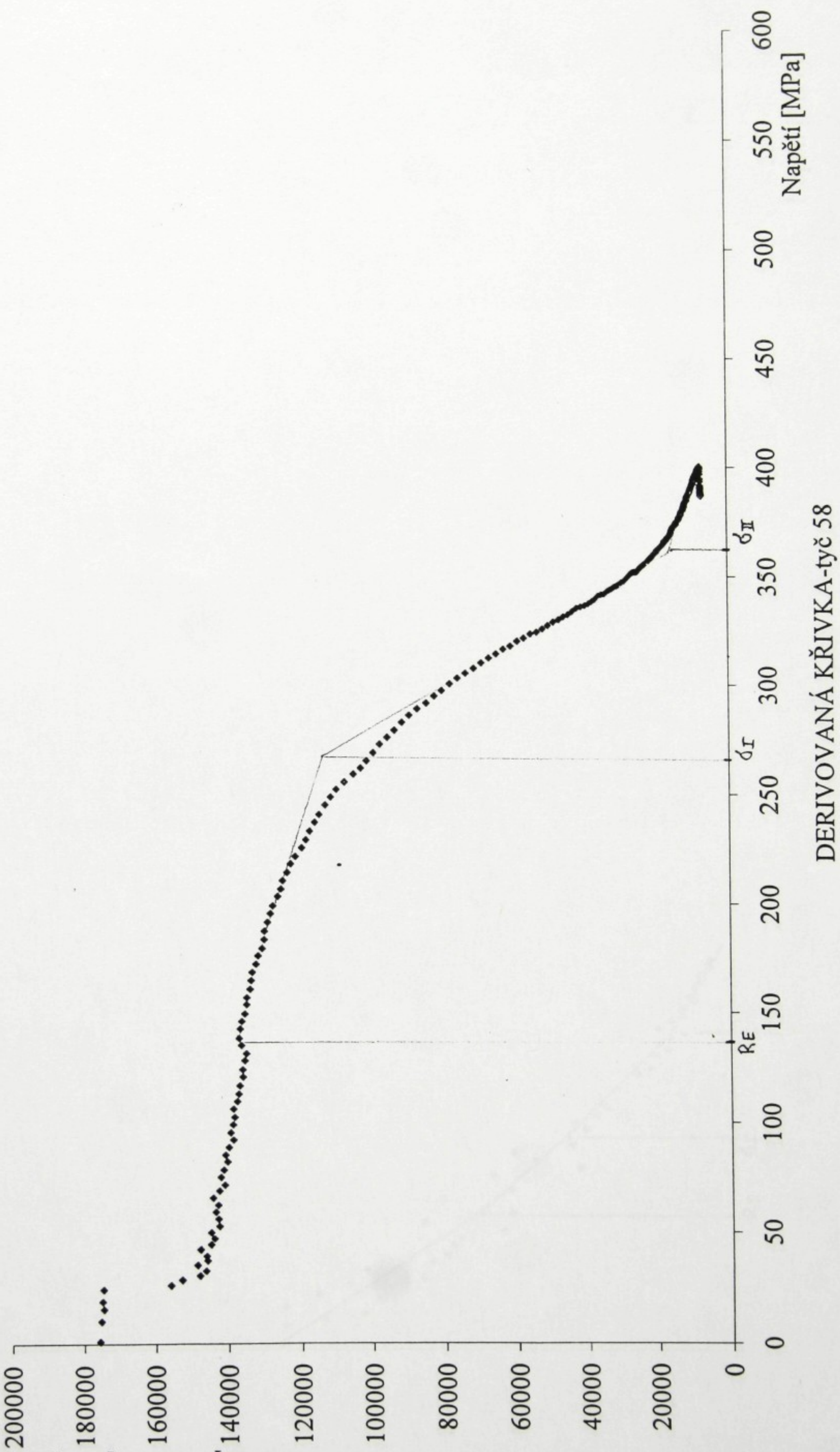

Modul pružnosti [MPa]
200000
180000
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
Napětí [MPa]
σI
σII
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 33


DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 47
Napětí [MPa]
Modul pružnosti [MPa]
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
20000
40000
60000
80000
100000
120000
140000
160000
180000
200000
R_E
σ_I
σ_{II}

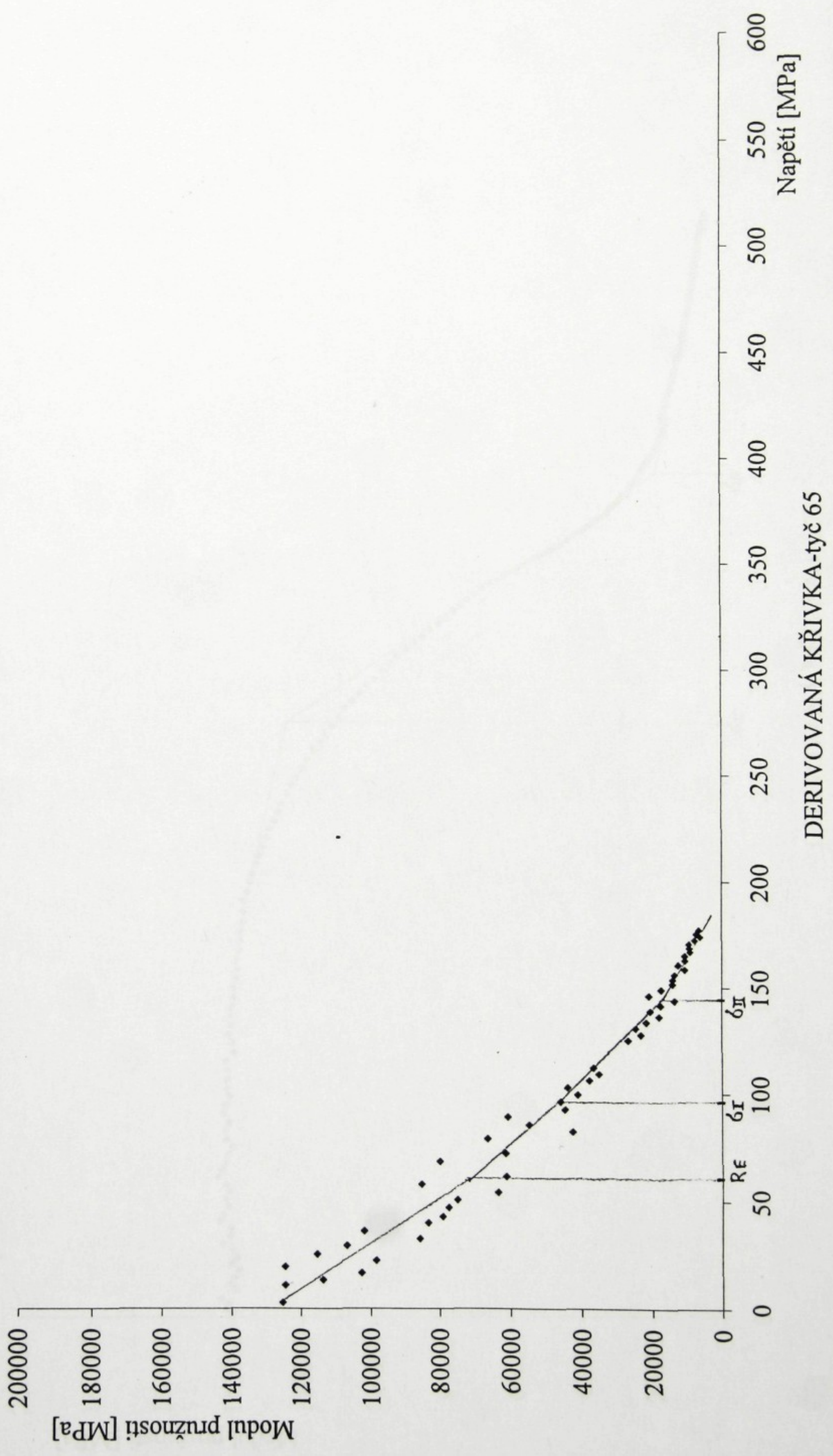
Příloha č.9.6


Modul pružnosti [MPa]
200000
180000
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
Napětí [MPa]
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
R_E
σ_I
σ_{II}
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 50

Příloha č.9.7

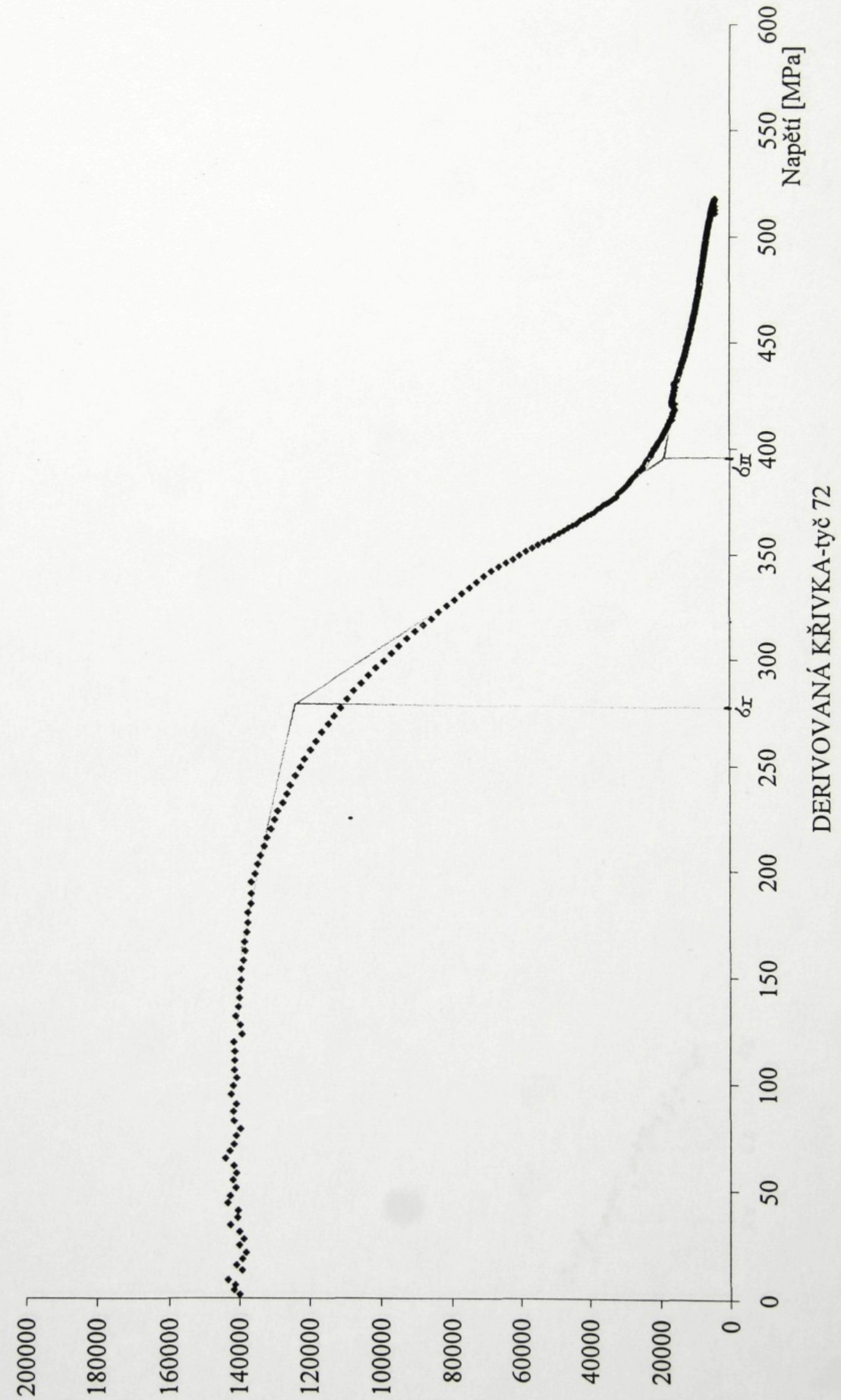

DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 58
Modul pružnosti [MPa]
Napětí [MPa]
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
140000
160000
180000
200000
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
R_E
σ_I
σ_II

Příloha č.9.8

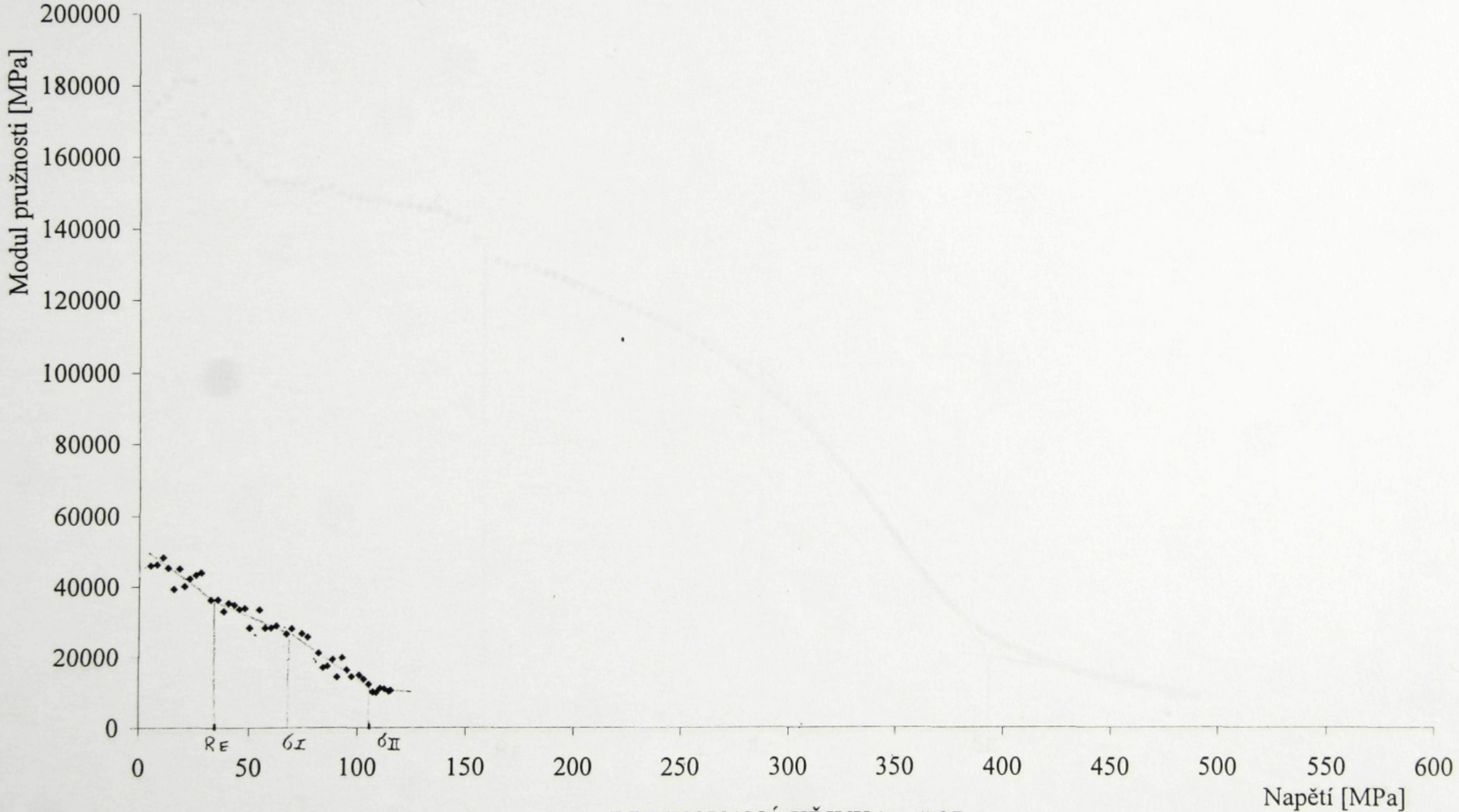


Modul pružnosti [MPa]
200000
180000
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
Napětí [MPa]
Re
σI
σII
DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 65

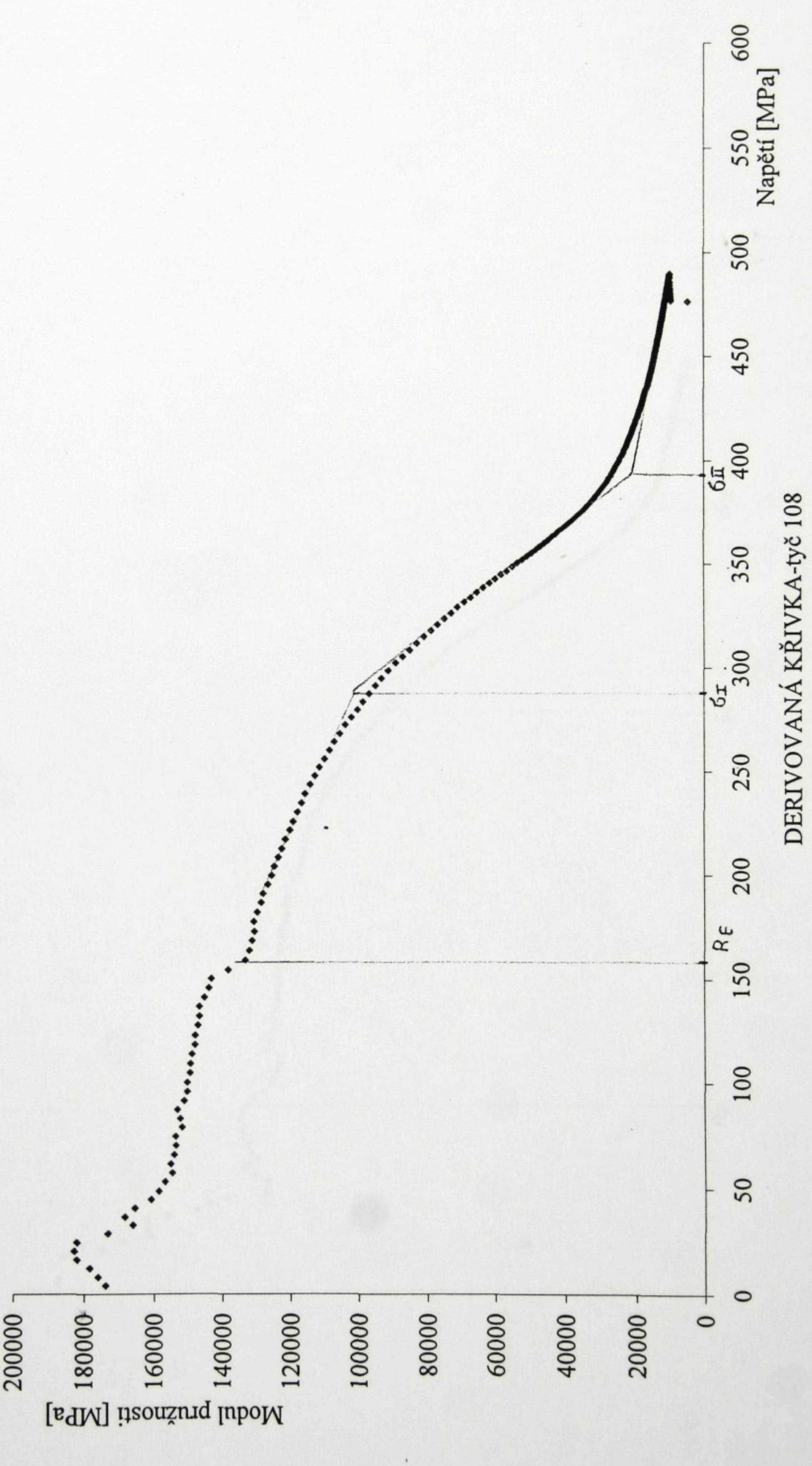
Příloha č.9.9

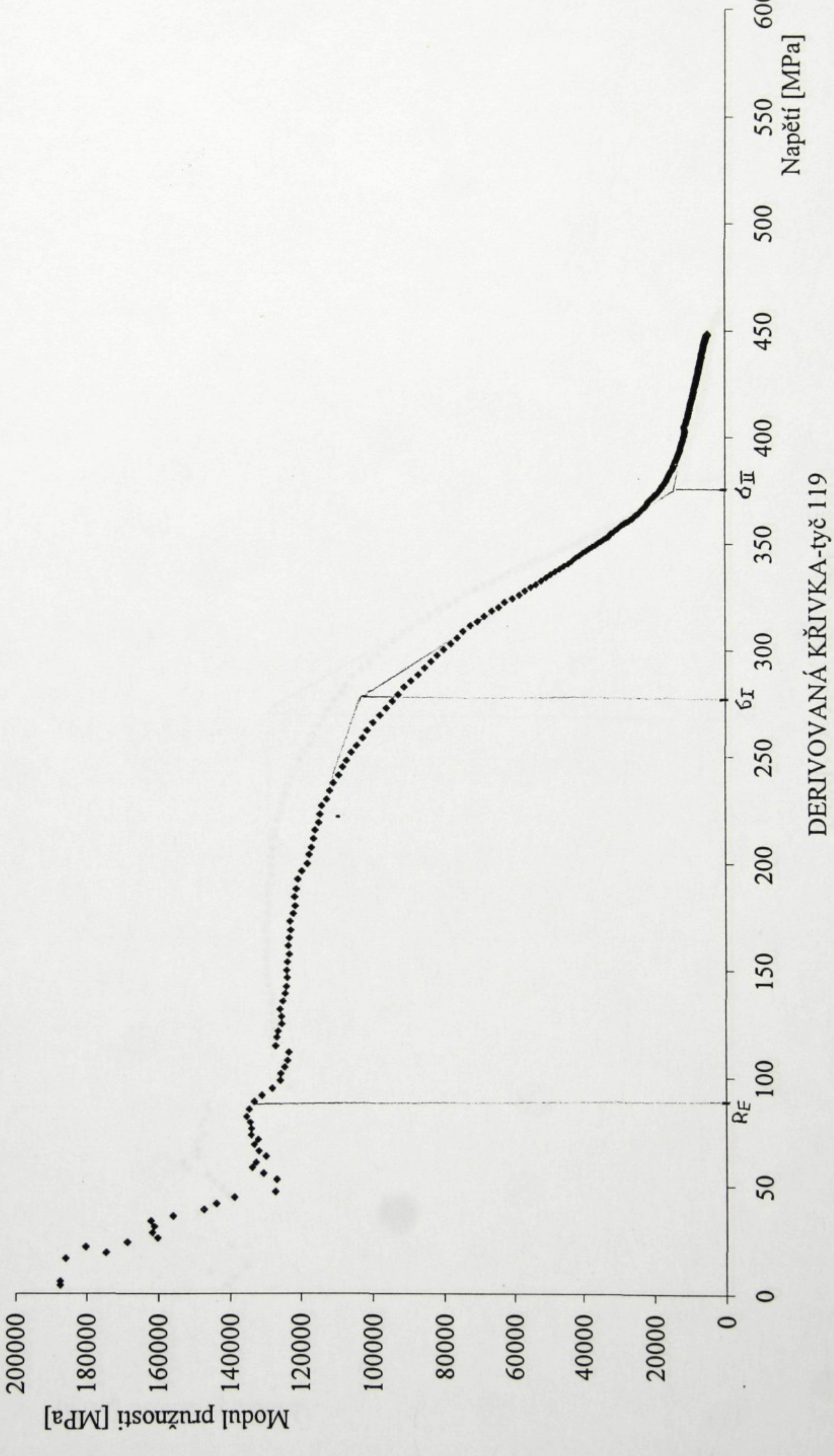


Příloha č.9.10

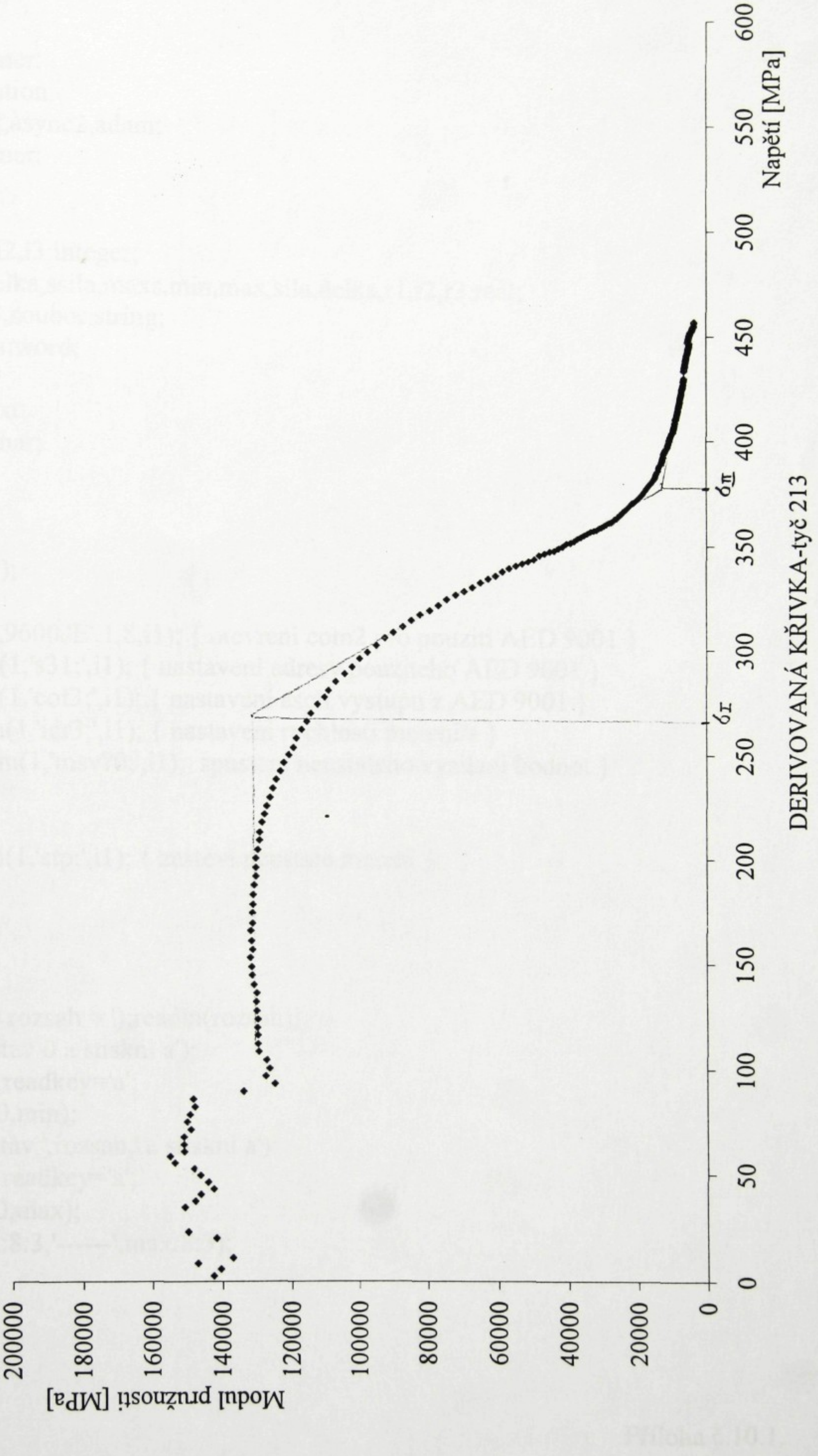


DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 87


DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 108
Modul pružnosti [MPa]
Napětí [MPa]
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
140000
160000
180000
200000
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
R_E
σ_I
σ_{II}



Příloha č.9.13


DERIVOVANÁ KŘIVKA-tyč 213
Napětí [MPa]
Modul pružnosti [MPa]
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
200000
180000
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000

```
unit mertah;
interface
procedure mer;
implementation
uses dos,crt,async2,adam;
procedure mer;
var
  f:text;
  rozsah,i1,i2,i3:integer;
  odelka,sdelka,ssila,maxs,min,max,sila,delka,r1,r2,r3:real;
  ss,s1,s2,s3,soubor:string;
  th,tm,ts,tss:word;
  cas:real;
  f1,f2,f3:text;
  a1,a2,a3:char;

begin
maxs:=0;
closecom(1);
clrscr;
opencom(1,9600,'E',1,8,i1); { otevreni com2 pro pouziti AED 9001 }
writelncom(1,'s31;',i1); { nastaveni adresy pouziteho AED 9001 }
writelncom(1,'cof3;',i1); { nastaveni ascii vystupu z AED 9001 }
 writelncom(1,'icr3;',i1); { nastaveni rychlosti mereni/s }
 {writelncom(1,'msv?0;',i1);  spusteni neustaleho vysilani hodnot }


 writelncom(1,'stp;',i1); { zastevi neustale mereni }



clrscr;
write('zadej rozsah = ');readln(rozsah);
writeln('nastav 0 a stiskni a');
repeat until readkey='a';
    kanal(1,0,min);
writeln('nastav ',rozsah,' a stiskni a');
repeat until readkey='a';
    kanal(1,0,max);
writeln(min:8:3,'------',max:8:3);

.
```

```
repeat

clrscr;
gotoxy(10,10);write('zadej nazev souboru : ');readln(soubor);
assign(f,soubor+'.dat');
rewrite(f);

ssila := -100; sdelka := -100; odelka:=-100;
i2:=1;
repeat
i2:= i2+1;
 if i2=40 then begin
          i2:=1;
          closecom(1);
          opencom(1,9600,'E',1,8,i1);
          end;

 writelncom(1,'msv?1;',i1); { vysle jednu hodnotu }
readlncom(1,s3,i1);
delete(s3,1,1);
val(s3,r1,i3);

if i3=0 then begin
          gettime(th,tm,ts,tss);
          cas:=(th*3600)+(tm*60)+ts+(tss/100);
          gotoxy(10,5);
          writeln('prodlouzeni - ',r1:10:1,' jednotek');
          gotoxy(10,7);
          writeln('prodlouzeni - ',r1*1.25/500000:10:6,' mm');
          kanal(1,0,r2);
          gotoxy(10,10);
          writeln('napeti      - ',r2:12:6);
          delka:=((r2-min)/(max-min))*rozsah;
          writeln(delka:12:6);

          sila:=((r2-min)/(max-min))*rozsah;
          delka:=r1*1.25/500000;
          if sdelka=-100 then odelka := delka-1;
          if sdelka=-100 then sdelka := delka;
          if ssila=-100 then maxs := sila;
          if ssila=-100 then ssila := sila;
          gotoxy(10,15);write('delka := ',delka:12:5);
          gotoxy(10,17);write('sila  := ',sila:12:5);
```

```
            writeln(f,delka-sdelka:12:5,sila-ssila:12:5,cas:13:5);

{             if odelka< delka then writeln(f,delka-sdelka:12:5,sila-ssila:12:5,cas:13:5);
            if delka > odelka then odelka := delka;}
            if maxs<sila then maxs:=sila;
            end;
delay(100);
until (sila*1.2)<maxs;
{{until readkey='h';}


close(f);

gotoxy(10,22);write('e=konec,a=dalsi - ');readln(ss);
until ss='e';

writelncom(1,'stp;',i1); { ukonceni mereni }
closecom(1);

end;

end.
```

Prohlášení k využívání výsledků DP:

Jsem si vědom toho, že diplomová práce je majetkem školy a že s ní nemohu sám bez svolení školy disponovat, a že diplomová práce může být zapůjčena či objednána (kopie) za účelem využití jejího obsahu.

Beru na vědomí, že po pěti letech si mohu diplomovou práci vyžádat v Univerzitní knihovně TUL v Liberci, kde je uložena.

Jméno a příjmení: VOTOČEK Jiří

Adresa: Rumburk I
Okres Děčín

Podpis: