ČESKOSLOVENSKÁ SOCIALISTICKÁ REPUBLIKA
(19)

ÚŘAD PRO VYNÁLEZY A OBJEVY

POPIS OBJEVU K DIPLOMU

37

Přihlášeno: 03 12 79 (PO 73-79)
Právo přednosti od 03 12 79

Zveřejněno: Hutnické listy č. 2/1985, str. 146-151

Uděleno: 19 03 87
Vydáno: 14 08 87

MDT 539.43

Autoři objevu: POKLUDA JAROSLAV RNDr. CSc., STANĚK PETR ing. CSc., BRNO

Název objevu: **Objev stadia prodlevy procesu cyklického creepu kovových materiálů**

Předmět objevu:

1. Jev spočívající v existenci stadia prodlevy procesu cyklického creepu kovových materiálů při zatěžování s konstantní nebo rostoucí amplitudou síly.
2. Jev uvedený v bodě 1 může nastat pouze v oblasti zátěžných parametrů σ_a a P, související s mezní křivkou vzniku cyklického creepu a mezní křivkou zániku prodlevy procesu cyklického creepu, které jsou materiálovými charakteristikami určenými závislostmi $^{mez}\varepsilon_{apd}(P)$ a $^{mez}\varepsilon_{aph}(P)$, a nemůže nastat, pokud pro ε_{ap} platí v celém průběhu zatěžování podmínky

$$\varepsilon_{ap} < {}^{mez}\varepsilon_{apd} \quad \text{nebo} \quad \varepsilon_{ap} \geqslant {}^{mez}\varepsilon_{aph} ,$$

kde σ_a je amplituda napětí,
P je parametr asymetrie cyklu,
ε_{ap} je amplituda plastické deformace,
$^{mez}\varepsilon_{apd}$ je amplituda plastické deformace příslušná mezní křivce vzniku cyklického creepu,
$^{mez}\varepsilon_{aph}$ je amplituda plastické deformace příslušná mezní křivce zániku prodlevy procesu cyklického creepu.

Objev se týká jevu spočívajícího v existenci stadia prodlevy procesu cyklického creepu kovových materiálů při zatěžování s konstantní nebo rostoucí amplitudou síly.

Při cyklickém silovém zatěžování kovových materiálů (v tzv. měkkém režimu) dochází k hromadění jednosměrné plastické deformace s počtem zátěžových cyklů. Tento jev se nazývá cyklický creep (někdy rovněž ne zcela přesně dynamické tečení) a na rozdíl od statického

creepu může být i při pokojových teplotách rozhodujícím poškozovacím procesem. V minulosti tomuto procesu nebyla věnována patřičná pozornost vzhledem k tomu, že většina prací základního výzkumu v oblasti únavy se soustředila na zatěžování s konstantní amplitudou deformace. Důvodem bylo jednak to, že amplituda plastické deformace je považována za řídící parametr únavového procesu a proces řízené deformace je geometricky stabilnějším a tím fyzikálně výhodnějším procesem, a jednak předpoklad, že reálný proces střídavé plastické deformace u vrubů odpovídá "tvrdému" zatěžování. Poněvadž se ukázalo, že tento předpoklad není zcela oprávněný a nelze obecně nalézt přesnou transformaci únavových charakteristik z tvrdého zatěžování na měkké, objevilo se v posledních letech mnohem více prací, týkajících se měkkého zatěžování a cyklického creepu.

Od prvních publikací, týkajících se experimentálních zjištění cyklického creepu (Kennedy, A.J.: Nature, 178, 1956, str. 810; Benham, P.: J. Inst. Metals, 9, 1960-61, str. 328) byla zveřejněna řada prací, která se zabývala zejména stanovením empirických relací pro rychlost cyklického creepu a srovnáním rychlosti tečení při statickém a cyklickém zatěžování (např.: Feltner, C.E.: Acta Metalurgica, 11, 1963, str. 817; Price, A.T.: J. Inst. Metals, 95, 1967, str. 87; Serensen, S.V.: Strojírenství, 17, 1967, str. 803; Strižalo, A.B.: Problemy pročnosti, 5, 1974, str. 42, Holzmann, M.: Kovové materiály, 8, 1970, str. 31; Kermes, J.--Janda, R.-Rubriciusová, E.: Strojírenství, 3, 1976, str. 153; Thielen, P.N.-Fine, M.E.-Feurnelle, R.A.: Acta Metalurgica, 24, 1967, str. 1; Serensen, S.V.-Kogajev, V.P.-Šnejderovič, R.M.: Nesuščaja sposobnosť i rozčoty detalej mašin na pročnosť, Mašinostrojenije, Moskva 1975, Bradley, W.L.-Nam, S.W.-Matlock, D.K.: Metalurg. Transactions, 3, 1976, str. 423).

V těchto pracech jsou uvedeny i některé faktory, ovlivňující rychlost cyklického creepu a stupeň rezistence materiálů vůči cyklickému creepu.

V posledních letech se objevily některé hlubší teoretické rozbory procesu cyklického creepu (např. Mura, T.-Novakowitz, A.-Meshii, M.: Mater. Sci. Engeneering, 17, 1975, str. 221; Majundar, S.-Maiya, P.S.: Proceedings of the "II. Inst. Conference on Mechanical Behaviour of Materials, 16-20. August 1976, Boston, Massachusetts - USA).

Zatímco uvedené práce se zabývaly vesměs studiem již probíhajícího cyklického creepu v nízkocyklové resp. kvazistatické oblasti, zaměřili se autoři objevu na studium podmínek vzniku cyklického creepu za pokojových teplot v závislosti na způsobu zatěžování (amplituda napětí, asymetrie cyklu) v celé oblasti Wöhlerovy křivky s důrazem na vysokocyklovou únavu, která z tohoto hlediska byla doposud velmi málo studována.

V pracech Pokluda J.-Staněk, P.: Sborník "III. národní konference o lomech", 11.-13. 5. 1976, Vrátná dolina; Pokluda, J.-Staněk, P.: Proceedings of the "Fourth Colloquium on Fatigue", 21.-23. 1977 Juna, ÚFM ČSAV Brno, ČSSR; Pokluda, J.-Staněk, P.: Kovové materiály, 5, 1978, str. 583 - jsou zveřejněny výsledky experimentálního studia podmínek vzniku cyklického creepu u několika typů konstrukčních ocelí, podán matematický modelový popis cyklického creepu a ukázány souvislosti mezních podmínek jeho vzniku s některými důležitými únavovými charakteristikami. Byla zde rovněž popsána podstata přihlašovaného objevu.

Podstatou objevu je jev, spočívající v existenci stadia prodlevy procesu cyklického creepu kovových materiálů při zatěžování s konstantní nebo rostoucí amplitudou síly. Toto stadium lze experimentálně identifikovat pouze za určitých zátěžných podmínek, které mohou být obecně specifikovány na základě tzv. mezní křivky vzniku cyklického creepu a mezní křivky zániku prodlevy procesu cyklického creepu, což jsou materiálové charakteristiky - viz bod 2 v "Předmětu objevu" (str. 10).

Při studiu podmínek vzniku cyklického creepu u nízkouhlíkové oceli v oblasti vysokocyklové únavy (počet cyklů do porušení $N_f > 10^4$ cyklů) bylo autory zjištěno, že za určitých zátěžných podmínek existuje stadium, které se jeví prodleva na křivce cyklického creepu. Jinak řečeno, cyklický creep začne v procesu cyklického změkčování probíhat až po aplikaci určitého počtu zátěžných cyklů.

Tato skutečnost byla pak dále zjištěna i na dalších typech ocelí, přičemž absolutní počet cyklů připadající na toto stadium rychle klesá s rostoucí amplitudou zátěžného napětí σ_a a rostoucí asymetrií zátěžného cyklu. Na obr. 1 a obr. 2 je uveden příklad počátečních prodlev na křivkách cyklického creepu u oceli ČSN 41 2010 pro různé asymetrie zátěžného cyklu (N/Nf je redukovaný počet cyklů). Konce prodlev, vyznačené body A, B, C odpovídají okamžikům kdy v procesu cyklického změkčování dojde k translačnímu přemístění zápisu hysterezní smyčky jako celku a ke vzniku zbytkové jednosměrné plastické deformace, tj. k cyklickému creepu (viz příklady zápisů hysterezních smyček). Přitom logaritmický creep na obr. 1 odpovídá únavovému typu porušení vzorků, třístadiový creep na obr. 2 odpovídá kvazistatickému typu porušení s vytvořením "krčku".

Dalším studiem tohoto jevu bylo zjištěno, že pro daný materiál a danou asymetrii cyklu lze stanovit mezní hodnotu amplitudy plastické deformace, která prakticky nezávisí na amplitudě aplikovaného napětí. To znamená, že konec prodlevy odpovídá okamžiku, kdy v průběhu změkčování bylo dosaženo kritické mezní hodnoty amplitudy plastické deformace. Závislost mezní hodnoty amplitudy plastické deformace na parametru asymetrie cyklu byla autory nazvána "mezní křivkou vzniku cyklického creepu". Na obr. 3 jsou uvedeny mezní křivky vzniku cyklického creepu pro oceli ČSN 41 2010 a 41 4331 pro zatěžování v tahu-tlaku. Z obr. 3 je patrno, že obě větve křivky pro daný materiál se asymptoticky blíží k určité hodnotě parametru asymetrie $P \lesssim 1$, která leží velmi blízko symetrickému silovému zatěžování (P = 1). Při této mezní hodnotě parametru asymetrie nemůže dojít k rozvoji cyklického creepu, neboť mezní hodnota amplitudy plastické deformace je zde nekonečně velká. Přesné experimentální stanovení této mezní hodnoty parametru asymetrie je velmi obtížné vzhledem k značné citlivosti cyklického creepu na parametr asymetrie v oblasti vysokých amplitud deformace.

Pokud amplituda plastické deformace nedosáhne v průběhu zatěžování kritické hodnoty, dané mezní křivkou vzniku cyklického creepu, obsáhne stadium prodlevy celou životnost a nedojde k rozvoji cyklického creepu v jeho klasické třístadiové, resp. logaritmické podobě (viz obr. 4).

V tomto případě ovšem nelze vůbec hovořit o cyklickém creepu a tedy ani o prodlevě tohoto procesu.

Pokud naopak amplituda plastické deformace ε_{ap} již v prvém cyklu přesáhne kritickou hodnotu, pak dojde k okamžitému rozvoji cyklického creepu a prodlevu rovněž nelze identifikovat - viz křivka pro P - 1,5 na obr. 2.

Označíme-li tedy kritickou (mezní) hodnotu amplitudy plastické deformace pro daný parametr P jako ${}^{mez}\varepsilon_{apd}$, pak v případě, že v celém průběhu zatěžování platí

$$\varepsilon_{ap} < {}^{mez}\varepsilon_{apd} \quad \text{resp.} \quad \varepsilon_{ap} \geqslant {}^{mez}\varepsilon_{apd} ,$$

nemůže k prodlevě procesu cyklického creepu dojít. Uvedená relace platí v tomto jednoduchém tvaru pouze pro cyklicky změkčující materiály, u nichž od počátku zatěžování dochází ve stadiu změn mechanických vlastností k postupnému růstu ε_{ap} s počtem cyklů.

Poněkud odlišné chování vykazují materiály cyklicky zpevňující, u nichž v počáteční fázi zatěžování dochází ke zužování hysterezní smyčky, tj. k poklesu ε_{ap}. I u těchto materiálů však lze za určitých podmínek identifikovat prodlevu, která může nastat po počátečním prudkém zpevnění, které je vystřídáno pozvolným změkčováním. V tomto případě je počátek prodlevy posunut v kladném směru osy N/N_f - viz obr. 5. Stejně jako u změkčujících materiálů nemůže dojít k prodlevě, pokud v celém průběhu zatěžování platí

$$\varepsilon_{ap} < {}^{mez}\varepsilon_{apd} \quad \text{resp.} \quad \varepsilon_{ap} \geqslant {}^{mez}\varepsilon_{aph}$$

s tím rozdílem, že je třeba rozlišovat dvě kritické hodnoty ${}^{mez}\varepsilon_{apd}$ a ${}^{mez}\varepsilon_{aph}$, přičemž

$^{mez}\varepsilon_{aph} > {}^{mez}\varepsilon_{apd}$. Závislost $^{mez}\varepsilon_{aph}$ vs. P nazveme mezní křivkou zániku prodlevy procesu cyklického creepu. Na obr. 6 jsou uvedeny obě mezní křivky $^{mez}\varepsilon_{apd}$ (P) a $^{mez}\varepsilon_{aph}$ (P) pro ocel ČSN 41 7247.

Obecně pro změkčující i zpevňující materiály tedy nemůže dojít k prodlevě, pokud bude v celém průběhu zatěžování platit

$$\varepsilon_{ap} < {}^{mez}\varepsilon_{apd} \qquad \text{nebo} \qquad \varepsilon_{ap} \geqslant {}^{mez}\varepsilon_{aph} ,$$

přičemž pro změkčující materiály platí $^{mez}\varepsilon_{apd} \equiv {}^{mez}\varepsilon_{aph}$, zatímco pro zpevňující $^{mez}\varepsilon_{apd} < {}^{mez}\varepsilon_{aph}$.

Blokové schéma experimentálního uspořádání při studiu cyklického creepu je uvedeno na obr. 7. Jako zatěžovacího zařízení bylo použito elektroservohydraulického zpětnovazebného pulsátoru Schenck PCQ 0012, který pracuje v systému uzavřené smyčky. Maximální zátěžná síla je 58, 9 kN (v tahu i tlaku), maximální frekvence zatěžování okolo 80 Hz, osciloskopická kontrola průběhu zátěžné síly v kompenzačním okruhu. Bylo použito standardního typu vzorku (viz obr. 8) s nasazeným tenzometrickým průtahoměrem Instron G-51-17 M s měrnou délkou 10 mm. Relativní chyba hodnoty řízené síly je menší než 1 %, citlivost průtahoměru je vyšší než 10^{-4}, s chybou v linearitě menší než 1% (údaje výrobce ověřené cejchováním).

Jako generátoru a zesilovače kmitočtu tenzometrického můstku bylo použito přístroje zn. Hottinger, typ KWS 6A-5. Přes měřicí zesilovač elektronického řízení byla snímána síla z tenzometrické siloměrné hlavy pulsátoru a vedena na jeden kanál X-Y zapisovače Hewlett-Packard 7044A/7045A. Na druhý kanál byl přiváděn signál ze zesilovacího můstku, nesoucí informaci o deformaci měrné délky vzorku. Na X-Y zapisovači pak byl v průběhu zatěžování prováděn zápis hysterezních smyček daného materiálu, přičemž se registroval posuv smyček, tj. cyklický creep, jak na zapisovači, tak na měřidle zesilovacího můstku. Cejchování systému průtahoměr-zesilovací můstek-zapisovač se provádělo pomocí mikrometrického šroubu "Instron", cejchování síly pulsátoru Schenck PCQ 0012 bylo prováděno pomocí dynamometru Q2 Hottinger.

Postup při experimentálním důkazu objevu:

1. Vyvážení elektrických obvodů pulsátoru,
2. upnutí vzorku a nastavení do nulové polohy,
3. nasazení průtahoměru na vzorek ve výchozím rozevření s měrnou délkou 10 mm,
4. vyvážení zesilovacího můstku pro výchozí rozevření průtahoměru. Značka pro tuto polohu na X-Y zapisovači,
5. rozevření průtahoměru na vzdálenost břitů větší než 10 mm. Značka na X-Y zapisovači pro tuto polohu,
6. vyvážení zesilovacího můstku pro dané rozevření průtahoměru. Kontrola na X-Y zapisovači,
7. start válce pulsátoru na nulovou hladinu zátěžné síly,
8. nastavení žádaných podmínek zatěžování; průběžný zápis hysterezního chování materiálu na X-Y zapisovači (zesílení nastaveno tak, aby hysterezní smyčky byly dostatečně velké a nedocházelo přitom ke zkreslení),
9. pravidelný zápis hysterezní smyčky po určitých počtech cyklů na X-Y zapisovači a současný zápis krajních poloh ručičky měřidla zesilovacího můstku,
10. nacházíme-li se v oblasti počáteční prodlevy na křivce cyklického creepu, dochází k rozšiřování hysterezních smyček s počtem cyklů buď na obě strany (do tahu i tlaku), přičemž střed smyček na X-Y zapisovači se pohybuje kolem konstantní polohy (viz obr. 9a - typické pro symetrický cyklus) nebo jednostranně (do tahu), přičemž smyčky se uzavírají v každém cyklu v místě odpovídajícím maximálnímu tlakovému napětí (obr. 9b - typické pro asymetrický cyklus se střední hodnotou tahovou).
11. V okamžiku dosažení konce prodlevy dojde při odpovídajícím počtu cyklů k neuzavření hysterezní smyčky a posuvu tlakové špice smyčky do tahového směru, což se projeví v trans-

lačním přemístění následujícího zápisu hysterezní smyčky jako celku - dochází k rozvoji cyklického creepu (viz obr. 9c - 40. cyklus).

Jako příklad je přiložena fotokopie původního zápisu hysterezních smyček (viz obr. 10) se zachycením okamžiku rozvoje cyklického creepu u materiálu ČSN 41 4331 (po tepelném zpracování) při symetrickém pilovém zatěžování (P = 1) o amplitudě nominálního napětí σ_a = 775 MPa a zátěžné frekvenci 1 Hz.

Dále je přiložen záznam krajních poloh ručičky měřidla na zesilovacím můstku v závislosti na počtu zátěžných cyklů (viz obr. 11). U jednotlivých hysterezních smyček je údaj odpovídajícího počtu cyklů. Malé šipky mezi jednotlivými skupinami hysterezních smyček značí umělé posunutí zápisu za účelem lepší rozlišitelnosti.

Do N = 500 cyklů probíhá cyklické změkčování materiálu, vyjádřené rozšiřováním hysterezní smyčky do tahového i tlakového směru. Od 500 do 600 cyklů se smyčka rozšiřuje v tahovém směru, přičemž se uzavírá v okamžicích maximálního tlakového napětí v jednom bodě.

Hysterezní smyčka odpovídající cyklům je zvýrazněna, neboť zde poprvé dochází k neuzavření smyčky a k translaci celé smyčky do tahového směru - vzniká cyklický creep, který se v průběhu dalších cyklů velmi rychle rozvíjí, což je dobře patrné na zápisu smyček od 800 do 1 152 cyklů, kdy nastalo kvazistatické porušení vzorku. Okamžik rozvoje cyklického creepu je dobře patrný i ze záznamu poloh ručičky měřidla - zvyšování hodnot v tlakovém maximu nastává mezi 600. a 650. cyklem. Na obr. 12 je vyznačena odpovídající křivka cyklického creepu, získaná jako závislost hodnot deformace při max. tlakovém napětí na počtu zátěžných cyklů.

Možnosti praktické aplikace objevu vyplývají z jeho vlastní vědecké hodnoty, která tkví v obecnosti vymezení podmínek vzniku a rozvoje jednoho z poškozovacích mechanismů kovových materiálů.

Ukázalo se totiž (Pokluda, J.-Staněk, P.: Kovové materiály 5, 1978, str. 583), že mezní křivka vzniku cyklického creepu u cyklicky změkčujících materiálů souvisí s tzv. hranicí citlivosti na asymetrii cyklu. Tyto křivky v diagramu σ_a - P prochází místy, kde pro danou hodnotu σ_a začíná prudký pokles únavové životnosti (tj. počtu cyklů do porušení). Hodnoty amplitudy plastické deformace na mezní křivce jsou zároveň maximálními hodnotami, po které lze ještě s úspěchem provést transformaci Wöhlerovy křivky na Manson-Coffinovu křivku pomocí cyklické křivky napětí - deformace. Tento fakt má zásadní význam při výpočtech strojních částí a konstrukcí na životnost, neboť vymezuje oblast, kde lze výpočet pro daný materiál provést na základě Wöhlerovy křivky pro symetrický cyklus podle Landgrafa, event. přesněji podle metody Smitha, Watsona a Toppera. Tím je možno vysvětlit vznik havarijních situací v některých případech extrémně namáhaných konstrukcí, strojů a energetických zařízení, pracujících v režimu silového zatěžování v oblasti časované pevnosti.

Pomocí mezní křivky vzniku cyklického creepu lze např. vysvětlit i existenci pozorované diskontinuity v oblasti přechodu nízko a vysokocyklové oblasti na Wöhlerově křivce (viz obr. 13, bod C).

Ukazuje se dále, že křivka $^{mez}\varepsilon_{aph}$ (P) cyklicky zpevňujících materiálů odpovídá tzv. hranici přechodu únavový-tvárný lom v diagramu σ_a - P. Tato křivka určuje diskontinuitu na Wöhlerově křivce při přechodu z nízkocyklové do kvazistatické oblasti (viz obr. 13, bod B), odpovídající prudkému poklesu počtu cyklů do porušení. To znamená, že poloha této křivky charakterizuje odolnost daného materiálu vůči intenzívnímu rozvoji cyklického creepu, který vede až k lomu součásti. Vymizení prodlevy procesu cyklického creepu na této křivce tedy má za následek vyčerpání jednosměrné zásoby plasticity cyklickým creepem s následným kvazistatickým lomem.

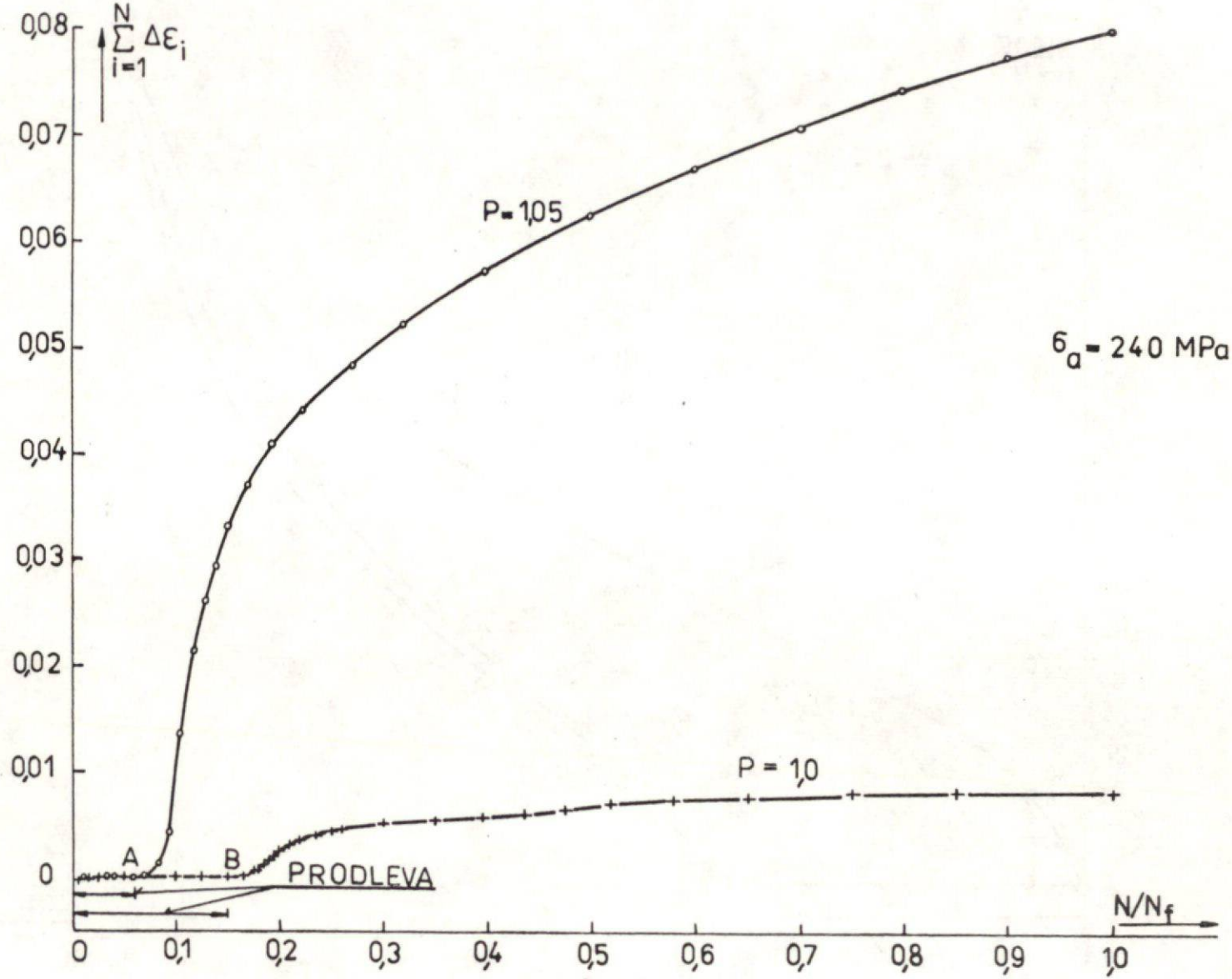
Poněvadž mezní křivky $^{mez}\varepsilon_{apd}$ (P) i $^{mez}\varepsilon_{aph}$ (P) jsou důležitými materiálovými charak-

teristikami, vyjadřujícími odolnost vůči nežádoucí kumulaci jednosměrné deformace při střídavém namáhání, lze očekávat jejich široké využití při optimalizaci výběru materiálů pro konstrukční účely. První praktická aplikace objevu byla provedena v souvislosti s optimalizací strukturně mechanických vlastností oceli 10GN2MFA pro potrubí primárního okruhu jaderných elektráren VVR 440. Ukázalo se, že zatímco mez únavy a cyklická křivka napětí-deformace se ve sledovaném pevnostním rozmezí neliší, existuje výrazný rozdíl v poloze mezní křivky vzniku cyklického creepu a tedy hranice citlivosti na asymetrii cyklu pro nižší a vyšší pevnosti oceli. Na základě tohoto zjištění, které navíc bylo v souladu s trendem posuvu tranzitní teploty, bylo možno doporučit optimální způsob tepelného zpracování oceli 10GN2MFA.

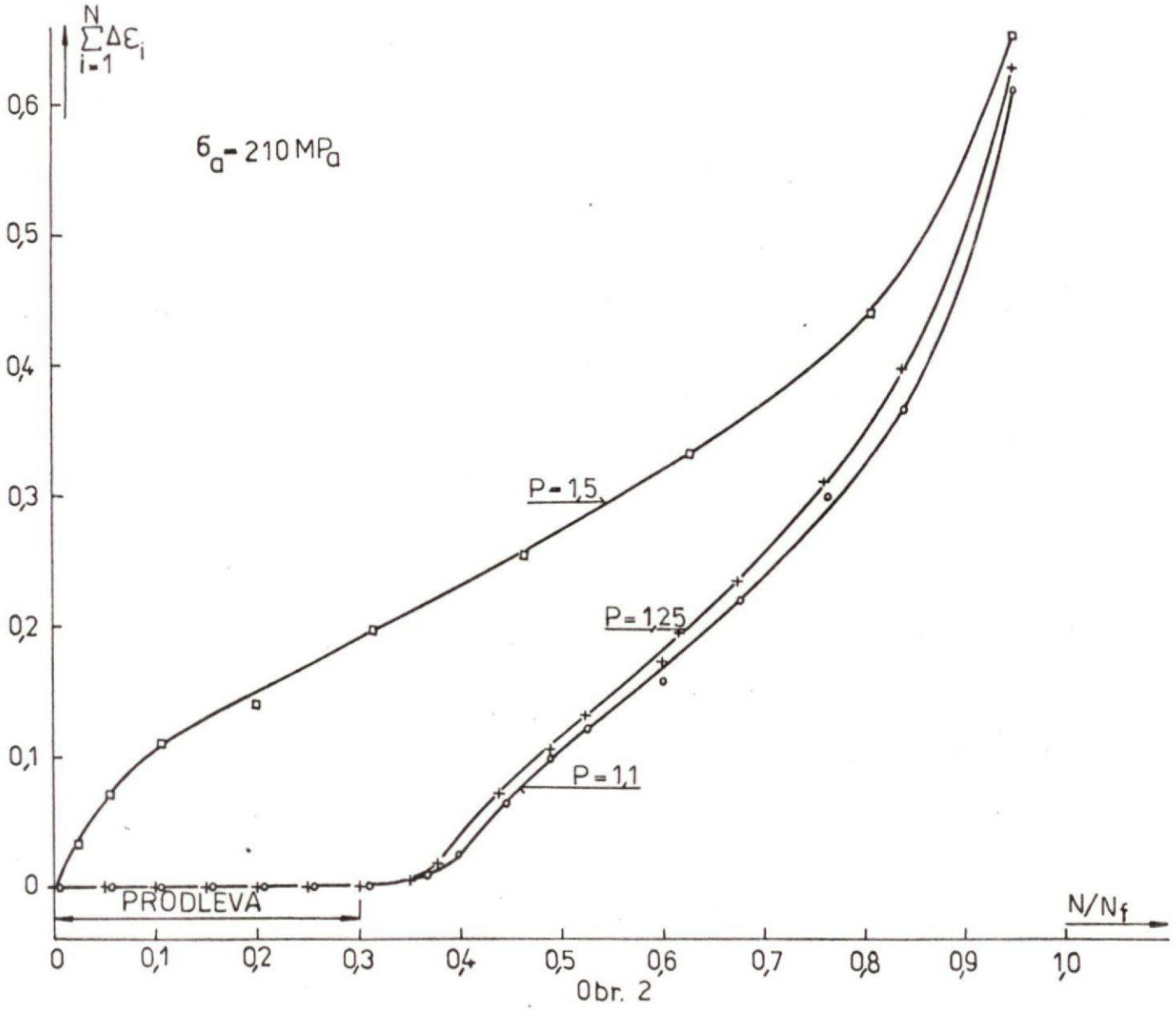
Při hodnocení mechanických vlastností oceli OCH18N12T, používané k výrobě armatur pro VVR 440 bylo zjištěno, že uvedená cyklicky zpevňující ocel má hranici přechodu únavový-tvárný lom posunutou k neobvykle vysokým hodnotám amplitudy napětí v oblasti vyšších parametrů asymetrie cyklů, charakteristických pro způsob provozního zatěžování. To ukázalo na mimořádnou odolnost této oceli vůči případným nežádoucím tvarovým změnám v důsledku cyklického creepu při exploataci.

Další bezprostřední aplikací objevu lze očekávat v modernizaci výpočetních postupů u součástí, které mohou v procesu exploatace vykazovat nežádoucí trvalé tvarové změny, tj. např. pružin, armatur atd. Stávající výpočetní postupy uvažují pouze takové materiálové parametry a únavové charakteristiky, jako jsou mez kluzu, modul pružnosti, mez pevnosti mez únavy, Smithův diagram apod., které plně nevyjadřují poškozovací mechanismy při exploataci. To se nepříznivě projevuje např. v tom, že v průběhu exploatace nastává změna rozměrů pružin - "sedání", resp. "natahování". Pružiny patří k nejrozšířenějším a nejkritičtějším součástem, které svojí funkcí zajišťují dodržování požadovaných parametrů strojů a zařízení. Např. při změnách parametrů pružin ve vstřikovači spalovacích motorů dochází k poklesu vstřikovacích tlaků, což způsobuje snížení výkonu motorů, zvýšení spotřeby paliva a zhoršení životního prostředí v důsledku zvýšení kouřivosti.

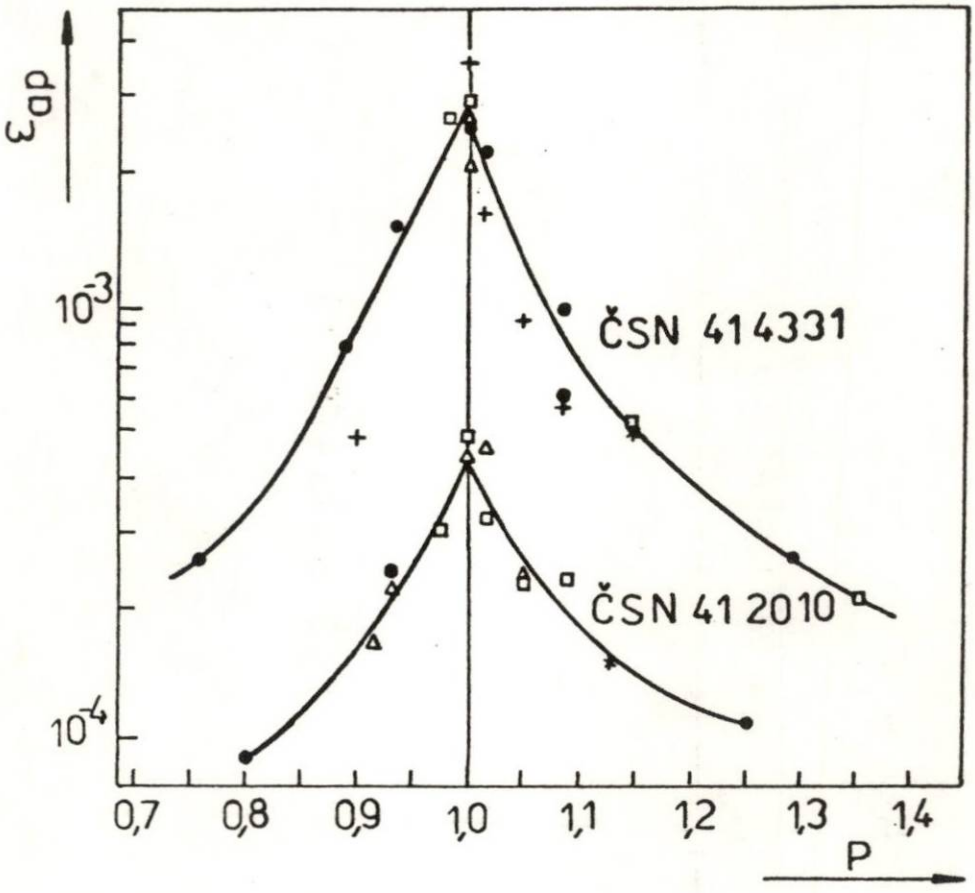
Podobné příklady je možné nalézt v oblastech železniční, automobilové a letecké dopravy, klasické energetiky, u celé řady zbraňových systémů atd. Lze předpokládat výrazné milionové úspory kovů, energie a zvýšení životnosti, spolehlivosti a schopnosti konkurence strojů a zařízení na světovém trhu po zavedení úprav výpočetních postupů, založených na objevu. To je ovšem podmíněno zjišťováním potřebných údajů o jednotlivých kovových materiálech, aby je konstruktéři mohli zahrnout do příslušných výpočetních postupů.


0,08
0,07
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
$\sum_{i=1}^{N} \Delta\varepsilon_i$
P = 1,05
σ_a = 240 MPa
P = 1,0
A
B
PRODLEVA
N/N$_f$
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0

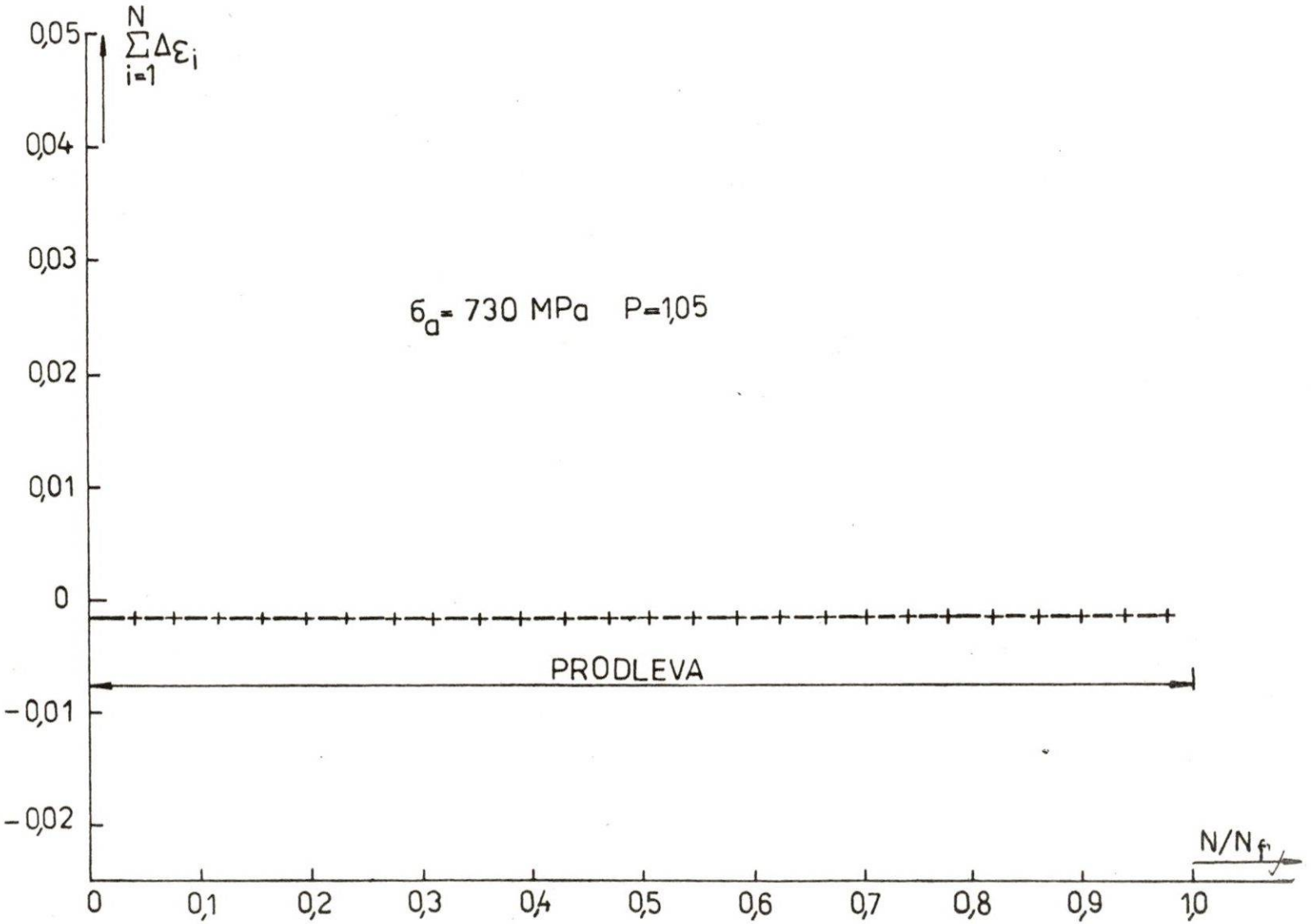
Obr. 1


$\sum_{i=1}^{N} \Delta\varepsilon_i$
σ_a = 210 MPa
P = 1,5
P = 1,25
P = 1,1
PRODLEVA
N/Nf
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0

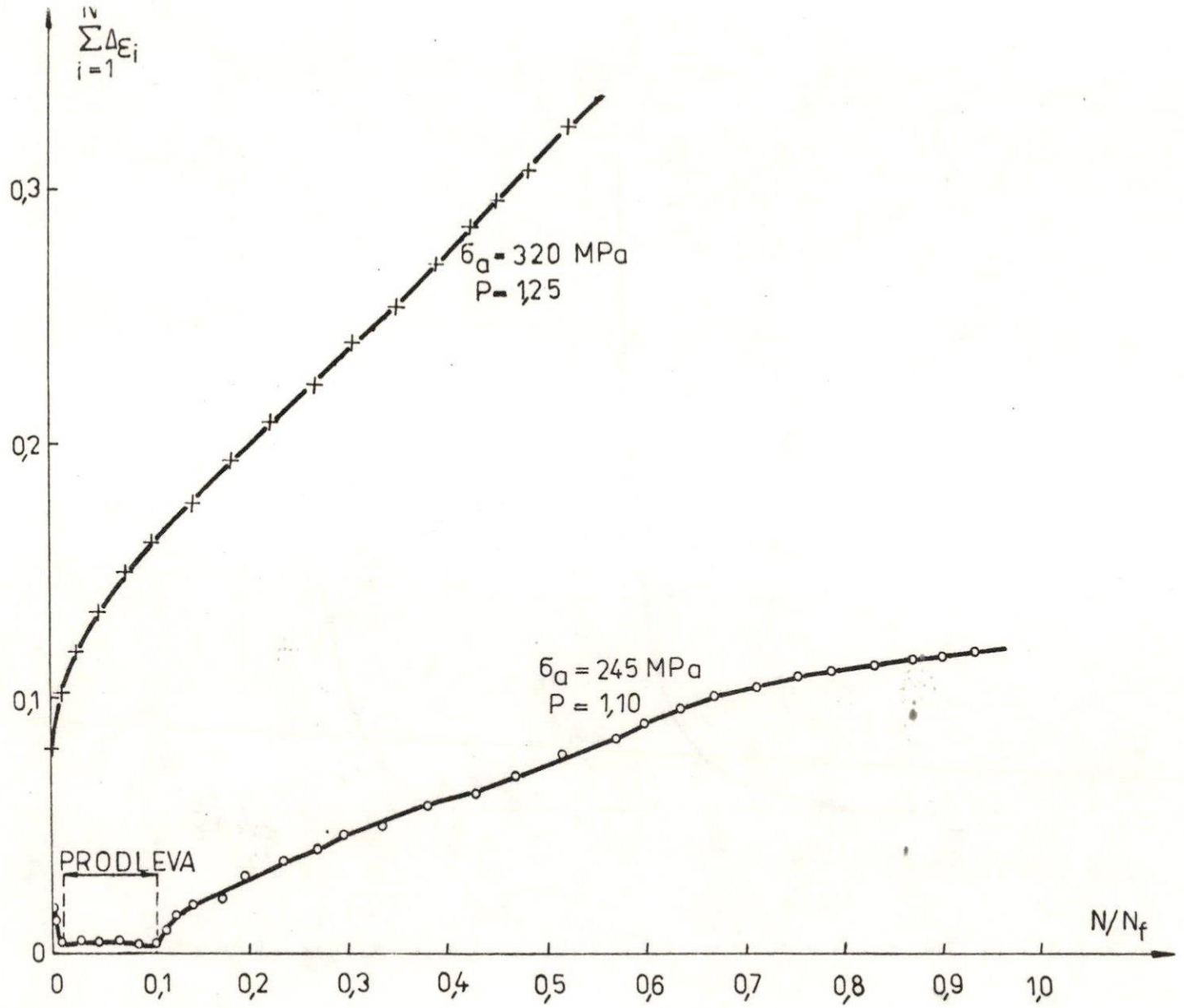
Obr. 2

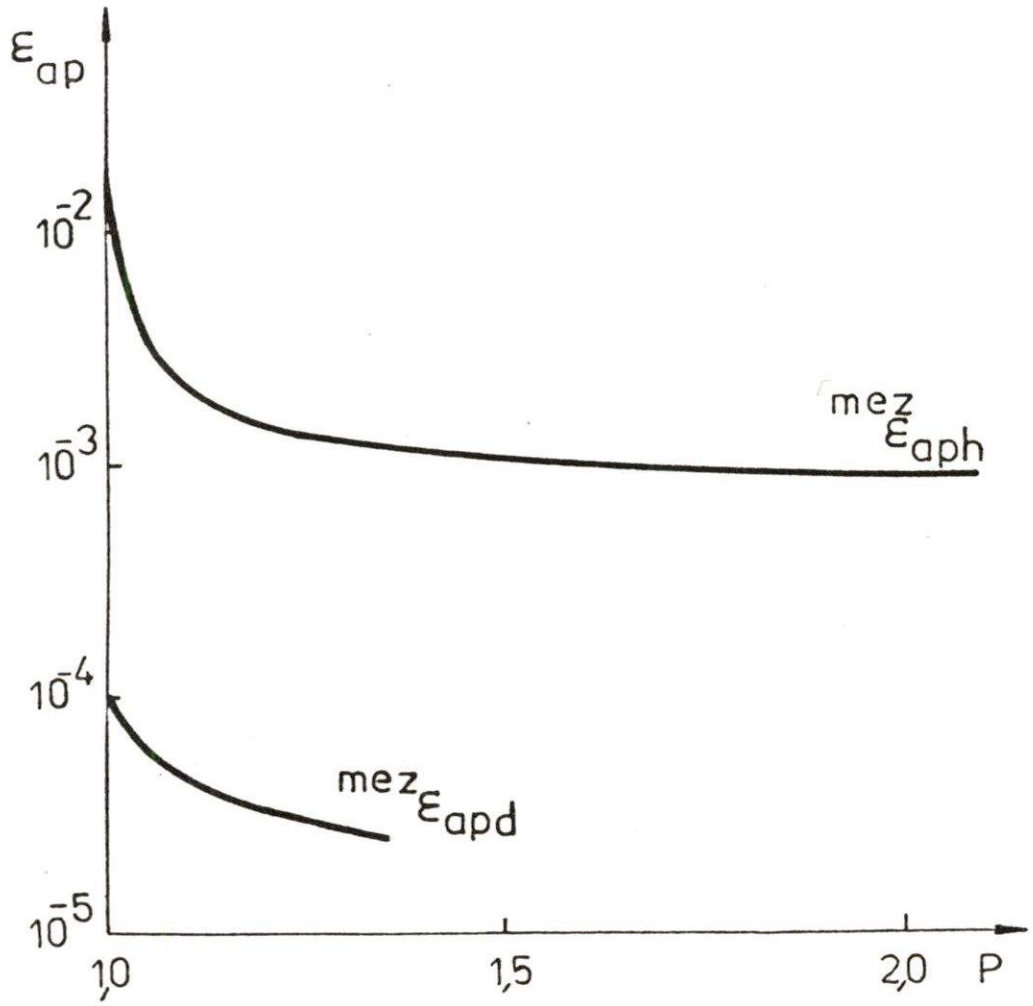


Obr. 3

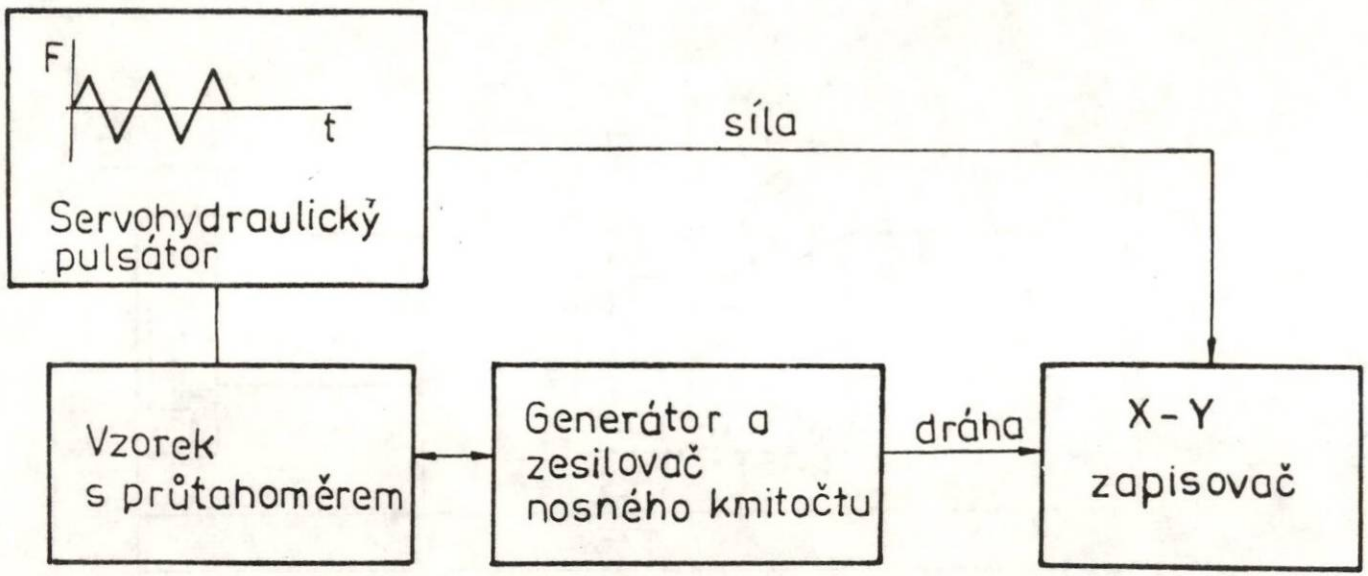

$\sum_{i=1}^{N} \Delta\varepsilon_i$
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
-0,01
-0,02
σ_a= 730 MPa P=1,05
PRODLEVA
N/N$_f$
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0

Obr 4

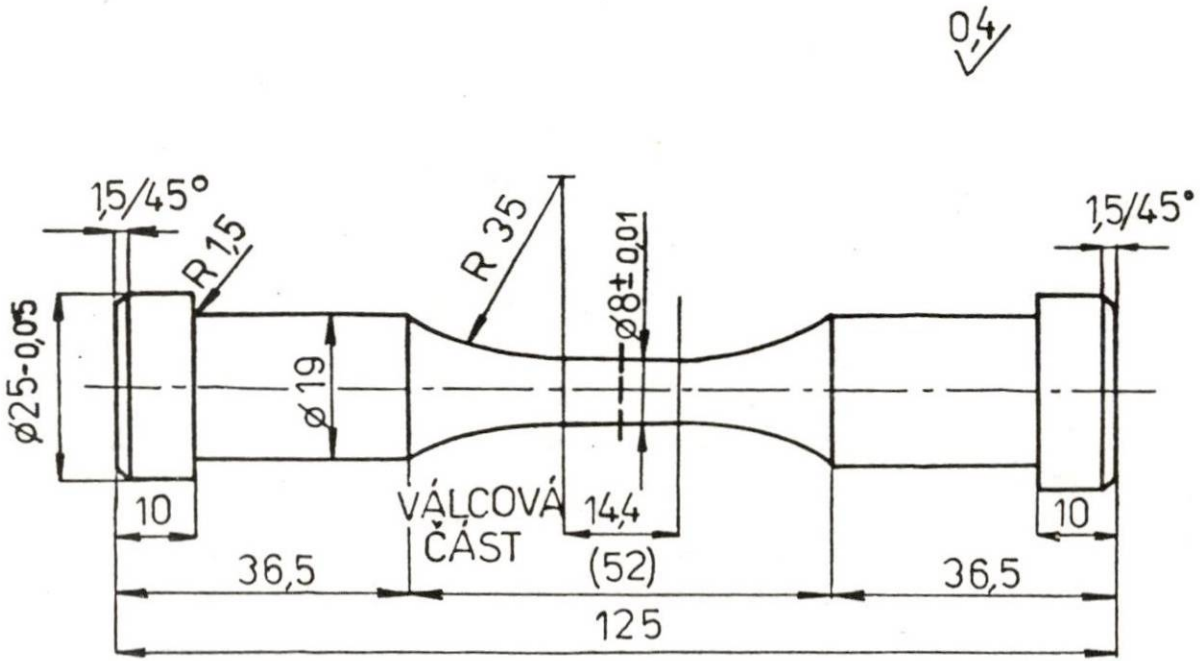

$\sum_{i=1}^{N} \Delta\varepsilon_i$
0,3
0,2
0,1
0
σ_a = 320 MPa
P = 1,25
σ_a = 245 MPa
P = 1,10
PRODLEVA
N/N$_f$
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0


ε_{ap}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
mez ε_{aph}
mez ε_{apd}
1,0
1,5
2,0
P

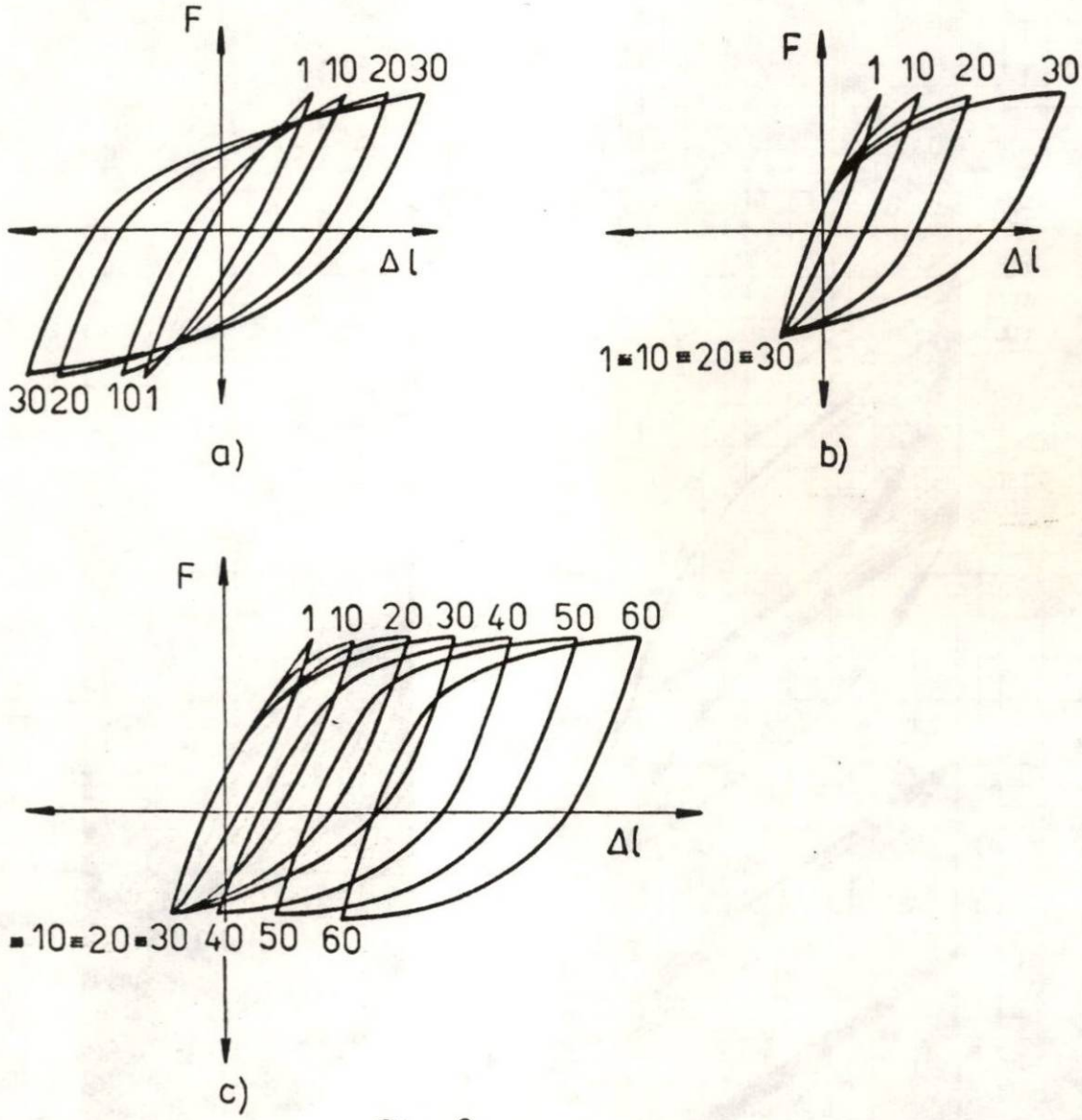
Obr. 6


F
t
Servohydraulický pulsátor
síla
Vzorek s průtahoměrem
Generátor a zesilovač nosného kmitočtu
dráha
X - Y zapisovač

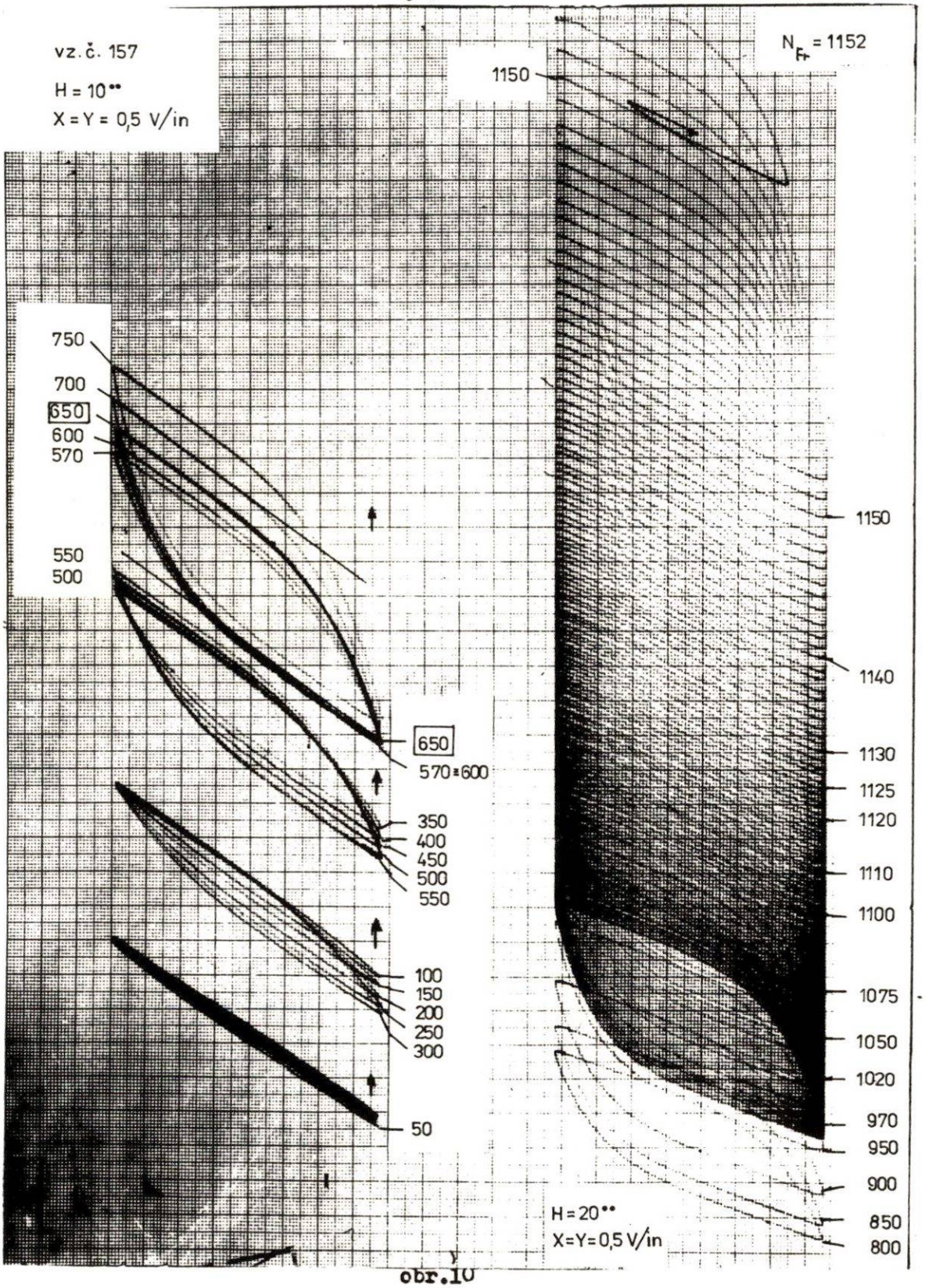
Obr. 7


0,4
1,5/45°
R 1,5
R 35
ø8± 0,01
1,5/45°
ø25-0,05
ø19
10
VÁLCOVÁ ČÁST
14,4
10
36,5
(52)
36,5
125

Obr. 8


F
1 10 20 30
Δl
30 20 10 1
a)
F
1 10 20 30
Δl
1=10=20=30
b)
F
1 10 20 30 40 50 60
Δl
1=10=20=30 40 50 60
c)

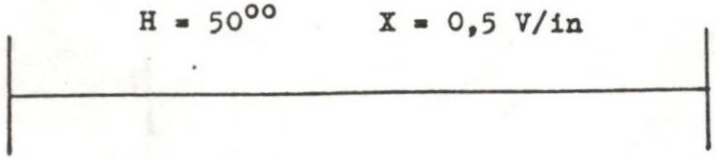
Obr. 9


vz.č. 157
H = 10°°
X = Y = 0,5 V/in
N Fr = 1152
1150
750
700
650
600
570
550
500
650
570 ≈ 600
350
400
450
500
550
100
150
200
250
300
50
1150
1140
1130
1125
1120
1110
1100
1075
1050
1020
970
950
900
850
800
H = 20°°
X=Y=0,5 V/in

obr.10

Nastavení počáteční měrné délky

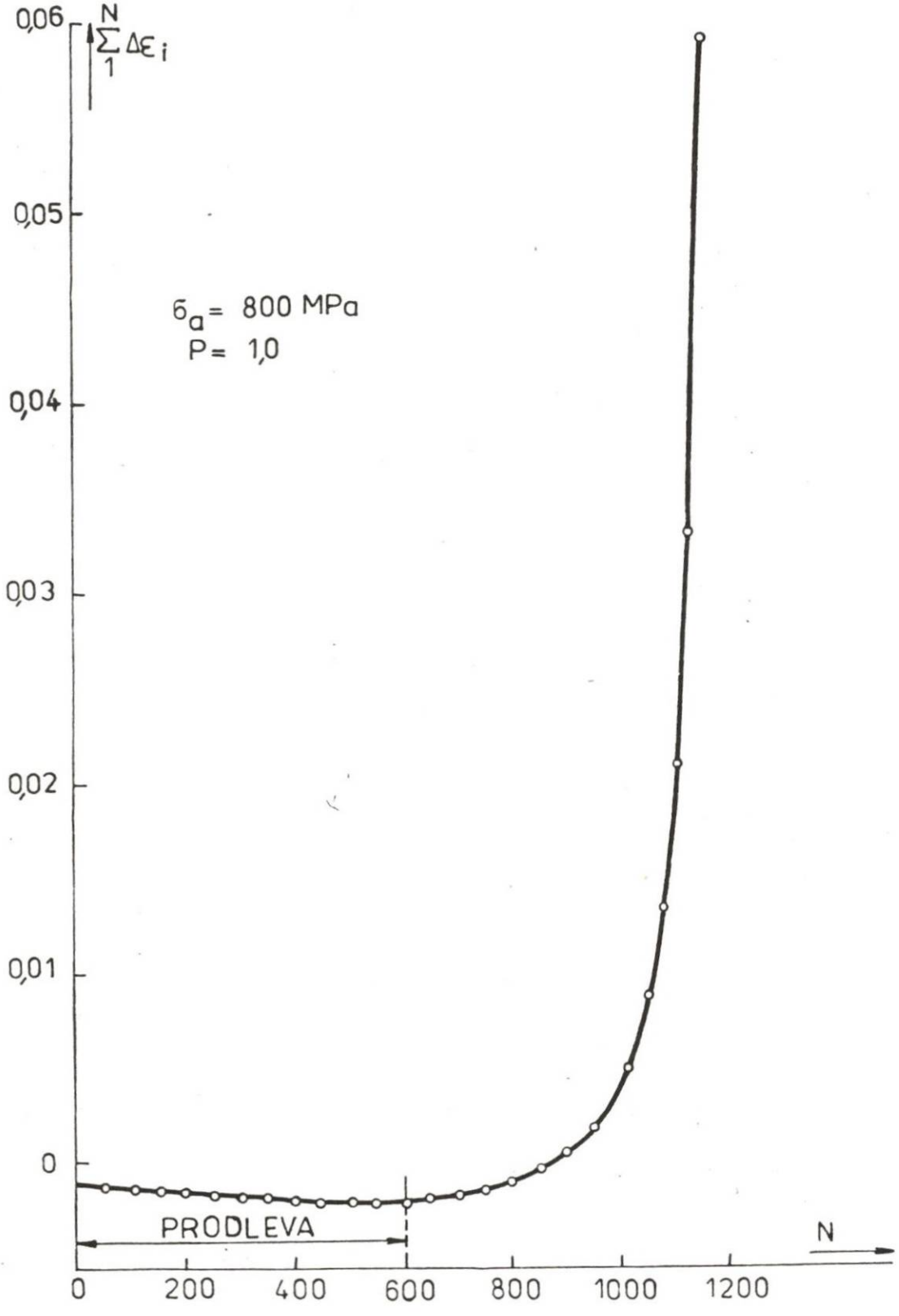
H = 50°° X = 0,5 V/in



Počet cyklů	Krajní polohy měřidla		Citlivost můstku
50	- 4,00	+ 3,00	10°°
100	- 4,50	+ 2,50	"
150	- 5,00	+ 2,25	"
200	- 5,50	+ 2,25	"
250	- 6,00	+ 2,50	"
300	- 6,25	+ 2,75	"
350	- 6,50	+ 3,00	"
400	- 7,00	+ 3,00	"
450	- 7,50	+ 3,00	"
500	- 8,00	+ 3,00	"
550	- 8,00	+ 3,50	"
600	- 8,00	+ 4,00	"
650	- 7,50	+ 4,50	"
700	- 7,00	+ 6,00	"
750	- 6,00	+ 8,00	"
800	- 2,00	+ 5,50	20°°
850	- 1,00	+ 7,00	"
900	+ 1,00	+ 9,00	"
950	+ 3,00	+12,00	"
1000	+ 9,50	+20,00	"

27. 9. 1976 vzorek č. 157

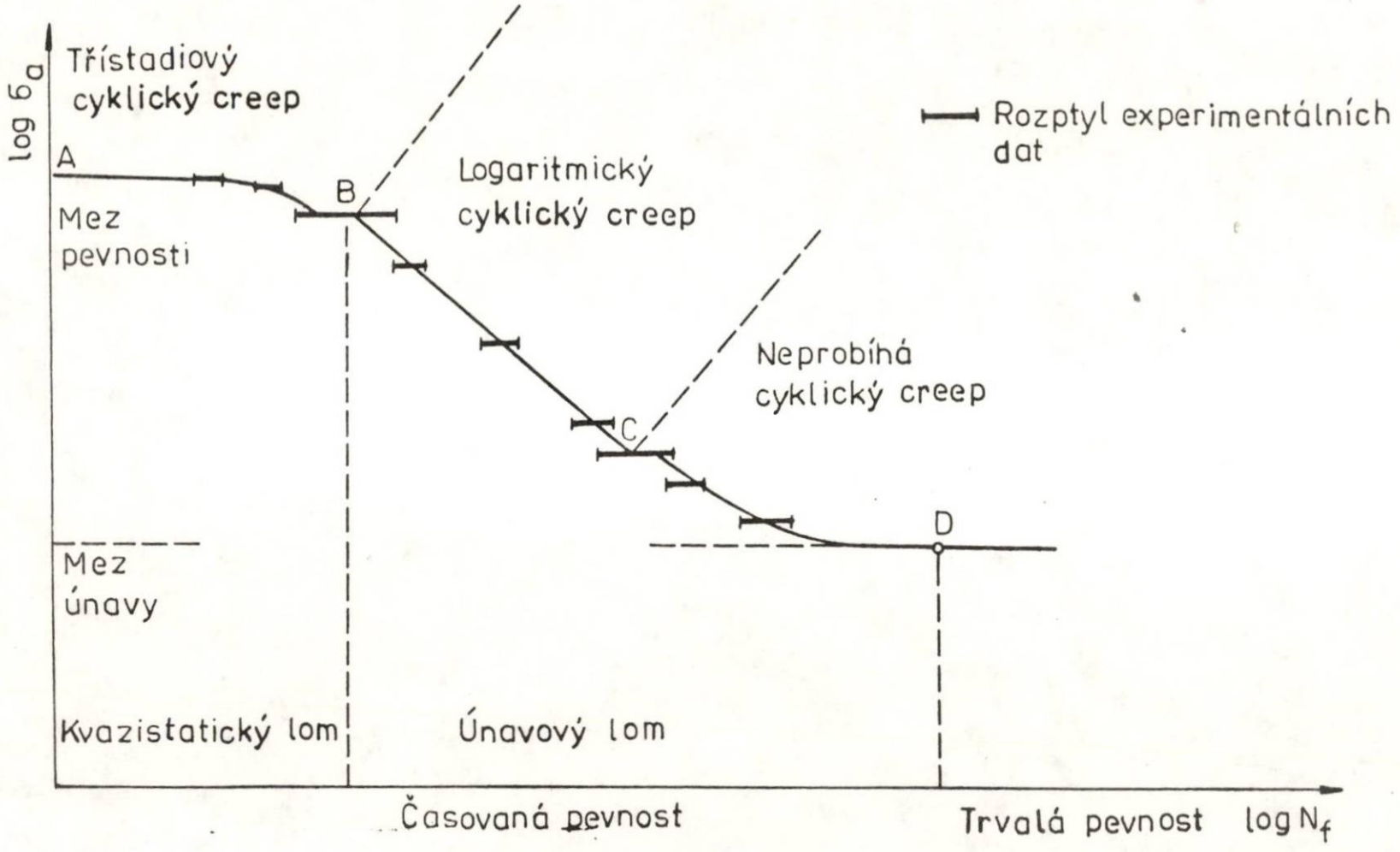
Obr. 11



Obr. 12

Severografia, n. p., MOST

Cena 2,40 Kčs


log σ_a
Třístadiový
cyklický creep
A
B
Mez
pevnosti
Logaritmický
cyklický creep
Rozptyl experimentálních
dat
Neprobíhá
cyklický creep
C
D
Mez
únavy
Kvazistatický lom
Únavový lom
Časovaná pevnost
Trvalá pevnost
log N_f

Obr. 13

Severografia, n. p., MOST

Cena 2,40 Kčs