

**EXPERIMENTÁLNÍ VYŠETŘOVÁNÍ DYNAMIKY  
LOMU DESEK ZHOTOVENÝCH Z AKRYLONU (PMMA)**

**Vladimír HUMEN, Bohuslav STRÍŽ**

**Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti  
Vysoká škola strojní a textilní v Liberci**

### Anotace

V článku jsou podány některé výsledky experimentálního vyšetřování dynamiky lomu 14-ti akrylonových desek (200x120x10 mm). Uvedené experimenty byly provedeny na experimentálním zařízení, které umožňuje sledovat pole napětí v okolí rychle se šířící trhliny v transparentních opticky citlivých materiálech metodami dynamické fotoelasticimetrie s využitím rychlostní fotografie. Z dosažených fotoelasticimetrických záznamů byla vyhodnocena rychlosť šíření trhliny a dynamický faktor intenzity napětí v závislosti na délce trhliny.

Popis experimentálního zařízení, metodika vyhodnocení a interpretace dosažených výsledků jsou obsahem článku.

## 1. Úvod

V letech 1973-76 bylo na katedře mechaniky, pružnosti a pevnosti VŠ strojní a textilní v Liberci postaveno experimentální zařízení umožňující sledovat pole napětí kolem rychle se šířící trhliny v roviných deskách zhotovených z opticky citlivého transparentního materiálu metodami dynamické fotoelasticimetrie a rychlostní fotografie. Při vývoji experimentálního zařízení byla vyřešena řada technických problémů, jejichž bližší popis lze nalézti ve zprávách KMP [1], [2]. Stav zařízení v polovině roku 1976 umožnil, aby bylo přistoupeno k experimentálnímu výzkumu dynamiky lomu na 14-ti zkušebních deskách zhotovených z Akrylonu. Vyhodnocení záznamu lomu je předmětem tohoto příspěvku.

## 2. Experimentální zařízení

Zkušební vzorek ve tvaru desky o rozměrech 200x120x10 mm s jednostranným vrubem je upnut v zatežovacím rámu (obr. 1). Rozběh trhliny z vrubu desky je vyvolán impulsním zařízením, které sestává z válcové tyčky zakončené tupým klínem zapadajícím do vrubu zkušební desky. Na plochém konci tyčky je kovadlinka s válcovým vybráním pro umístění rozbušky ASP hmotnosti 0,5 g. Rozbuška je synchronně odpálena jiskrovým palníkem vlastní konstrukce. Rázová vlna vyvolaná detonací rozbušky je kovadlinkou a válcovou tyčkou přenesena do vrubu jednoose zatížené desky. Z vrubu se započne šířit trhлина a napěťové pole kolem této rychle se šířící trhliny je zviditelněno polariskem s kruhovým uspořádáním. Obraz barevných izochromát je sníman rychlostní zrcátkovou fotokamerou SFR-2M s optickým vyrovnaním obrazu. Jako zdroj světla je užit výboj baterie kondenzátorů WK 720 18 o výsledné kapacitě  $250 \mu\text{F}$  přes lineární výbojku XVL 1500 by Tesla Praha, která je umístěna v ohnisku parabolického reflektoru. Celková energie akumulovaná v baterii kondenzátorů je 1200 J a výsledný téměř obdélníkový puls má délku trvání  $300 \mu\text{s}$ .

Celkové schéma experimentálního zařízení je uvedeno na obr. 2, ve kterém značí :

- 1 , 2 - polarisátor a analyzátor
- 3 , 4 - čtvrtvlnové desky
- 5 - impulsní zařízení
- 6 - kamera SFR - 2M
- 7 - parabolický reflektor s výbojkou
- 8 - ovládací pult kamery.

Spouštění celého děje, tj. rozběh kamery, synchronní odpaření impulsního zařízení a záblesku světla se děje z ovládacího pultu kamery. Aby bylo možné osvětlit zkoumaný jev v určitém, předem zvoleném časovém okamžiku po rozběhu trhliny, je v systému zabudován zpožďovací blok, který umožňuje zpozdit záblesk světla vůči iniciaci rozbušky. Poznamenejme, že základní synchronizační puls je vázán polohou zrcátka kamery.

### 3. Provedené experimenty a metodika vyhodnocení

Na popsaném experimentálním zařízení bylo přetřženo 14 desek o rozměrech  $200 \times 120 \times 10$  mm zhotovených z jedné desky  $2 \times 1$  m Akrylonu. Na těchto deskách byla sledována fáze rozběhu a šíření trhliny za podmínky přibližně stejného počátečního nominálního napětí. Část typického záznamu pole napětí kolem rychle se šířící trhliny dosaženého na těchto deskách je uveden na obr.3. Časová vzdálenost mezi jednotlivými dvojicemi snímků je  $8,33 \mu s$ . Poznamenejme, že všechny desky byly přetřženy při teplotě  $T=20^{\circ}C$ . Materiálové konstanty Akrylonu užité pro vyhodnocení provedených experimentů jsou uvedeny souhrnné v tabulce 1.

Název	označení	rozměr	hodnota
Youngův modul	E	MPa	$3,3 \cdot 10^3$
rychlosť šíření dilatačních vln	$c_1$	$m s^{-1}$	1770
rychlosť šíření smykových vln	$c_2$	$m s^{-1}$	970
hustota	$\rho$	$g cm^{-3}$	1,18
koeficient optické citlivosti	$k_\delta$	$N m^{-1}$	$2 \cdot 10^5$
mez pevnosti	$\delta_p$	MPa	69

Tabulka 1

### 3.1. Vyhodnocení délky trhliny a rychlosti šíření trhliny

Ze zvětšeného záznamu trhliny a pole izochromát byla vyhodnocena pro každý snímek délka trhliny. Příklad vyhodnocení délky trhliny v závislosti na čase pro desku B 8 je uveden na obr. 4. Rychlosť šíření kořene trhliny byla vyhodnocena z výše uvedené závislosti délky trhliny na čase pomocí diferenčního vztahu

$$v_{i+1} = \frac{l_{i+2} - l_i}{\Delta t},$$

jehož význam je zřejmý z obr. 5.

Takto získaná rychlosť je přiřazena záznamu délky trhliny ležícím v polovině časového intervalu  $\Delta t = 8,33 \mu s$ . Vyhodnocené rychlosťi šíření kořene trhliny v závislosti na pomérné délce trhliny pro desku B 8 jsou uvedeny na obr. 6.

### 3.2. Vyhodnocení faktoru intenzity napětí $K_{IDyn}$

Pro vyhodnocení faktoru intenzity napětí byl zvolen jednak přístup dynamický, využívající Brobergova řešení napěťového pole kolem rychle se šířící trhliny [3] a jednak přístup kvazistatický, využívající Irwinova řešení [4] napěťového pole v okolí statické trhliny.

Broberg odvodil pro dynamický faktor intenzity napětí vztah:

$$K_{IDyn} = K_{IStat} \cdot F(\bar{v}),$$

kde  $K_{IStat}$  je hodnota statického faktoru intenzity napětí pro příslušnou délku trhliny. Veličina  $F(\bar{v})$  je funkcií rychlosťi kořene trhliny a její tvar je dán výrazem uvedeným např. v [4]. Funkce  $F(\bar{v})$  pro hodnoty rychlosťí vln  $c_1$  a  $c_2$  příslušných Akrylonu byla pomocí počítače HP 9830 spočtena v intervalu  $<0, 250 ; 0, 700>$  pomérné rychlosťi  $\bar{v} = v/c_2$  a je uvedena na obr. 7.

$K_{IStat}$  pro příslušnou délku trhliny byl stanoven pomocí korekčního činitele  $\gamma$  [10] podle vztahu :

$$K_{I_{\text{Stat}}} = Y \cdot l_c^{\frac{1}{2}} \frac{P(l_c)}{t w} ,$$

kde  $l_c$  je délka trhliny  
 $t$  je tloušťka desky  
 $w$  je šířka desky  
 $P(l_c)$  je zatěžovací síla .

Poznamenejme, že při výpočtu  $K_{I_{\text{Stat}}}$  byl, na základě pozorování ústupu základního barevného odstínu, vysloven předpoklad o lineárním poklesu zátěžní síly  $P$  v závislosti na délce trhliny.

Ze znalosti délky trhliny  $l_c$  a příslušné rychlosti kořene trhliny  $v$  (resp. jejich poměrných hodnot  $\bar{l}_c$  a  $\bar{v}$ ) byly vypočteny hodnoty  $K_{I_{\text{Stat}}}$  a  $K_{I_{\text{Dyn}}}$  (Broberg). Pro desku B 8 jsou uvedeny na obr. 8 v závislosti na poměrné délce trhliny  $\bar{l}_c$ .

Dynamická fotoelasticimetrie spojená s rychlostní fotografií umožňuje zobrazit napěťové pole v okolí šířící se trhliny pomocí barevných izochromatických křivek.

Jednoduchými úpravami s využitím Mohrovy kružnice lze ukázat pro Irwinovo řešení vztah mezi faktorem intenzity napětí a polárními souřadnicemi bodů příslušné izochromáty ve tvaru

$$K_I \sin \theta = \left[ \sqrt{2} \cdot \sqrt{(2 \tau_m)^2 - (\sigma_{\max} \cos \frac{3\theta}{2})^2} - \sigma_{\text{nom}} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \cdot \sqrt{r} ,$$

kde  $r$  a  $\theta$  jsou polární souřadnice izochromáty a  $\tau_m$  je velikost maximálního smykového napětí na téže izochromátě.

Zvolíme-li  $\theta = 90^\circ$  pak předchozí vztah se zjednoduší na tvar

$$K_I = \left[ \sqrt{2} \cdot \sqrt{(2 \tau_m)^2 - \frac{\sigma_{\text{nom}}^2}{2}} - \frac{\sigma_{\text{nom}}}{\sqrt{2}} \right] \cdot \sqrt{r_{\theta=90^\circ}} .$$

Vzhledem k malé optické citlivosti Akrylonu je pole napětí v okolí kořene šířící se trhliny zobrazeno pouze dvěma izochromatickými křivkami řádu 0,5 a 1,5. Pro souřadnici vnitřní izochromáty (řád 1,5) je zavedeno označení

$$r_{\theta=90^\circ} = a$$

a pro souřadnici  $r$  vnější izochromáty (řad 0,5) je zavedeno označení

$$r_{\theta=90^\circ} = b .$$

Vypočtené hodnoty  $K_I$  podle vnitřní resp. vnější izochromáty pro desku B 8 jsou uvedeny na obr. 9. a jsou označeny

$$a K_{IDyn} \text{ (IRWIN)} ,$$

resp.

$$b K_{IDyn} \text{ (IRWIN)} .$$

Poznamenejme, že Irwin odvodil vztahy pro pole napětí v okolí kořene trhliny za předpokladu  $r \ll l_c$ . Na vyšetřovaných izochromatických křivkách byl poměr

$$\frac{a}{l_c} \in \langle 0,138; 0,042 \rangle$$

a poměr

$$\frac{b}{l_c} \in \langle 0,954; 0,181 \rangle$$

pro  $l_c \in \langle 0,189; 0,896 \rangle .$

Z uvedeného je zřejmé, že Irwinově podmínce lépe vyhovuje souřadnice vnitřní izochromáty řádu 1,5.

#### 4. Zhdnocení provedených experimentů a porovnání s výsledky některých předchozích prací

##### 4.1. Experimentální zařízení

Postavení experimentálního zařízení umožňuje vyšetřovat v polarizovaném světle napěťové pole kolem rychle se šířící trhliny v transparentních, opticky citlivých rovinových tělesech. Pomocí zpožďovacích elektronických obvodů lze sledovat různé

fáze porušení, přičemž minimální časová vzdálenost jednotlivých dvojic snímků je při dobré rozlišovací schopnosti  $5,53 \mu s$ . Experimentální zařízení umožnuje tedy sledovat vlnové děje související se šířením trhliny, vliv lokálních napěťových polí, vliv tvaru rovinného tělesa apod. na děj porušení.

Nevýhodou současného stavu experimentálního zařízení je rozběh trhliny rázovou vlnou vyvolanou detonací  $0,5 g$  rozboušky v impulsním zařízení. Je tedy nutné konstatovat, že snímky napěťového pole kolem trhliny zachycují dva vlnové děje, které se mohou vzájemně ovlivnit a jejichž rozlišení bude vyžadovat další experimentální i teoretické práce. V porovnání s dostupnými literárními údaji lze konstatovat, že vlastnosti postaveného experimentálního zařízení jsou srovnatelné s vlastnostmi obdobných zahraničních zařízení [5], [6], [7].

#### 4.2. Rychlosť šíření kořene trhliny a faktor intenzity napětí $K_I$

V závěrech plynoucích z vyhodnocených závislostí pro 14 zkušebních desek byla zaměřena pozornost na interval  $<0,25 ; 0,65>$  poměrné délky trhliny  $\bar{Y}_c$ . V tomto intervalu lze předpokládat menší vliv rozběhového pulsu a okrajových efektů hran zkušební desky. Taktéž platnost korekčního činitele  $Y$  je vyhovující do hodnoty  $0,6 \bar{Y}_c$ . Poznamenejme, že nominální napětí pro zkoumané desky bylo v rozmezí  $12, 16 \div 13, 14 \text{ MPa}$  ( $124 \div 135 \text{ kp cm}^{-2}$ ) a teplota desek byla  $20^\circ\text{C}$ .

##### a) Rychlosť šíření kořene trhliny

Rychlosť šíření kořene trhliny není pro  $\bar{Y}_c \in <0,25; 0,65>$  konstantní ani monotónně rostoucí či klesající funkcí. V uvedeném intervalu je rychlosť šíření trhliny funkcí oscilující v rozmezí  $400 \div 650 \text{ m s}^{-1}$ . Dosažené hodnoty rychlosťí jsou v souladu s rychlosťmi uvedenými v [7], [8], [9] pro PMMA (polymetylmetakrylát).

b) Faktor intenzity napětí  $K_I$

Dynamický  $K_I$  vypočtený pomocí rychlosti v trhliny  $K_{IDyn}$  (BROBERG) i pomocí vnitřní izochromáty  $^a K_{IDyn}$  (IRWIN) v okolí kořene trhliny je u všech desek menší než  $K_{IStat}$  vy-počtený pomocí korekčního činitele Y pro danou délku trhliny a předpokladu lineárního poklesu zátěžné síly.  $K_{IStat}$  je pro  $\bar{f}_c \in <0,25 ; 0,65>$  monotónně rostoucí funkcí v intervalu  $4,5 \div 12,5 \text{ MN m}^{-2}$ . V intervalu  $\bar{f}_c \in <0,2 ; 0,55>$  je  $^a K_{IDyn}$  (IRWIN) větší než  $K_{IDyn}$  (BROBERG). V intervalu  $\bar{f}_c \in <0,55 ; 0,65>$  oba dva výpočtové postupy dávají prakticky shodné numerické hodnoty. Je tedy možné konstatovat, že  $K_I$  podle dynamického řešení Brobergova určený pomocí experimen-tálně stanovené rychlosti trhliny a  $K_I$  podle Irwinova static-kého řešení určený pomocí experimentálně stanovených barevných izochromát jsou shodné pro místa, která alespoň přibližně splňují podmínu rozlehlosti desky v níž se trhлина šíří.  
Pro  $\bar{f}_c \in <0,55 ; 0,65>$  se rychlosť pohybuje v intervalu  $500 \div 600 \text{ m s}^{-1}$ . Pro tyto rychlosťi kořene trhliny je též v práci Greena a Pratta [7] nalezen dobrý souhlas mezi  $K_I$  podle Bro-berga a Irwina.

Výsledkem obou dvou metod určené hodnoty  $K_I$  jsou oseilu-jící funkce v závislosti na  $\bar{f}_c$ . Pro  $\bar{f}_c \in <0,55 ; 0,65>$  je  $K_{IDyn} \in <4,6> \text{ MN m}^{-2}$ . Taktéž tyto numerické hodnoty jsou v dobrém souladu s [7] a [9].

Vzájemné porovnání faktorů  $K_I$  (IRWIN) vypočtených pomocí vnitřní izochromáty (a) a vnější izochromáty (b) ukazuje, že  $^b K_{IDyn}$  (IRWIN) je vždy menší než  $^a K_{IDyn}$  (IRWIN). Lze soudit, že chování  $^a K_{IDyn}$ , který je spočten pomocí vnitřní izochromáty ukazuje spíše na vlastnosti materiálu v kořeni trhliny, zatímco průběh  $^b K_I$  (vnější izochromáta  $b = 25 \text{ mm}$ ) ukazuje na vliv od-ražených napěťových vln a tedy na vliv okrajových podmínek ex-perimentu, tj. geometrie desky a iniciace trhliny.

Oprávněnost tohoto závěru plyne též z porovnání míst maxi-málních hodnot rychlosťi trhliny a faktoru  $^a K_{IDyn}$  (IRWIN).

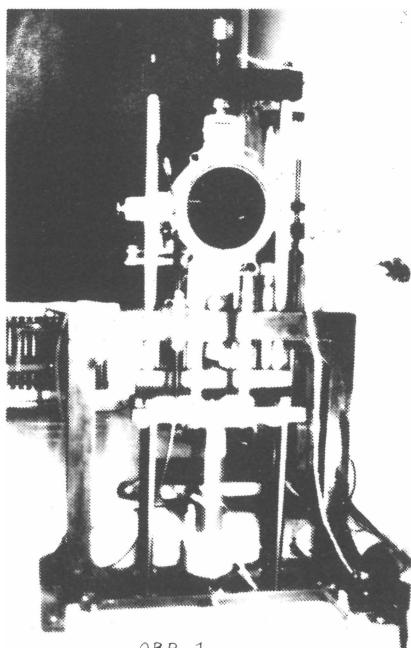
Lze nalézti, že maxima na průběhu  $a_{K_{IDyn}}$  zpravidla předcházejí maxima v průběhu rychlosti. Je vhodné však poznamenat, že ověření chování  $a_{K_{IDyn}}$  a rychlosti v bude obsahem dalších experimentálních prací prováděných na katedře mechaniky, pružnosti a pevnosti VŠST.

#### Seznam vyobrazení

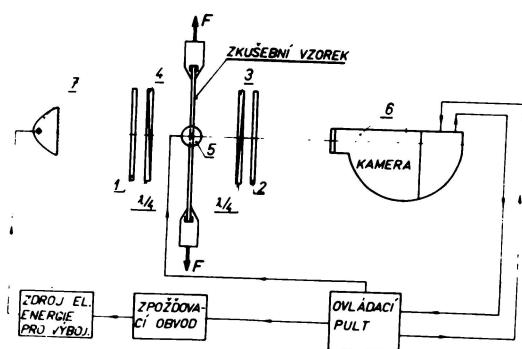
- Obr. 1 Zatěžovací rám
- Obr. 2 Blokové schéma experimentálního zařízení
- Obr. 3 Část záznamu z SFR 2M
- Obr. 4 Závislost délky trhliny na čase - deska B 8
- Obr. 5 Znázornění diferenčního vztahu pro určení rychlosti šíření trhliny
- Obr. 6 Závislost faktoru intenzity napětí  $a_{K_{IDyn}}$  (IRWIN) a rychlosti šíření trhliny v na pomerné délce trhliny - deska B 8
- Obr. 7 Průběh funkce F (v)
- Obr. 8 Závislost  $K_{IStat}$ ,  $a_{K_{IDyn}}$  (IRWIN),  $K_{IDyn}$  (BROBERG) na  $\bar{t}_c$  - deska B 8
- Obr. 9 Závislost  $a_{K_{IDyn}}$ ,  $b_{K_{IDyn}}$  na  $\bar{t}_c$  - deska B 8 .

## Literatura

- [1] STRÍŽ B. a kol.: Výzkum podmínek rozvoje křehkých trhlin z hlediska absorpce rázových vln. Závěrečná zpráva stát. úk. III-5-3/7-2 za léta 1973 až 1975. KMP VŠST Liberec 1975.
- [2] STRÍŽ B. a kol.: Dynamika lomu. Zpráva stát. úk. III-6-1/3-1 za rok 1976 KMP VŠST Liberec 1976
- [3] BROBERG K.B.: The propagation of a brittle crack. In: Arkiv för fysik, Band 18, No 10, 1960, str. 449-458
- [4] FRACTURE, edit. Liebowitz, Vol.II; AP New York, London 1968, ruský překlad: Moskva 1975
- [5] BRADLEY W.B., KOBAYASHI A.S.: Fracture dynamics - A photo-elastic investigation. In: Engineering Fracture Mech. 1971, Vol. 3; str. 317-332
- [6] FINKEL V.M. a kol.: Nekotorije rezultaty issledovanija vzaimodějstviya volny naprjaženij s treščinoj. In: Vysokoskorostnaja deformacija, Nauka, Moskva 1971
- [7] GREEN A.K., PRATT P.L.: Measurement of the dynamic fracture toughness of PMMA by high-speed photografy. In: Eng.. Fract. Mech. 1974, Vol. 6, No 1; str. 71 - 80
- [8] NĚMEC J., SERENSEN S.V.: Pevnost plastických hmot, SNTL Praha 1970
- [9] CHUB J.P., CONGLETON J.: Crack velocity due to combined tensile and impact loading. In: Philosophical Magazine, Vol. 28, No 5, Nov. 1973, str. 1087-1097
- [10] BROWN W.F., SRAWLEY J.E.: Plane strain cracks toughness testing of high strength metallic materials. In: ASTM special technical publication, No 410; ruský překlad: Moskva 1972.

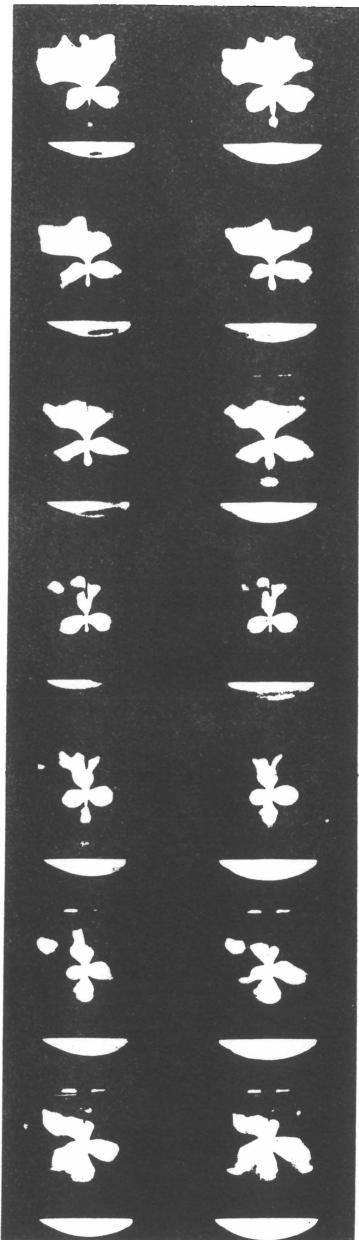


OBR. 1

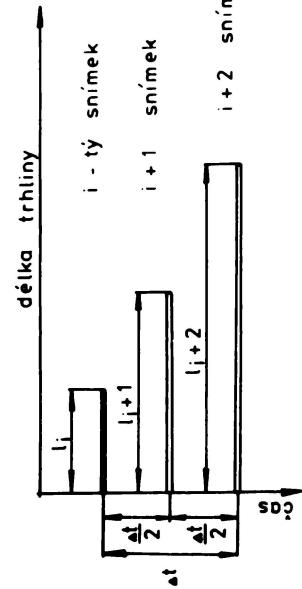
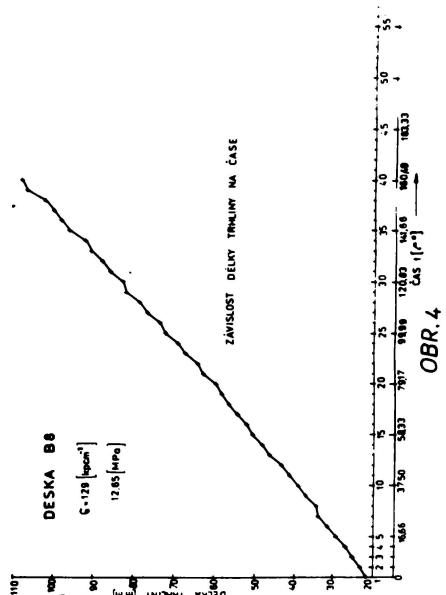


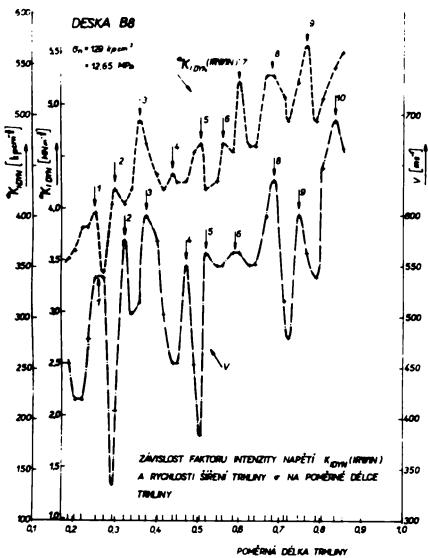
BLOKOVÉ SCHEMA

OBR. 2



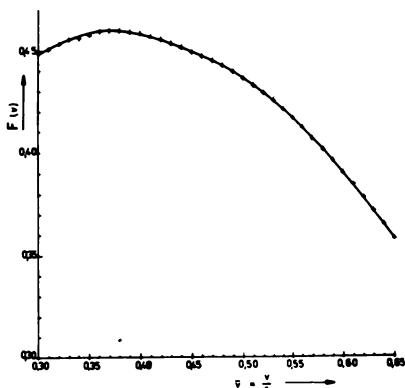
OBR. 3



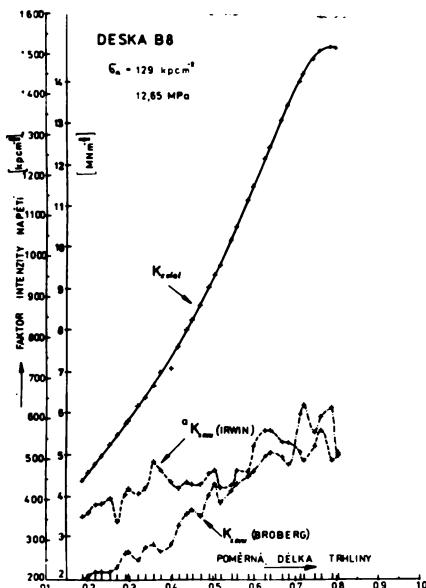


OBR. 6

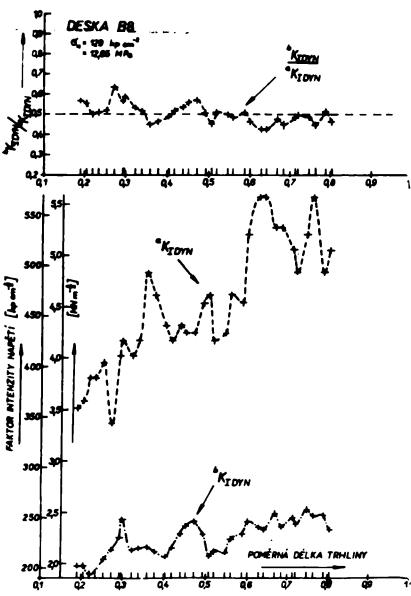
PRŮBĚH FUNKCE  $F_V$  PRO  $k = \frac{S_c}{c_0} = 0,55$



OBR. 7



OBR. 8



OBR. 9