

METODIKA MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK
O
MATERIÁLU S VELKOU PŘETVÁRNOU SCHOPNOSTÍ

J. Heřt J. Beneš V. Sloup

Ústav termomechaniky
ČSAV

Anotace

Referát se zabývá zjišťováním deformačních charakteristik materiálů při dynamickém zatěžování. Jedná se především o materiály s velkou přetvárnou schopností, jakými jsou např. pěnové plasty či kovy tvářené za tepla. Podstatná část referátu je věnována popisu experimentálního zařízení a jeho cejchování, protože do značné míry ovlivňuje zjišťované charakteristiky a určuje tedy i přesnost a omezuje platnost zjišťovaných veličin. Navrhžené experimentální zařízení je vhodné pro tlakové zkoušky vzorků zatěžovaných energiemi až 10^4 J při rychlostech až asi 100 m/s. V závěru referátu jsou uvedeny některé výsledky měření pro tuhé lehčené PVC a pro pěnový polyuretan zn. Syspur.

Význam zjišťovaných charakteristik tkví v jejich použití při návrhu rázově zatěžovaných konstrukcí a případně při návrhu speciálních technologických zařízení.

Podkladem pro rychlé tvářecí procesy i pro některé speciální konstrukční aplikace je znalost deformačních charakteristik materiálů při dynamickém zatěžování. Jde-li o materiály se značnou přetvárnou schopností, jakými jsou např. pěnové plasty či kovy tvářené za tepla, a o vysoké rychlosti zatěžování (řádově 10 až 100 m/s), je jisté, že zjištěné deformační charakteristiky nebudou závislé jen na materiálu. Charakteristiky budou vždy ovlivněny použitou experimentální metodou. Je to dáno především uplatněním dvou parametrů: rychlosti deformace a velikostí přetvoření.

Rychlost deformace je známá při začátku zatěžování, avšak v jeho průběhu se zpravidla podstatně mění. Veliká přetvoření materiálu vedou ke změnám geometrie a tím i ke změnám charakteru pole napjatosti zkušebního vzorku.

Tyto skutečnosti je třeba mít při aplikaci zjištěných charakteristik na paměti. Bude jistě nejvýhodnější, jestliže při dané konstrukční a technologické aplikaci budeme vycházet ze zkoušek, při nichž se způsob namáhání zkušebních vzorků blíží poměrům skutečným.

Zkoumání dynamických deformačních charakteristik v našem případě bylo vyvoláno potřebou získat podklady jednak pro rychlostní tváření kovů za tepla, jednak pro návrh účinně deformovatelné výplně ochranných krytů brousicích kotoučů. Námi použitá a dále popsaná metoda se proto omezuje na tlakové zkoušky vzorků při jejich zatěžování rázem, vyvolaným dopadem volně letícího razníku.

Pro tyto účely bylo zkonstruováno horizontální pneumatické dělo s příslušným měřicím systémem, které je schematicky znázorněno na obr. 1. Vlastní vzduchové dělo sestává ze zásobníku stlačeného vzduchu, řídicí ventilové komory a hlavně pro urychlení razníku. K dispozici jsou tři hlavně o průměrech $\emptyset 16$, $\emptyset 50$ a $\emptyset 104$ mm, všechny o délce asi 2,5 m (účinná délka hlavně je asi 2,2 m). Razník, který necháváme narážet do zkušebního deformačního prvku, musí být tedy vytvořen jako válcové těleso o některém z uvedených průměrů. Při zjišťování deformačních charakteristik pěnových plastů jsme užívali jednak razníků ocelových, jednak razníků vytvořených z brousicího materiálu. Ocelové razníky umožňují docílit dobře reprodukovat

telnou okrajovou podmínku pro zatěžování vzorku a vhodná úprava jejich povrchu drážkováním (obr. 8) pak dovoluje zjišťovat i časový průběh deformace. Razníky vytvořené z brusiva mají pro utěsnění a vedení v hlavní nality kroužky z umělé hmoty (epoxy 1200 anebo DURACRYL), které jen nepatrně mohou ovlivňovat jejich pevnost. Zkoušky prováděné s těmito razníky dovolují těsnější přiblížení ke skutečnosti; umožňují sledovat mechanické pohlcení drobných úlomků v pění a případně též jejich drcení o vložené inkluze ve formě ocelových tvarovaných vložek. Síla vyvolaná dopadem razníku na deformační prvek je měřena zvláštním dynamometrem - siloměrnou tyčí. Detail jejího uložení je nakreslen na obr. 2a. Tyč je uchycena v tenkých dělených objímkách a pomocí seřizovacích šroubů vycentrována do osy hlavně. Svým koncem se dotýká opěrky zapuštěné v prodlouženém rámu, který je spojen se základovým blokem. Vůči působícím silám je tento úhelníkový rám značně poddajný, a proto musíme počítat s jistým zkreslením naměřeného silového průběhu. To znamená, že po dobu asi 800 μ s není měřený puls na čele tyče ovlivňován jejím uložením; po této době se již uplatní odrazy napěťových vln a měřený puls, resp. příslušná deformační charakteristika je v tomto smyslu již v těžko určitelné míře ovlivňována měřicím zařízením.

Vzorky-deformační prvky- jsou upevňovány na aktivní (většinou rozšířený) konec tyče, jak je znázorněno v obr. 2b.

Vlastním měřicím čidlem jsou polovodičové odporové tensometry (čtyři, nalepené podélně na obvodu po 90°) umístěné ve vhodné vzdálenosti od čela tyče. Tensometry jsou napájeny konstantním proudem ze zdroje I (viz obr. 1). Příslušná změna napětí způsobená změnou odporu tensometrů je pak registrována osciloskopem (se střídavým zesilovačem) a z jeho stínítka fotografována. Tento způsob měření umožňuje relativně jednoduše docílit dostatečně vysokou horní mezní měřitelnou frekvenci.

Uvedeme nyní podrobněji postup cejchování siloměrné tyče. Tímto problémem se zabýváme detailněji proto, že navržený postup v uvedené formě anebo v příslušných modifikacích je dle našich zkušeností jediným správným postupem k použití pro cejchování dynamometrických čidel pro měření rázových procesů nebo jiných rychlých změn, kdy rychlost šíření napěťových vln

v příslušných materiálech již není možné zanedbávat. (Postup byl využit též při měření rázových sil působících na kola kolejových vozidel, pro cejchování hlav Sharpyho kladiv, pro navržení dynamometrů, na měření tlaku při výbuchu apod).

Jak jsme se již zmínili, měla měřicí tyč průměr aktivního konce (konec, na kterém jsou umístěny zkoušené vzorky) větší než byl vlastní průměr tyče. Pro potřeby měření jsme užili celkem dvou tyčí - $\emptyset 100 / \emptyset 30$ a $\emptyset 50 / \emptyset 30$. Cejchování probíhalo tak, že nejprve byl ocejchován pomocný razník $\emptyset 30$ mm, délky 1 000 mm. Schema celkového uspořádání je na obr. 3. Podstatou cejchování je využití znalosti teoretického i experimentálního řešení podélného rázu tenkých tyčí. Razník s tensometry zavěšený na paralelních závěsech vychýlíme do polohy 1 definované vzdálenosti A. Razník tím získá převýšení velikosti $H = R - \sqrt{R^2 - A^2}$. Po uvolnění se razník začne pohybovat posuvným pohybem tak, že ve své dolní poloze dosáhne rychlosti $v = \sqrt{2gH}$. Touto rychlostí naráží do tyče zavěšené opět na paralelních závěsech, která je v klidu. Za předpokladu splnění podmínek rázu tenkých tyčí vzniká v obou tyčích skokem konstantní napětí velikosti $\sigma = 1/2 \cdot E \cdot v / c_0$, kde c_0 je rychlost podélné vlny v tenké tyči. Měřením na razníku i tyči bylo ověřeno, že oba signály odpovídají velmi dobře předpokládanému teoretickému obdélníkovému průběhu. Zaoblení náběhu oproti teoreticky předpokládanému obdélníkovému pulsu je způsobeno jednak zaoblením čela razníku, jednak frekvenčním omezením snímacího zařízení. Pro cejchování však využijeme jen úroveň rovného plata, jehož výška je závislá na rychlosti v. Jako příklad je na obr. 4 znázorněn záznam signálu, změřeného na razníku při parametrech:

$$H = 17,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad v = 0,37 \text{ m/s},$$

razník i tyč - ocel 11370

hlazená $\emptyset 30$ mm,

$$c_0 = 5190 \text{ m/s}, \quad \text{podle [1]}$$

časová základna 200 μs /dílek,

vert. citlivost: 5 mV/dílek,

čtyři polovodičové tensometry délky 6 mm zapojené za sebou,

$$(R = 430 \Omega),$$

napájené ze zdroje konst. proudu $I_0 = 10 \text{ mA}$.

Výsledky z popsaného měření jsou zpracovány do cejchovního diagramu pomocného razníku, ve kterém je vynesena přímka určující vztah mezi výstupním napětím u tensometrů napájených proudem $I_0 = 10 \text{ mA}$ a odpovídajícím mechanickým napětím, resp. silou P přenášenou razníkem. Pomocná stupnice ukazuje rychlost dopadu razníku na pevnou tyč.

Takto ocejchovaný pomocný razník byl pak použit pro cejchování siloměrných tyčí s rozšířeným koncem $\varnothing 50$ a $\varnothing 100 \text{ mm}$. Ukázky záznamů s popisem příslušných veličin jsou uvedeny v obr. 5 a 6.

Dopad razníku na tyč $\varnothing 50 / \varnothing 30$,
 $H = 75 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, ($v = 1,22 \text{ m/s}$),
dolní stopa - razník,
horní stopa - dynamometr,
časová základna $100 \mu\text{s/dílek}$,
citlivost obou kanálů 20 mV/dílek .

Převýšení signálu na začátku průběhu je způsobeno zvětšením dynamické tuhosti, daným zvětšením průměru čela siloměrné tyče. Je patrné, že dynamometr toto převýšení snižuje. Rovněž snižuje strmost náběžné hrany. Jinými slovy - projevuje se zde filtrační účinek pro vyšší frekvence obsažené v pulsu.

Největší "deformace" měřeného pulsu vykazuje tyč, u které byl přechodový kus na vlastní tyč našroubován (toto - jak se ukázalo, nevýhodné uspořádání, bylo voleno z montážních důvodů). Uvedeme nyní několik záznamů, ze kterých bude možné si učinit představu o přenosových vlastnostech tohoto dynamometru.

- a) Centrický ráz ocelového razníku na ocelový dynamometr (obr. 6a)
 $\varnothing 100 / \varnothing 30$,
 $v = 1 \text{ m/s}$,
časová základna $100 \mu\text{s/dílek}$,
citlivost obou kanálů 16 mV/dílek ,
(písmenem R je označena stopa příslušející sig. z razníku,
písmenem D pak stopa odpovídající sig. z dynamometru)
- b) Ráz přes vloženou deformovatelnou tenkou destičku A 1 (obr. 6b)
 $v = 1 \text{ m/s}$,
časová základna $100 \mu\text{s/dílek}$,
citlivost obou kanálů 16 mV/dílek .

- c) Excentrický ráz bez vložené destičky, (obr. 6c)
 $e = 20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ($e = \text{excentricita}$)
 $v = 1 \text{ m/s}$,
časová základna $100 \mu\text{s/dílek}$,
citlivost obou kanálů 16 mV/dílek
- d) Excentrický ráz (obr. 6d)
 $e = 35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
 $v = 1 \text{ m/s}$,
časová základna $100 \mu\text{s/dílek}$,
citlivost obou kanálů 16 mV/dílek
- e) Ráz přes vloženou destičku z tvrdého pěnového PVC (obr. 6e)
časová základna 1 ms/dílek .

Z obr. 6a - e lze učinit tyto závěry:

Zkreslení (způsobené většími odchylkami tvaru dynamometru od tvaru tenké tyče) je větší než u dynamometru $\emptyset 50 / \emptyset 30$. Projevuje se jednak vyšším převýšením signálu z razníku na začátku průběhu, jednak podstatným zmenšením strmosti náběhu. Velikost zkreslení je tím větší, čím jsou vzniklé pulsy "tvrdší" (obsahují složky o vyšších frekvencích). Tento fakt názorně dokumentují obrázky a, b, a e. Na obr. a je případ tvrdého rázu, na druhých dvou případech pak vložením deformovatelného materiálu ráz prodlužujeme - frekvenční spektrum se posouvá k nižším frekvencím a shoda tvaru obou pulsů z razníku i dynamometru je lepší (naše praktické použití dynamometru se bude blížit případu e). Ze srovnání obrázku a, c, d si můžeme vytvořit názor na vliv excentricity. U obr. c, kde je excentricita $e = 20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, nedochází ještě k podstatnému snížení plata průběhu; ukazuje se pouze větší změna tvaru pulsu na začátku průběhu. I při větších excentricitách, které dokumentuje obr. d ($e = 35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$), je vidět, že tvarová podobnost obou pulsů zůstává zachována.

Z uvedených pozorování můžeme učinit závěr, že navržené dynamometry budou vyhovující pro požadované účely, tj. měření dynamických deformačních charakteristik tvrdých pěn a popř. pro měření charakteristik tvářitelných materiálů (ocel za tepla apod.)

Z naměřených výsledků byly vyhodnoceny pro jednotlivé siloměrné tyče cejchovní diagramy, které velmi dobře vykazovaly lineární závislost signálu na dopadové rychlosti.

Popis a cejchování zařízení pro měření rychlosti razníků

Z různých konstrukcí umožňujících zjištění rychlosti jsme zvolili zařízení s fotoelektrickými snímači. To umožní zjistit rychlost vzorku s dostatečnou přesností a při použití laserového osvětlovacího zdroje může být umístěno v takové vzdálenosti od oblasti event. tříštění vzorků, že mu nehrozí poškození či zničení. Schema zapojení je na obr. 7. Paprsek z laseru je přerušen průletem razníku délky a . Světlo z laseru je snímáno fotodiodou. Čítač je spouštěn náběžnou hranou signálu (zaclonění paprsku předním čelem razníku) a zastavován závěrnou hranou (odkrytí paprsku zadním čelem razníku). Doba průletu je nepřímo úměrná rychlosti razníku a přímo úměrná jeho délce a .

Pro zjišťování časového průběhu dráhy, který potřebujeme znát pro zjištění dynamických deformačních charakteristik, byl razník upraven drážkováním. Šířka drážky i výstupku je 2 mm. To potom modulovalo laserový paprsek dopadající do fototranzistoru, jak je znázorněno na obr. 8. Ze záznamu signálu fototranzistoru na osciloskop můžeme vyhodnotit průběh dráhy razníku. Typický záznam osciloskopu je na obr. 9 (signál z fototranzistoru je horní stopa). Z obrázku je patrný nástup signálu, průlet hladké části razníku o délce l_0 i průlet drážkování. Zařízení je třeba seřídit tak, aby tvářecí proces, který nás zajímá, se odehrával při průletu drážkování. Při nastavení rovněž odečteme počáteční podobu při dotyku razníku P_0 , tj. místo laserového paprsku v drážkování, při kterém se razník dostane do styku s tvářeným vzorkem. (Toto místo v průběhu dráhy pak koresponduje s počátkem nástupu signálu ze silového razníku, viz dolní stopu v obr. 9. Neprovádíme tudíž žádné korekce na polohu siloměrných tensometrů.) Na obr. 10 je nakreslen průběh dráhy s v oblasti drážkování odpovídající uvedenému oscilogramu. (Počáteční rychlost, tj. rychlost nárazu, ve většině případů vyhodnocujeme z doby průletu části razníku dlouhé l_0 nebo ji určujeme ze směrnice tečny k_0 křivky vynešené v obr. 10 a rychlost odrazu pak jako směrnici tečny k_1 téže křivky k_1). Z obr. je také dobře patrná počáteční poloha razníku P_0 , ve které začal razník působit na tvářený materiál.

Jak jsme se již zmínili v úvodu, popsané zařízení slouží ke zjišťování dynamických deformačních charakteristik materiálů. Uvedeme nyní ukázkou jednoho vyšetřovaného případu. Bylo třeba stanovit charakteristiky materiálu, které by se využívaly na výrobu deformačních elementů schopných zachytit velkou energii. Jde o elementy tlumící náraz dopravních vozidel anebo zachycující dopadající úlomky nástrojů^s velkou kinetickou energií (broušící kotouče, vysokootáčkové frézy).

Po provedeném studiu se ukázalo, že vhodným materiálem pro tyto účely jsou tuhé lehčené plasty, jako je např. lehčené PVC, lehčené polyuretany či některé strukturní pěny. Tyto všechny materiály vykazují při statickém zatěžování velkou oblast plastických deformací $\epsilon \approx 0,5$ až $0,8$ při prakticky konstantní síle. Charakteristika těchto materiálů je velmi výhodná s ohledem na namáhání konstrukce, kterou tyto deformovatelné elementy brání.

Zkoušky tuhého lehčeného PVC (TL PVC)

Provedli jsme proměření dynamických charakteristik TL PVC pro různé energie zatěžovacího razníku a srovnali je s výsledky statických zkoušek. Zkoušeny byly válcové vzorky z materiálů o hustotě $\rho = 170 \text{ kg/m}^3$. Vyhodnocené charakteristiky čtyř měření jsou zakresleny v obr. 11. Jednotlivé charakteristiky odpovídají různým energiím dopadu tvářecího razníku, která se měnila změnou jeho rychlosti.

Můžeme říci, že dynamická mez kluzu je prakticky nezávislá na zatěžovací rychlosti, alespoň v měřeném rozsahu rychlostí dopadu $v = 20$ až 25 m/s . To tedy znamená, že můžeme tyto materiály zkoušet tak, že je zatížíme větší energií než odpovídá využití vodorovného platu v deformačním diagramu a příslušnou energii odpovídající tomuto platu vyhodnotíme buď z deformačního diagramu, ze závislosti energie na deformační dráze anebo závislosti energie (přesněji měrné energetické pohltivosti \bar{U}) na napětí. Závislost měrné pohltivosti \bar{U} na napětí je na obr. 12 vynesena pro 3 druhy TL PVC o různých hustotách ρ .

Na obr. 13 je vynesena závislost zkušebním vzorkem pohlcené energie \bar{U} na stlačení vzorku. Průběhy jsou vyhodnoceny z

dynamických charakteristik znázorněných na obr. 11.

Všimněme si ještě srovnání statické a dynamické deformační charakteristiky, které je provedeno na obr. 14. Dynamická charakteristika zjištěná při dopadové rychlosti razníku $v = 25$ m/s je křivka d z obr. 11. Z obr. 14 je patrné, že dynamická mez kluzu je podstatně zvýšena. Statická hodnota je asi 2,3 MPa, dynamická pak asi 3,8 MPa. Srovnáme-li však mezní energetickou pohltivost, tj. energii, kterou může pěna pojmout při dynamickém zatížení do okamžiku progresivního narůstání napětí (v našem případě tato hodnota napětí činí asi 5 MPa) s energetickou pohltivostí při statickém zatěžování (odpovídající témuž napětí), ukáže se, že obě mají zhruba stejnou hodnotu. Liší se však maximálně dosažená deformace. Při statické deformaci hodnotě $\sigma = 5$ MPa odpovídá stlačení ϵ asi 0,72, při dynamické pak hodnota $\epsilon \approx 0,55$.

Závěrem kapitoly lze shrnout, že zkoušky pěnového PVC potvrdily, že při dynamickém zatěžování dochází ke zvýšení meze kluzu (resp. úrovně tvárnosti při konstantním napětí) téměř o 50 %. Ve zkoumaném rozsahu zatěžovacích rychlostí, tj. 20 - 25 m/s a zatěžovací energii 0,5-1 kJ je zjištěná dynamická mez kluzu a zatěžovací větev deformační křivky prakticky stejná. Jak ukazují měření, dochází k pohlcení energie prakticky nevratně. Více než 90 až 95 % energie zatěžovacího razníku je pohlceno plastickými deformacemi zatěžovaného vzorku (alespoň v krátké době po proběhnutí procesu). Tyto vlastnosti předurčují zkoušený materiál k využití pro utlumení velkých rázů. Hlavní skupinu těchto materiálů, vhodných k pohlcení velké energie, tvoří lehčené polyuretany, popř. integrálního charakteru. Kromě potřebných mechanických vlastností, které se dají jednoduchými změnami technologických podmínek měnit v širokém rozmezí, vykazují tyto materiály řadu předností z hlediska výrobního i z hlediska použití. Jde především o možnost výroby odléváním a u hmot integrálního typu o kvalitní homogenní povrch výrobku i jeho sendvičový charakter. Pro informaci uvedeme některé zjištěné vlastnosti pro vzorky tuhého integrálního lehčeného polyuretanu SYSpur 4502. V obr. 15 jsou uvedeny hodnoty statických a dynamických mezí kluzu v závislosti na hustotě materiálu. V obr. 16 pak průběhy dynamických deformačních

charakteristik pro vzorky různých hustot. Nepravidelné oscilace, které jsou na průbězích patrné, jsou způsobeny vlivem odrazů v měřicím zařízení. Tento vliv je tím větší, čím větší je hustota vzorků a tím i vyšší hodnoty mechanických konstant. Tak v obr. 16d pro vzorky s $\rho = 472 \text{ kg/m}^3$ je již vliv odrazů na měřicí tyči velmi patrný a dobře stanovitelná je především mez kluzu daného materiálu, která se nachází v té oblasti deformační charakteristiky, kdy se ještě neprojeví vlivy konečné délky dynamometrické tyče a jejího uložení.

Závěrem můžeme konstatovat, že vyvinuté zkušební zařízení i experimentální metodika se osvědčily při zjišťování dynamických charakteristik konstrukčních materiálů s velkou přetvárnou schopností. Získali jsme výsledky, které umožnily m.j. účinnou aplikaci pěnových plastů v ochranných krytech u rychloběžných brousicích kotoučů. Tuhých pěnových plastů zde bylo využito k vyložení pláště ochranného krytu, které slouží k pohlcení značné energie náhle uvolněné při event. roztržení kotouče. Zde popisovaná metodika je i s podrobnými výsledky detailně popsána v práci [2], kde je též navržen postup při jejich uvedené konkrétní aplikaci.

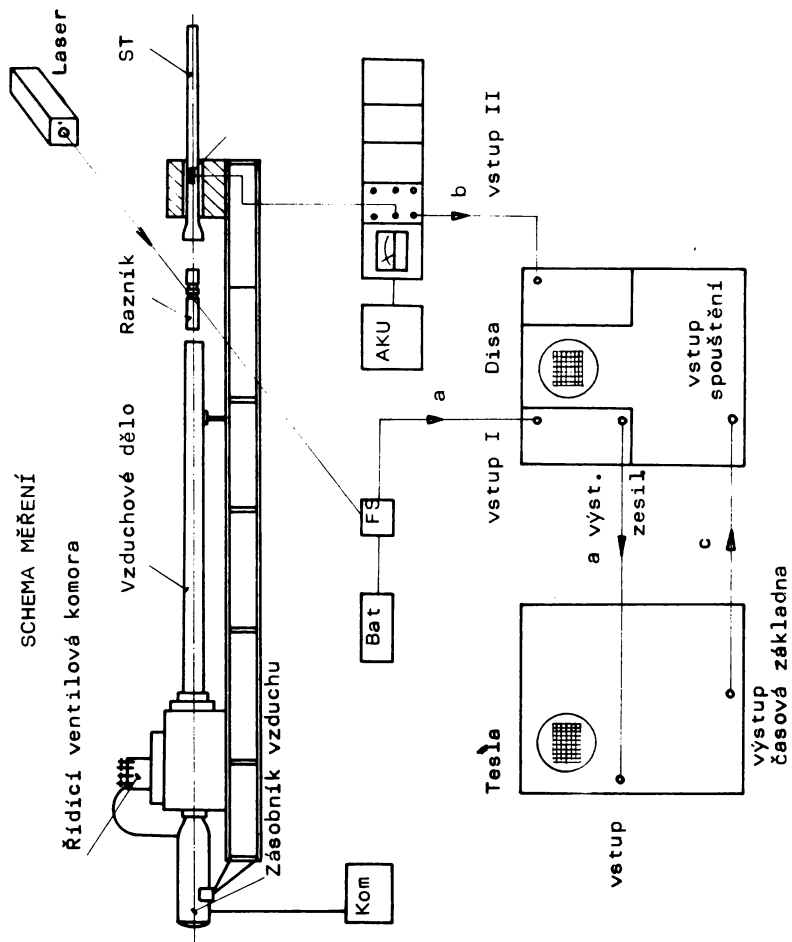
Použitá literatura

- 1 Kolsky, H.: Stress Waves in Solids, Oxford 1953
- 2 Beneš, J.; Heřt, J.; Sloup, V.; Šebková, H.; Veselý, E.:
Dynamické charakteristiky pěnových plastů a jejich praktická aplikace u ochranných krytů brousicích kotoučů.
Zpráva ÚT ČSAV č. Z 526/76.

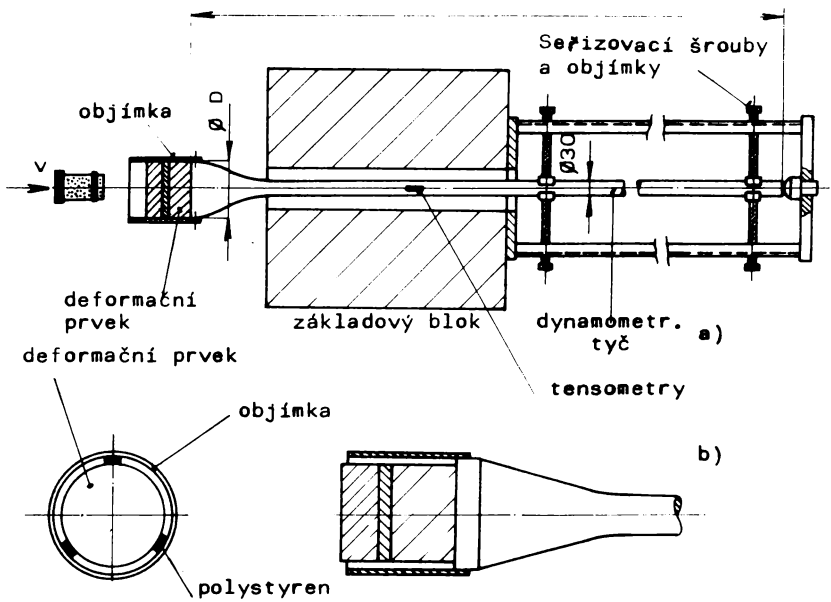
Seznam vyobrazení

- Obr. 1 Celkové schéma experimentálního zařízení
- Obr. 2 Detailní uložení dynamometrické tyče se zkoušeným vzorkem
- Obr. 3 Schematické znázornění cejchování dynamometrů
- Obr. 4 Příklad oscilografického záznamu osového napětí v razníku při jeho cejchování
- Obr. 5 Srovnání signálů (osového napětí) z razníku a z dynamometrické tyče $\varnothing 50 / \varnothing 30$
- Obr. 6 Srovnání signálů z razníku a z dynamometrické tyče $\varnothing 100 / \varnothing 30$ při různých podmínkách rázu
- Obr. 7 Schema měření (konstantní) rychlosti razníku
- Obr. 8 Schema měření časového průběhu dráhy razníku
- Obr. 9 Záznam časového průběhu dráhy razníku
- Obr. 10 Průběh síly vyhodnocený z osciloskopického signálu
- Obr. 11 Dynamické deformační charakteristiky tuhého lehčeného PVC měřené při různých zatěžovacích rychlostech
- Obr. 12 Závislost měrné energetické pohltivosti $\bar{\epsilon}$ na napětí
- Obr. 13 Závislost pohlcené energie zkušebních vzorků na jejich stlačení pro různé zatěžovací rychlosti
- Obr. 14 Srovnání statické a dynamické deformační charakteristiky
- Obr. 15 Závislost statické a dynamické meze kluzu lehčeného polyuretanu "Syspur" na jeho hustotě
- Obr. 16 Dynamické deformační charakteristiky vzorků Syspur o různých hustotách

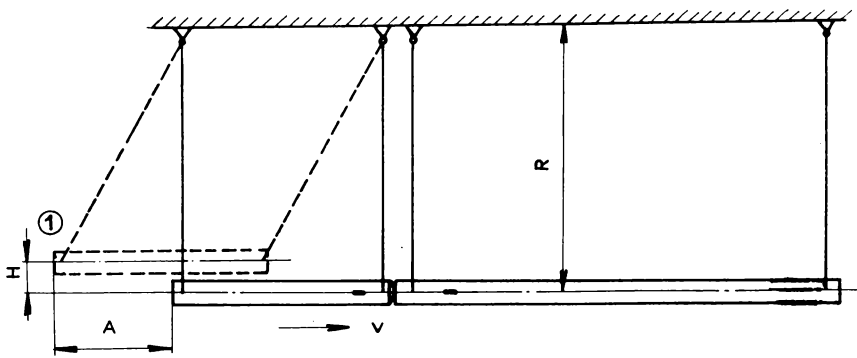
SCHEMA MĚŘENÍ



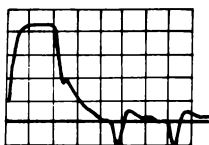
Obr. 1



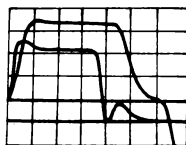
Obr. 2



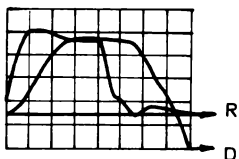
Obr. 3



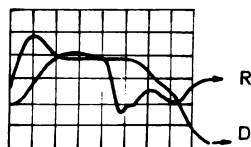
Obr. 4



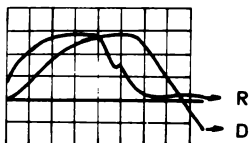
Obr. 5



Obr. 6a



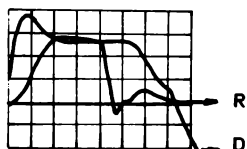
Obr. 6d



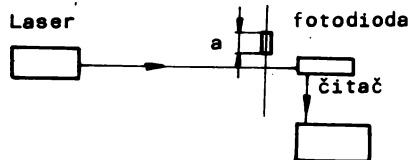
Obr. 6b



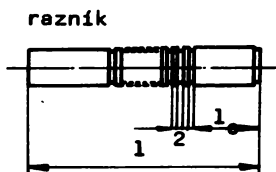
Obr. 6e



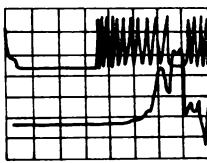
Obr. 6c



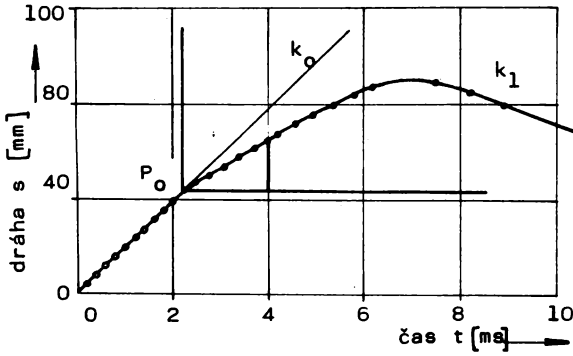
Obr. 7



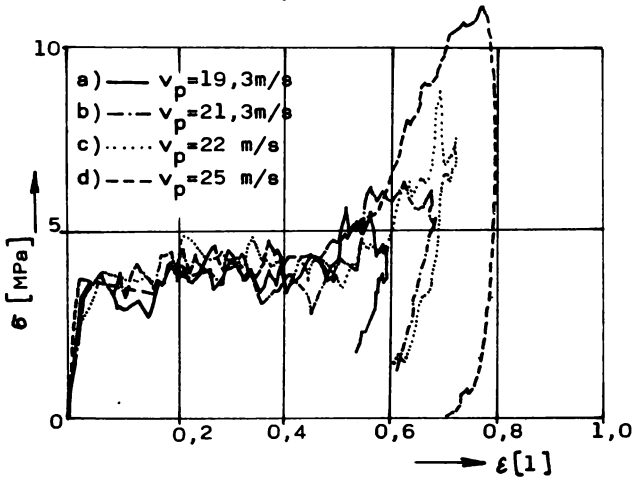
Obr. 8



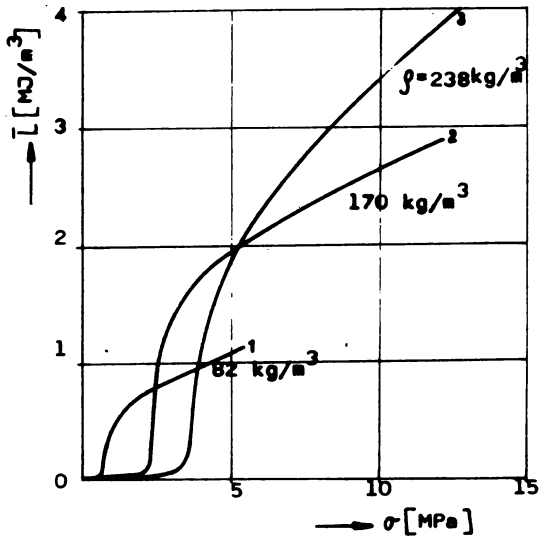
Obr. 9



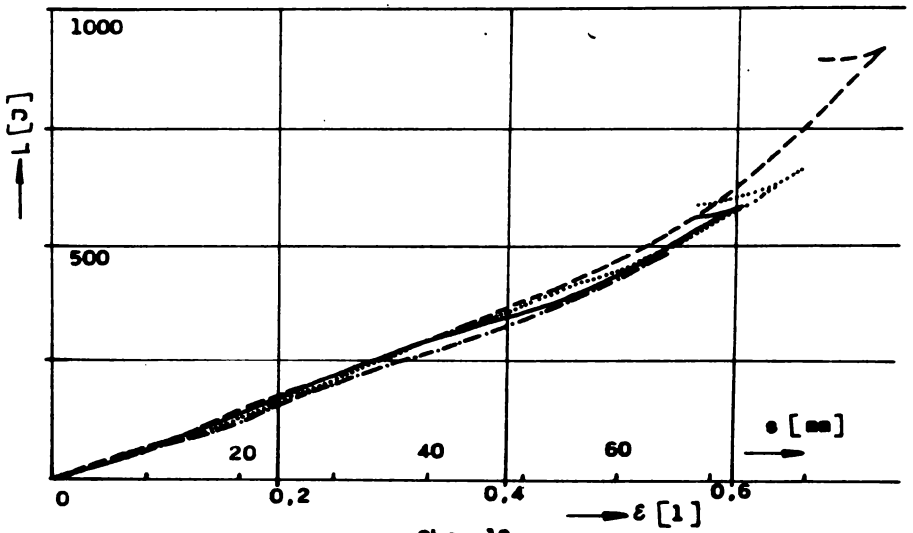
Obr. 10



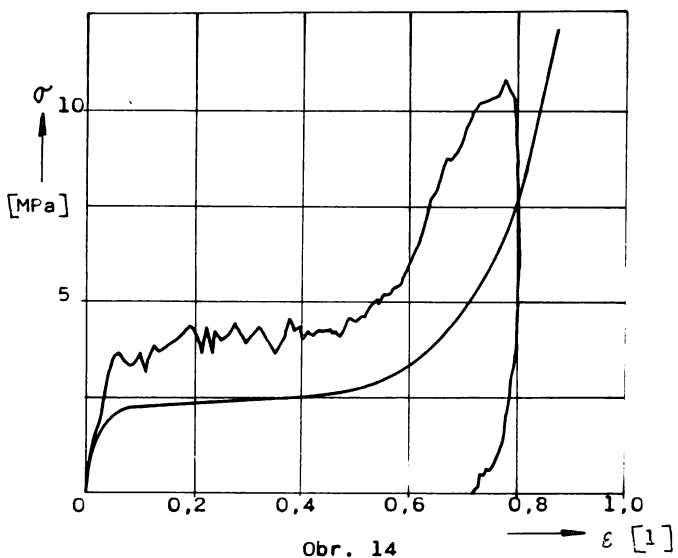
Obr. 11



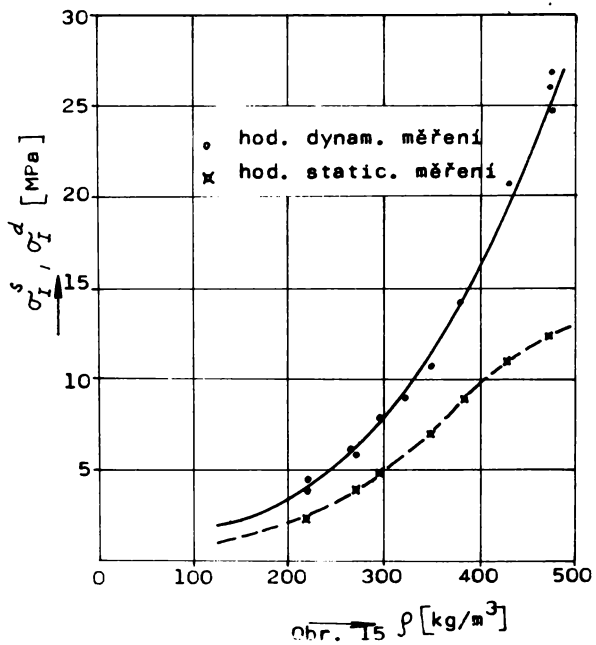
Obr. 12



Obr. 13



Obr. 14



Obr. 15 ρ [kg/m³]

