

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI  
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní  
Obor 23-07-8  
strojírenská technologie  
zaměření

tváření kovů a plastických hmot

Katedra tváření a plastů

METODY URČOVÁNÍ MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY n

Šárka LNĚNIČKOVÁ  
KPT - 349

Vedoucí práce: Ing. Zdeňka Moravcová  
KPT - VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh  
Počet stran: 61  
Počet příloh: 13  
Počet obrázků: 29  
Počet výkresů: -  
Počet modelů: -  
Jiné přílohy: -  
Počet tabulek: 7

Liberec dne 10. 5. 1988

Vysoká škola: strojná a textilní Fakulta: strojná  
Katedra: tváření a plastů Školní rok: 1987/88

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DILA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Šárku Lněničkovou  
obor 23 07 - 8 Strojírenská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Metody určování materiálové charakteristiky n

## Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretické zpracování zadané problematiky z hlediska významu pro posuzování tvářitelnosti hlubokotažných plechů.
- 2) Volba metodiky experimentu.
- 3) Experimentální určování materiálové charakteristiky n hlubokotažného ocelového plechu.
- 4) Zpracování výsledků a rozbor zpracování, - zejména z hlediska určování mezních hodnot přetvoření.
- 5) Zhodnocení a závěr.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÁ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 6  
PŠČ 461 17

*Plen...  
- ...  
...*

*V251 / 88 5*

*KPT/TP*

Rozsah grafických prací: 30 - 40 stran

Rozsah průvodní zprávy:

Seznam odborné literatury:

- Pelišák, L.: Anizotropie a hlubokotáhlost  
ocelových ploch, ALFA/  
Bratislava 1978
- Mikš, V.: Příspěvek k problematice určování  
materiálové hodnoty tenkých hlu-  
bokotáhlost ocelových ploch,  
Strojářství, květen 1972
- CSN 420436 - návrh: Skúška exponenta defor-  
mačného spevnenia.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdena Moravcová

Datum zadání diplomové práce: 11. 9. 1987

Termín odevzdání diplomové práce: 10. 5. 1988



Doc. Ing. Jaroslav Imšj, CSc.

Vedoucí katedry

Prof. Ing. Vladimír Prášil, DrSc.

Děkan

Liberec

12. 9.

87

V ..... dne ..... 19.....

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci  
vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci : 10.5. 1988

podpis.....  
*Lučivová*

Děkuji ing. Zdeňce Moravcové za cenné rady  
a připomínky ke zpracování diplomového úkolu.

## OBSAH

Seznam použitých symbolů .....	5
1. Úvod.....	6
2. Úvod do problematiky posuzování tvářitelnosti hlubokotažných ocelových plechů.....	8
3. Materiálová charakteristika n .....	12
3.1 Definice exponentu zpevnění.....	12
3.2 Fyzikální význam exponentu zpevnění.....	16
3.3 Obecný význam exponentu zpevnění.....	17
3.4 Faktory ovlivňující hodnotu exponentu zpevnění..	17
3.5 Exponent zpevnění a mezní stupeň tažení.....	19
4. Souvislost materiálové hodnoty n se vztahy pro vyjádření mezních křivek velkých plastických přetvoření.....	21
4.1 Ztráty stability tvářecího procesu.....	21
4.2 Mezní hodnoty přetvoření.....	22
5. Metody určování materiálové charakteristiky n ve vztahu k hodnocení hlubokotažnosti ocelových plechů zkouškou tahem.....	30
5.1 Nepřímá metoda určování materiálové charakteristiky n .....	31
5.1.1 Dvojbodová metoda.....	31
5.1.2 Metoda FC ("full curve" ).....	32
5.2 Přímá metoda určování materiálové charakteristiky n.....	36
5.2.1 Metoda dle Ruzanova.....	36
5.2.2 Metoda provedená přerušením tahové zkoušky na mezi pevnosti.....	37
5.3 Provedení tahové zkoušky na dvoustupňové tyči...	38
6. Experimentální část.....	41
6.1 Charakteristika použitého materiálu.....	41
6.2 Metodika provádění experimentu.....	42
6.2.1 Výběr zkušebních vzorků.....	42

6.2.2	Proměřování vzorků.....	43
6.2.3	Postup experimentu.....	44
6.3	Zpracování grafické závislosti $F - \Delta L$ .....	47
6.3.1	Výpočet exponentu deformačního zpevnění n užitím metody nejmenších čtverců.....	47
6.3.2	Stanovení maximálního rovnoměrného pře- tvoření $\psi_k$ odpovídajícího mezi pevnosti..	48
6.3.3	Určení maximálního rovnoměrného přetvo- ření $\psi_u$ proměřováním vzorků.....	48
6.4	Určování mezních hodnot přetvoření výpočtem.....	49
6.5	Výsledky.....	50
6.6	Rozbor výsledků.....	52
6.6.1	Vztah hodnot $n$ , $\psi_k$ , $\psi_u$ .....	52
6.6.2	Rozbor skutečných délkových deformací.....	53
6.6.3	Zhodnocení vlivu hodnot $n$ , $\psi_k$ a $\psi_u$ na velikost mezních přetvoření a vzá- jemný vztah křivek mezních přetvoření získaných z vypočtených hodnot $\psi_{1k}$ a $\psi_{2k}$ a křivek experimentálně zjištěných.	53
7.	Závěr.....	59
8.	Seznam příloh.....	60
9.	Seznam použité literatury.....	61

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

$r_m$	... průměrný součinitel normálové anizotropie
$r$	... směrový součinitel normálové anizotropie
$n$	... směrový exponent zpevnění
$n_s$	... průměrný exponent zpevnění
$n_k$	... exponent zpevnění zjištěný při metodě dle Ruzanova
$An$	... plošná anizotropie exponentu zpevnění
$\psi_b$	... integrální deformace ve směru šířky
$\psi_s$	... integrální deformace ve směru tloušťky
$\psi_L$	... integrální délková deformace
$s_o$	... počáteční tloušťka vzorku /mm/
$s$	... konečná tloušťka vzorku /mm/
$b_o$	... počáteční šířka vzorku /mm/
$b$	... konečná šířka vzorku /mm/
$L_o$	... počáteční měřená délka vzorku /mm/
$L$	... délka vzorku po maximální rovnoměrné deformaci /mm/
$\sigma_i$	... intenzita napětí /MPa/
$\psi_i$	... intenzita přetvoření
	... poměrná deformace
$C$	... materiálová konstanta /MPa/
$\sigma_{sml}$	... smluvní napětí /MPa/
$\sigma$	... skutečné napětí /MPa/
$F_i$	... zatěžující síla /N/
$m\sigma$	... koeficient charakterizující stav napjatosti
$m\psi$	... koeficient charakterizující stav přetvoření
$\psi_{ik}$	... kritická hodnota přetvoření
$S_o$	... původní průřez vzorku /mm <sup>2</sup> /
$S$	... okamžitý průřez vzorku /mm <sup>2</sup> /
$A$	... tažnost /%/
$R_e$	... mez kluzu /MPa/
$R_m$	... mez pevnosti /MPa/
$K$	... stupeň tažení
$D$	... průměr výchozího nástřihu /mm/
$d$	... průměr výtažku /mm/
$\sigma_{1,2,3}$	... hlavní napětí /MPa/
$\psi_{1,2,3}$	... hlavní deformace



## 1. ÚVOD

Současná etapa vývoje jak z vnitřního, tak mezinárodního hlediska, před naší společností staví otázku, kterou je nevyhnutelnost urychlit sociálně ekonomický rozvoj naší společnosti, podstatně zvýšit výkonnost a efektivnost národního hospodářství. Dosažení těchto cílů vyžaduje opírat se o uskutečňování strategické linie urychlení sociálně ekonomického rozvoje zejména cestou intenzifikace národního hospodářství.

Všestranná intenzifikace naší ekonomiky je podmíněná podstatným urychlením vědeckotechnického pokroku a důsledným zaváděním jeho výsledků do praxe.

V urychlování vědeckotechnického pokroku a v modernizaci výrobní základny má rozhodující úlohu strojírenství. Jednou z vysoce produktivních a efektivních technologií, která se má podílet rozhodujícím způsobem na rozvoji strojírenství, je technologie plošného tváření plechů - lisovatelnost plechů. Československo z hlediska používání a uplatnění plechů lze charakterizovat jako zemi soběstačnou ve výrobě plechů a zemi vyrábějící kvalitní stroje pro zpracování plechů. Na vysoké úrovni je výzkum a vývoj v oblasti technologií zpracování plechů.

Ve vztahu k teorii a technologii tváření plechů je největší pozornost věnována těmto otázkám :

- a/ mezní stavy materiálů
- b/ optimální využití vlastností tvářeného materiálu
- c/ optimální volba technologických podmínek tváření
- d/ výpočet tvářecích sil.

Při řešení těchto otázek je s ohledem na velká plastická přetvoření využívána teorie tečení, je uvažována anizotropie a zpevnění materiálu a další znaky charakteristické pro hlubokotažné plechy - způsob výroby, chemické složení, mikrostruktura, makrostruktura a mechanické hodnoty.

Z hlediska správného zpracování a využití plechů jsou velmi důležité materiálové charakteristiky. Mezi nejvýznamější materiálové charakteristiky pro posouzení lisovatelnosti plechů patří hodnota  $n$ , nazývaná exponent zpevnění. Tato hodnota se využívá k určování mezních přetvoření v procesu tažení.

Úkolem této diplomové práce je právě řešení otázky experimentálního určování materiálové charakteristiky  $n$  hlubokotažných ocelových plechů.

## 2. ÚVOD DO PROBLEMATIKY POSUZOVÁNÍ TVÁŘITELNOSTI HLUBOKOTAŽNÝCH OCELOVÝCH PLECHU

V posledních letech velmi pokročil světový výzkum v oblasti zpracování plechů tvářením. Jedná se převážně o výzkum vlastností a procesů tváření nízkouhlíkových ocelových plechů. Použití plechů je velmi důležité hlavně ve strojírenství, které je hlavním odborem pro rozvoj celé průmyslové výroby. Tato skutečnost přináší to, že je nevyhnutelné zdokonalit existující technologii, případně uvádět nové technologické procesy s využitím nejmodernějších mechanizačních a automatizačních zařízení.

Zkouškám tvářitelnosti plechů světový výzkum věnuje velkou pozornost. Jde především o výzkum a definování takových kritérií tvářitelnosti, které by s vysokým stupněm modelovosti byly schopné modelovat napěťovo-deformační stavy při skutečných technologických procesech tváření. V případě tváření plechů se zvláštní pozornost věnuje zkouškám vhodnosti plechů na hluboké tažení, tedy procesu vyznačujícímu se složitým napěťovo-deformačním stavem, který je tím složitější, čím je vyšší stupeň asymetrie tvaru konkrétního výtažku.

Zkoušky hlubokotažnosti lze rozdělit do dvou skupin. Jsou to zkoušky základní a napodobující. Napodobující zkoušky /Erichsenova, Engelhardtova, Olsenova, Fukuiho aj./ hodnotí hlubokotažnost podle toho, jak napěťovo-deformační stav při dané zkoušce odpovídá napěťovo-deformačnímu stavu při hlubokém tažení konkrétního výtažku, který je v každém případě jiný, ale při dané napodobující zkoušce je konstantní. Proto většina autorů je zastáncem používání základní tahové zkoušky, jejíž zkoušky nejsou sporné, ale sporná je jejich aplikace na tažení hlavně složitých tvarů výtažků.

Běžné charakteristiky tahové zkoušky  $/R_e, R_m, A/$  dávají totiž pro praktické použití z hlediska hlubokotažnosti jen velmi orientační údaje.

Tento stav vedl k tomu, že ve výzkumu vznikla celá řada kritérií a zkoušek tvářitelnosti plechů, které je možné zahrnout do skupiny nových kritérií tvářitelnosti /4/. Mezi nová kritéria tvářitelnosti patří různé kombinace výsledků tahové zkoušky, ale hlavně charakteristiky vycházející z tahového diagramu skutečné napětí - skutečná deformace. Výzkumem procesu hlubokého tažení se zjistilo, že je nutné započítávat směrovou závislost vlastností plechů, tzv. anizotropii plechů. Vyplynulo to ze zkoumání deformací po šířce a tloušťce plechu, které by teoreticky měly být stejné při jednoosém tahu, ale ve skutečnosti jsou různé pro různé směry téhož plechu.

Anizotropie se definuje jako směrová závislost mechanických a fyzikálních vlastností, přičemž za porovnávací se pokládá směr válcování. U plechů pro hluboké tažení se zjišťují dva druhy anizotropie

1. plošná
2. normálová.

Plošná anizotropie je definována jako směrová závislost mechanických a fyzikálních vlastností v rovině plechu vzhledem ke směru válcování. Normálová anizotropie plechů vyjadřuje nerovnoměrnost mechanických vlastností zjištěných v rovině plechu vzhledem k mechanickým vlastnostem ve směru kolmém na rovinu plechu. Je kvantitativně vyjádřena bezrozměrným číslem, koeficientem normálové anizotropie, který je matematicky definovaný vztahem

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad /1/$$

$$\varphi_b = \ln \frac{b_0}{b} \quad /2/$$

$$\varphi_s = \ln \frac{s_0}{s}$$

/3/

r ... součinitel normálové anizotropie  
 $b_0, s_0$  ... počáteční šířka a tloušťka vzorku  
 $b, s$  ... šířka a tloušťka vzorku po maximální rovnoměrné deformaci

Protože měření délky je přesnější než tloušťky, pro praktický výpočet se používá vztah odvozený ze zákona stálosti objemu

$$r = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{L \cdot b}{L_0 \cdot b_0}}$$

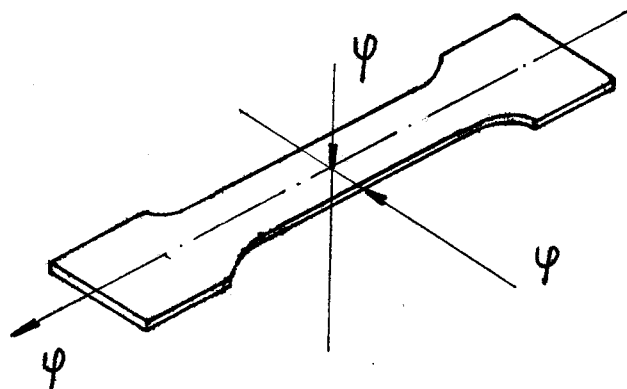
/4/

$L_0, L$  ... počáteční a konečná měřená délka vzorku.

Jako kritérium hlubokotažnosti se uvažuje průměrný součinitel normálové anizotropie

$$r_m = \frac{1}{4} ( r_0 + 2r_{45} + r_{90} )$$

/5/



Obr. 1. Znázornění skutečného přetvoření ve směru šířky a tloušťky zkušební vzorku

Za další kritérium hlubokotažnosti byl navržen součinitel deformačního zpevnění  $n$ , který je exponentem v rovnici  $\sigma_i = C \cdot \varphi_i^n$  vyjadřující závislost skutečné napětí - skutečné přetvoření při jednoosém tahovém namáhání.

Součinitele  $r$  a  $n$  dosáhly největšího rozšíření. Praktický význam jednotlivých nových kritérií hlubokotažnosti je v tom, že tato kritéria odpovídají podmínkám deformace při hlubokém tažení konkrétního výtažku.

Napodobující zkoušky hlubokotažnosti prakticky posuzují hlubokotažnost plechů jen pro rotačně symetrické tvary výtažků. V praxi však většina výtažků má buď symetrický nerotační nebo nesymetrický tvar, to znamená, že vykazuje jiná mechanická schémata deformací než při napodobujících zkouškách.

Nová kritéria hlubokotažnosti - součinitel normálové anizotropie a exponent deformačního zpevnění - jsou výhodné proto, že podle nich je možné hlubokotažnost plechu předpovídat pro konkrétní tvar výtažku charakterizovaný určitým mechanickým schématem deformace. Další výhoda spočívá v tom, že kritéria zahrnují i anizotropii vlastností hlubokotažných plechů. To umožňuje optimální orientaci polotovaru při nástřihu v tvářecím nástroji, která přispívá k racionálnější volbě nástřihových plánů, tvaru výchozích polotovarů, využití plastických vlastností plechů.

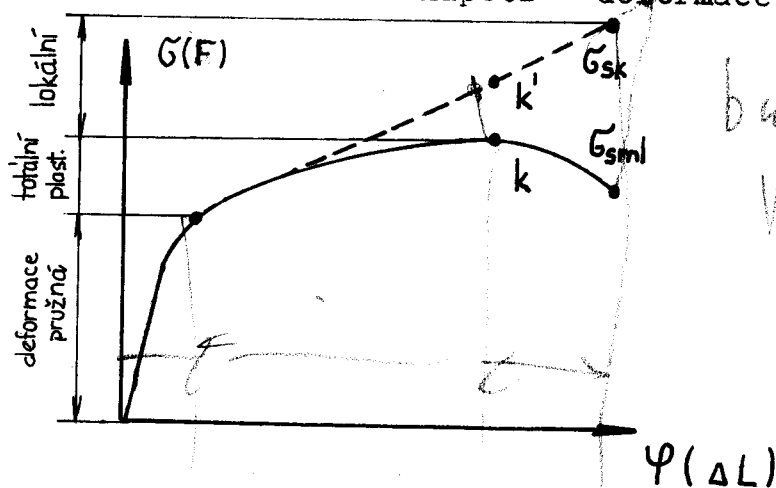
Obě kritéria hlubokotažnosti plechů  $r$  a  $n$  jsou tedy velmi významná. Dále se však budu věnovat podrobněji pouze exponentu deformačního zpevnění, neboť úkolem mé diplomové práce je určování tohoto exponentu.

### 3. MATERIÁLOVÁ CHARAKTERISTIKA n

Materiálová charakteristika  $n$ , která vyjadřuje intenzitu zpevnění materiálu v průběhu plastické deformace, je nezbytnou veličinou při matematických výpočtech v oblasti tváření. Vyskytuje se jako exponent ve vztahu  $\sigma_i = C \cdot \varphi_i^n$  nejčastěji používaném k aproximaci křivek zpevnění hlubokotažných ocelových plechů a je nazývána exponentem deformačního zpevnění.

#### 3.1 Definice exponentu zpevnění

Definice exponentu zpevnění vyplývá z matematického definování vztahu skutečných napětí a deformací v oblasti plastických přetvoření. Při tahové zkoušce získáme diagram, který v oblasti plastických přetvoření neodpovídá skutečnosti. Z hlediska tváření za poslední správný bod v diagramu tahové zkoušky (obr. 2) je možné považovat mez kluzu, v dalším průběhu jsou poměrně velké odchylky od skutečného průběhu závislosti " napětí - deformace ".



Obr. 2. Diagram tahové zkoušky

Odchylky mezi skutečným a smluvním diagramem způsobuje :

a/ změna původního průřezu  $S_0$  na okamžitý průřez  $S$ , při

výpočtech napětí však sílu vztahujeme k původnímu průřezu  $S_0$   
 b/ původní délka  $L_0$  se mění na okamžitou délku  $L$ , při  
 výpočtu poměrné změny délky se vychází z původní délky  $L_0$ .

Lze snadno odvodit vztah mezi skutečnou hodnotou napětí  
 a smluvní hodnotou napětí. Stejně lze matematicky vyjádřit  
 vztah mezi změnou poměrné délky a deformací, která se  
 počítá z okamžité délky.

Změna poměrné délky se vyjádří :

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad \text{/6/}$$

Vztah pro deformaci je odvozen z matematického vyjádření  
 elementární deformace :

$$d\varphi = \frac{dL}{L} \quad \text{/7/}$$

po integraci získáváme vztah pro vyjádření deformace  
 skutečné v mezích od  $L_0$  do  $L$  :

$$\varphi = \ln \frac{L}{L_0} \quad \text{/8/}$$

Vztah mezi  $\varphi$  a  $\varepsilon$  :

vztah /8/ vyjádříme jako exponenciální rovnici

$$e^\varphi = \frac{L}{L_0} \quad \text{/9/}$$

a dosazením vztahu /9/ do rovnice /6/ získáme výsledný vztah

$$\varepsilon = e^\varphi - 1 \quad \text{/10/}$$



$$\varphi = \ln ( 1 + \varepsilon ) \quad /11/$$

Podobně lze odvodit vztah mezi skutečnou a smluvní hodnotou napětí. Ze zákona zachování objemů a možných vyjádření síly vyplývá vztah mezi napětími

$$\bar{\sigma} \cdot S = \bar{\sigma}_{sml} \cdot S_0 \quad /12/$$

kde  $S_0$  ... původní průřez  
 $S$  ... okamžitý průřez  
 ... skutečné napětí  
 ... smluvní napětí

$$S_0 \cdot L_0 = S \cdot L \quad /13/$$

kde  $L_0$  ... původní délka  
 $L$  ... okamžitá délka

Dosazením vztahu /13/ do vztahu /12/ dostáváme

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{sml} \cdot \frac{L}{L_0} \quad /14/$$

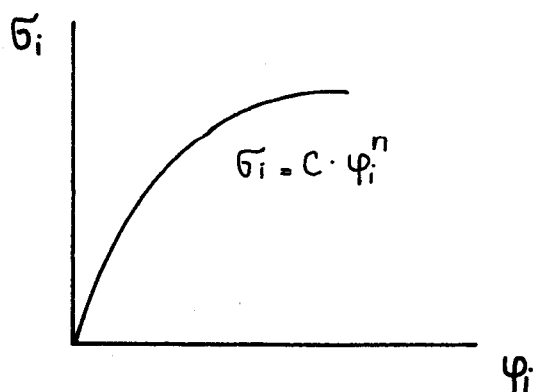
a dosazením vztahu /9/ nebo /10/ do rovnice /14/ získáme výsledný vztah

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{sml} \cdot e^{\varphi} \quad /15/$$

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{sml} \cdot ( 1 + \varepsilon ) \quad /16/$$

Tyto vztahy platí do meze pevnosti, za ní ztrácí materiál stabilitu, dochází k lokální ztrátě stability ( obr. 2 ). Provedlo se několik pokusů matematicky definovat závislost  $\bar{\sigma} - \varphi$  v oblasti totální plastické deformace. Pro nízko-uhlíkové ocele a pro mnohé technicky používané kovy lze

podle praktických zkušeností závislost mezi napětím  $\sigma$  a deformací  $\varphi$  při jednoosém tahovém namáhání definovat exponenciální závislostí ( obr. 3 ):



Obr. 3. Exponenciální závislost  $\sigma_i - \varphi_i$

$$\sigma_i = C \cdot \varphi_i^n \quad /17/$$

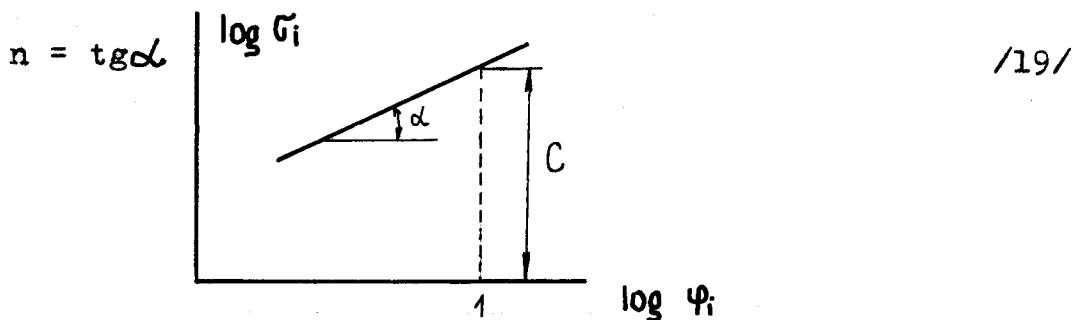
kde  $n$  ... exponent zpevnění

$C$  ... materiálová konstanta vyjadřující hodnotu napětí při deformaci  $\varphi_i = 1$

Pro definování exponentu zpevnění  $n$  je vhodné rovnici /17/ zobrazovat v logaritmických souřadnicích, protože potom rovnice /17/ představuje přímku ( obr. 4 ) :

$$\log \sigma_i = \log C + n \log \varphi_i \quad /18/$$

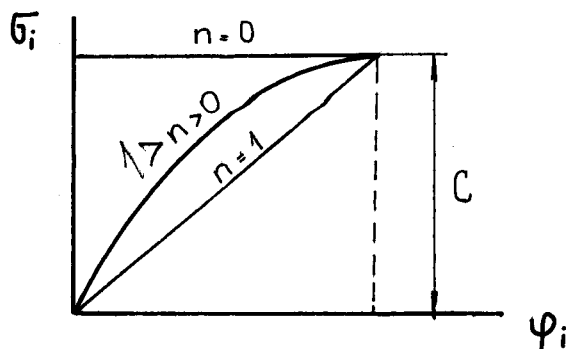
Exponent zpevnění lze vyjádřit jako směrnici této přímky



Obr. 4. Logaritmická závislost  $\sigma_i - \varphi_i$

### 3.2 Fyzikální význam exponentu zpevnění

Hodnota exponentu zpevnění v rovnici určuje tvar a orientaci exponenciály ( obr. 5 )



Obr. 5. Závislost  $\sigma_i - \varphi_i$  pro různé hodnoty exponentu zpevnění

Z obrázku vyplývá, že rozsah hodnot exponentu zpevnění se pohybuje v intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ . Pro  $n = 0$  dostáváme aproximaci pro ideálně plastický materiál bez zpevnění, pro  $n = 1$  aproximaci pro ideálně pružný materiál. Z téhož obrázku je zřejmé, že konstanta  $C$  má rozměr napětí pro  $\varphi = 1$ , v případě, že  $n = 0$  představuje hodnotu meze kluzu.

Materiálová charakteristika má ještě jeden fyzikální význam. Dosadíme - li vztah /17/ do vztahu /20/ dostáváme rovnici /21/ a /22/

$$\left( \frac{d\sigma}{d\varphi} \right)_k = \sigma_k, \quad / 20/$$

$$\sigma_k = \sigma_p \cdot e^{\varphi_k}, \quad /21/$$

$$C \cdot n \cdot \varphi_k^{n-1} = C \cdot \varphi_k^n$$

$$n = \varphi_k, \quad /22/$$

Vztah /22/ představuje druhý fyzikální význam - maximální rovnoměrné přetvoření odpovídající mezi pevnosti materiálu.

### 3.3 Obecný význam exponentu deformačního zpevnění

Význam a smysl exponentu zpevnění jako kritéria vhodnosti plechu pro hluboké tažení je v tom, že vyjadřuje schopnost plechu k rovnoměrné plastické deformaci při zkoušce jednoosým tahem. Jako kritérium hlubokotažnosti se používá průměrná hodnota exponentu  $n$  podle vztahu

$$n_s = \frac{1}{4} ( n_0 + 2n_{45} + n_{90} ) \quad /23/$$

kde  $n_0$ ,  $n_{45}$ ,  $n_{90}$  jsou směrové exponenty zpevnění ve směru 0, 45, 90° vzhledem ke směru válcování. Platí, že čím jsou hodnoty těchto exponentů vyšší, tím je plech vhodnější pro hluboké tažení.

Z tohoto vyplývá, že i v případě exponentu zpevnění se při vyhodnocování uvažuje plošná anizotropie. Často se vyhodnocuje i stupeň plošné anizotropie exponentu zpevnění

$$n = \frac{1}{2} ( n_0 - 2n_{45} + n_{90} ) \quad /24/$$

### 3.4 Faktory ovlivňující hodnotu exponentu zpevnění

Na exponent zpevnění hlubokotažných ocelových plechů mají vliv : a/ metalurgické činitele  
b/ výrobní činitele.

Z metalurgických činitelů má nejdůležitější vliv na velikost deformačního zpevnění a tedy i na hodnotu exponentu zpevnění velikost zrna a chemické složení. Podle požadavků na chemické složení plechů by měly plechy obsahovat :

0,11 % C (max)

0,45 % Mn (max)

0,035 % P (max)

0,035 % S (max)

0,02 % Al (min).

Větší množství P má za následek snížení exponentu zpevnění, stejný účinek má i obsah mědi. U neuklidněných ocelí má důležitou roli N, jeho vyšší množství způsobuje zvýšení meze kluzu a současně snížení tvrdosti. Negativní vliv má obsah S. Zhoršuje houževnatost a tažnost materiálu oceli za teploty okolí. Nežádoucí vzhledem k vlastnostem materiálu je vyšší obsah C. Hlavní význam příměsových prvků je v tom, aby se v praxi dosáhlo optimální hodnoty exponentu zpevnění v souladu s optimální velikostí zrna.

Pro plechy i ostatní materiály je důležitá velikost zrna. Překročí - li se velikost zrna, zhoršuje se kvalita povrchu. Velikost zrna ovlivňuje obsah P, proto je do určité míry žádoucí. S rostoucím obsahem P prudce klesá velikost zrna. Nežádoucí jsou vady ve struktuře, protože negativně ovlivňují velikost materiálové hodnoty  $n$  a mechanické vlastnosti v místech vady.

Podstatný vliv na exponent zpevnění mají výrobní podmínky. Jsou to - stupeň hladícího válcování, stárnutí materiálu, tepelné zpracování. S rostoucím stupněm hladícího válcování se snižuje hodnota exponentu zpevnění. Je to tím výraznější, čím delší je čas stárnutí. Tento jev se vyskytuje u neuklidněných ocelí. Vliv tepelného zpracování se projevuje tím, že tepelným zpracováním se snižují hodnoty průměrných exponentů zpevnění, klesá i plošná anizotropie exponentu zpevnění. Pravděpodobně je to způsobeno zjemňováním struktury a jejím zrovnoměrňováním.

Podle velikosti materiálové hodnoty  $n$  jsou materiály zařazeny do jakostních skupin, které však nejsou definitivní. Musí se brát s určitou rezervou, neboť hodnoty  $n$  se zjišťovaly různými metodami.

Rozdělení československých ocelí podle jakosti ( ČSN 42 01 27 )

- |                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| 1. jakost - MT, ST | $n_s < 0,215$        |
| 2. jakost - HT     | $n_s = 0,215 - 0,25$ |
| 3. jakost - VT     | $n_s > 0,25$         |

kde MT ... mírně tažné oceli  
ST ... středně tažné oceli  
HT ... hlubokotažné oceli  
VT ... vysokotažné oceli

Obecně lze toto rozdělení napsat :

1. nízká hlubokotažnost
2. dobrá hlubokotažnost
3. vynikající hlubokotažnost

### 3.5 Exponent zpevnění a mezní stupeň tažení

Exponent zpevnění se jako kritérium tvářitelnosti nemusí vztahovat jen na hluboké tažení. Může se použít jako všeobecné kritérium ve všech případech tváření za studena, kde určujícím faktorem je tahové namáhání. Význam exponentu jako kritéria tvářitelnosti názorně ilustruje diagram sestrojený Keelerem ( obr. 6 ).

Mezní stupeň deformace při tažení ocelových výtažků ( křivka 1 ) je vyjádřený stupněm tažení

$$K = \frac{D}{d}$$

/25/

kde d ... průměr výtažku

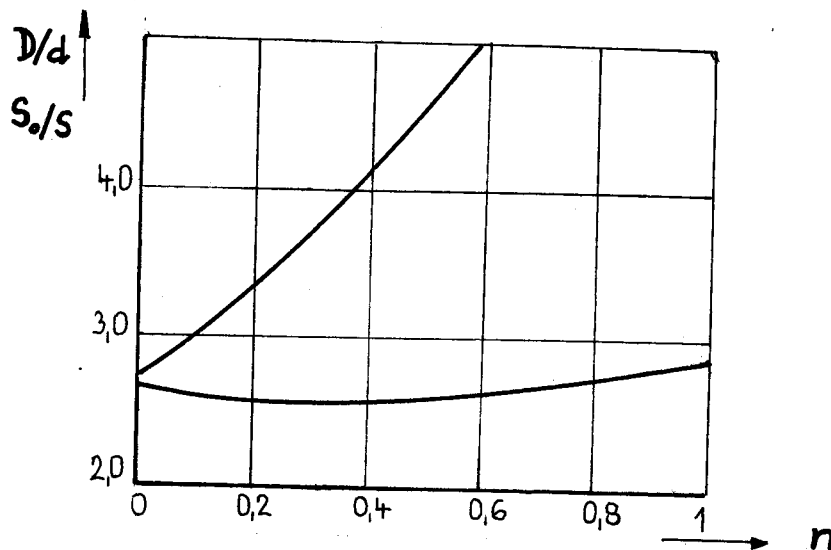
D ... průměr výchozího nástřihu.

Při tažení drátu ( křivka 2 ) je mezní stupeň deformace vyjádřený stupněm redukce

$$K_1 = \frac{S_0}{S}$$

/26/

kde  $S_0$  ... výchozí průřez  
 $S$  .... konečný průřez.



Obr. 6. Závislost mezního stupně přetvoření na exponentu zpevnění

Z diagramu vyplývá, že stupeň tažení při hlubokém tažení válcových výtažků s plochým dnem jen málo koresponduje s exponentem zpevnění. Naopak při růstu exponentu  $n$  od nuly stupeň tažení klesá. Významná je též analýza vlivu hodnoty  $n$  při tažení drátu ( křivka 2 ). Je vidět, že s rostoucí hodnotou  $n$  prudce stoupá mezní deformace vyjádřená stupněm redukce. Tato skutečnost má praktický význam v tom, že exponent zpevnění je kritérium tvářitelnosti v těch případech, kdy při tváření jde o tahové namáhání. Keelerova analýza vlivu exponentu zpevnění na tvářitelnost má vliv i na konstrukci tažných nástrojů pro válcové výtažky s plochým dnem.

#### 4. SOUVISLOST MATERIÁLOVÉ HODNOTY $n$ SE VZTAHY PRO VYJÁDŘENÍ MEZNÍCH KŘIVEK VELKÝCH PLASTICKÝCH PŘETVOŘENÍ

Při tažení nepravidelných výlisků dochází k nepravidelnému rozložení deformace. V důsledku toho nastává výrazné ztenčení materiálu v některých místech. Velkým ztenčením může dojít ke ztrátě stability tvářecího procesu. Jestliže chceme zabránit ztrátě stability tvářecího procesu v oblasti velkých plastických přetvoření, musíme znát velikost mezních přetvoření, kterých je možné dosáhnout při daném stavu napjatosti a materiálu. Dojde - li k překročení uvedených mezních hodnot přetvoření nastane místní ztenčení materiálu a porušení výlisku.

Pokud nebudeme uvažovat anizotropii materiálu, lze říci, že jako jediná materiálová charakteristika, která se objevuje ve vztazích pro vyjádření mezních hodnot přetvoření je právě exponent deformačního zpevnění  $n$ .

##### 4.1 Ztráty stability tvářecího procesu

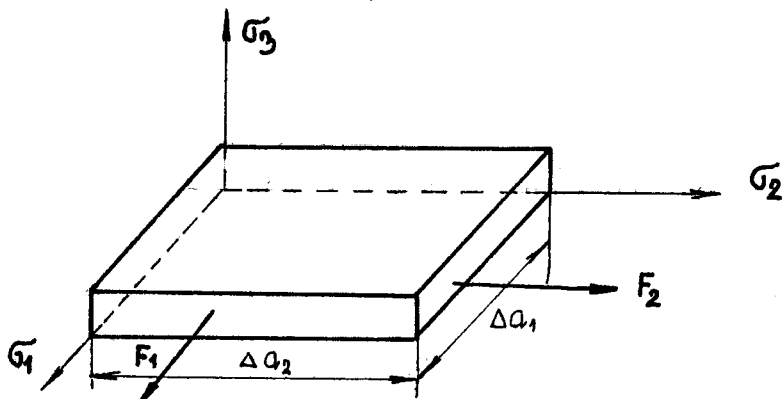
V procesu tažení výlisků nepravidelných tvarů může dojít ke třem typům ztrát stability tvářecího procesu. Pokud dojde ke ztrátě stability, proces tváření se stává nekontrolovatelným.

První ztráta stability nastává při dosažení meze pevnosti a má za následek lom. Opravitelnost takových výlisků je velice špatná. Ke druhé ztrátě stability dochází v oblasti kluzové prodlevy. Způsobuje vady funkční i vzhledové, na povrchu se vytvoří vrásky, tzv. Lüdersovy čáry. Takový výlisek je možno přebrousit, ale toto přebroušení je spojeno s velkou pracností. V důsledku působení tlakových napětí v rovině plechu v oblasti příruby dochází ke třetímu typu ztráty stability, při které vzniká nebezpečí zvlnění neboli vybočení plechu.



#### 4.2.2 Mezní hodnoty přetvoření

V roce 1958 Tomlenov formuloval obecnou definici mezních přetvoření při tažení. Její vysvětlení lze provést s použitím obrázku 7.



Obr. 7. Hlavní normálová napětí působící na elementární plošku

Při odvozování vztahu pro mezní hodnoty přetvoření se předpokládá : a/ izotropní materiál

b/ rovinný stav napjatosti, který lze vyjádřit

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m_\sigma : 0$$

$$m_\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

/27/

kde  $m_\sigma$  charakterizuje stav napjatosti a lze jej stanovit z hodnot hlavních přetvoření v rovině plechu :

$$m_\sigma = \frac{2\varphi_2 + \varphi_1}{2\varphi_1 + \varphi_2}$$

/28/

$$c/ |\sigma_1| \geq |\sigma_2|$$

$$d/ m_\sigma \in \langle -1, 1 \rangle$$

Na sledovaný element působí síly

$$F_1 = \sigma_1 \cdot \Delta a_2 \cdot S \quad /29/$$

$$F_2 = \sigma_2 \cdot \Delta a_1 \cdot S \quad /30/$$

Proces tažení je možno považovat za stabilní tehdy, pokud platí :

$$dF_1 > 0 \quad /31/$$

$$dF_2 > 0 \quad /32/$$

Síly  $F_1$  a  $F_2$  se s rostoucím přetvořením zvětšují v důsledku zpevňování materiálu. Působením síly  $F_1$  dochází k deformaci elementu výtažku.

Dosazením vztahu /29/ do vztahu /31/ dostaneme

$$dF_1 = d\sigma_1 \cdot \Delta a_2 \cdot S + \sigma_1 \cdot d(\Delta a_2) \cdot S + \sigma_1 \cdot \Delta a_2 \cdot dS > 0$$

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} + \frac{d(\Delta a_2)}{\Delta a_2} + \frac{dS}{S} > 0 \quad /33/$$

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} > d\varphi_1 \quad /34/$$

$$\frac{d(\Delta a_2)}{\Delta a_2} = d\varphi_2 \quad /35/$$

$$\frac{dS}{S} = d\varphi_3 \quad /36/$$

Vztah /34/ přepíšeme pomocí intenzit. Z teorie plastického tečení [11] lze odvodit :

$$\sigma_i = \sigma_1 \cdot \sqrt{1 - m_\sigma + m_\sigma^2} \quad /37/$$

$$\varphi_1 = \frac{2 - m_\sigma}{2 \cdot \sqrt{1 - m_\sigma + m_\sigma^2}} \cdot \varphi_i = f_1(m_\sigma) \cdot \varphi_i \quad /38/$$

$$d\sigma_i > f_1(m\sigma) \cdot \varphi_i$$

$$\frac{d\sigma_i}{d\varphi_i} > f_1(m\sigma) \quad /39/$$

Vztah /39/ vyjadřuje podmínku stability procesu tažení. K dosažení mezní hodnoty přetvoření dojde v okamžiku, kdy tvářecí síla  $F_1$  působící na element výtažku ve směru hlavního napětí  $\sigma_1$  dosáhne maxima ( meze pevnosti ). Můžeme psát :

$$dF_1 = 0 \quad /40/$$

V takovém případě se proces stává při dalším tažení nekontrolovatelný a dochází ke ztrátě jeho stability. To znamená, že ve vztahu /39/ se objeví rovnost

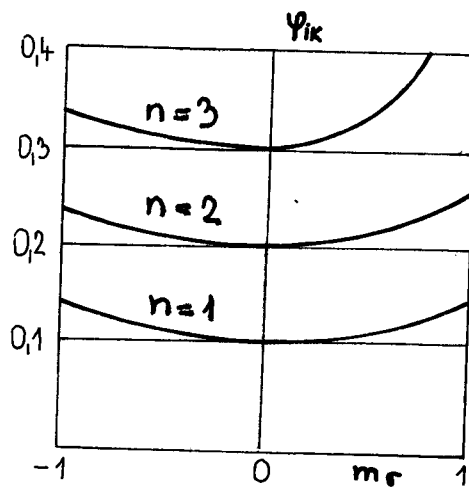
$$\left( \frac{d\sigma_i}{d\varphi_i} \right)_k = f_1(m\sigma) \cdot \sigma_{ik} \quad /41/$$

kde bod k je mezní bod na křivce zpevnění ( obr. 2 ).

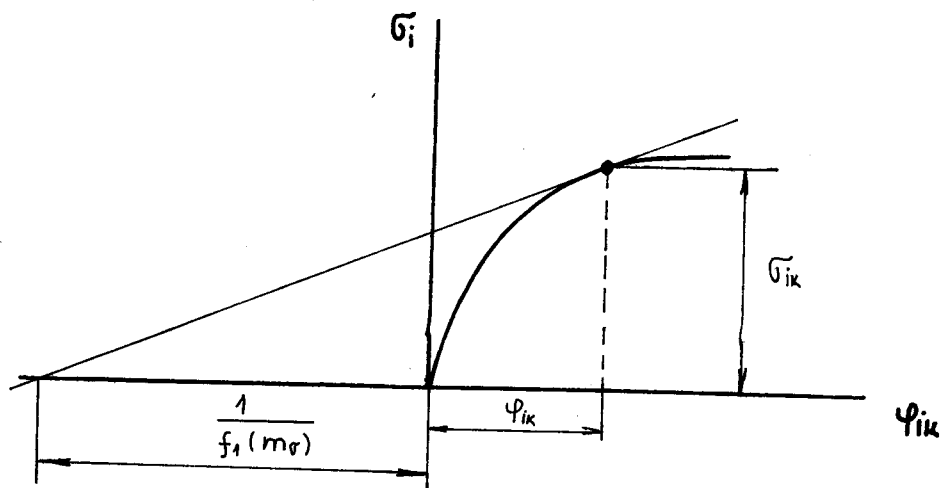
Dosazením vztahu /17/ do vztahu /41/ dostaneme

$$\varphi_{ik} = \frac{n}{f_1(m\sigma)} = \frac{2 \cdot \sqrt{1 - m\sigma + m\sigma^2}}{2 - m\sigma} \cdot n \quad /42/$$

Tento vztah představuje kritickou hodnotu přetvoření a lze jej graficky interpretovat a to buď v souřadnicích  $\sigma_i - \varphi_i$  ( obr. 8 ) nebo  $\varphi_{ik} - m\sigma$  ( obr. 9 ).



Obr. 8. Grafická interpretace vztahu /42/ v souřadnicích  $\psi_{ik} - m_r$



Obr. 9. Grafická interpretace vztahu /42/ v souřadnicích  $\sigma_i - \psi_{ik}$

Podmínka stability je v případě ztráty stability v blízkosti přidržovače nebo tažné hrany navíc omezená okrajovou podmínkou pro tok materiálu

$$d\varphi_2 = 0 \quad /43/$$

Dosažením vztahu /43/ do rovnice /33/ dostaneme

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} > -d\varphi_3 \quad /44/$$

$$- \varphi_3 = f_3(m_\sigma) \cdot \varphi_i = \frac{1 + m_\sigma}{2 \cdot \sqrt{1 - m_\sigma + m_\sigma^2}} \cdot \varphi_i \quad /45/$$

$$\frac{d \varphi_i}{d \sigma_i} > f_3(m_\sigma) \cdot d \varphi_i \quad /46/$$

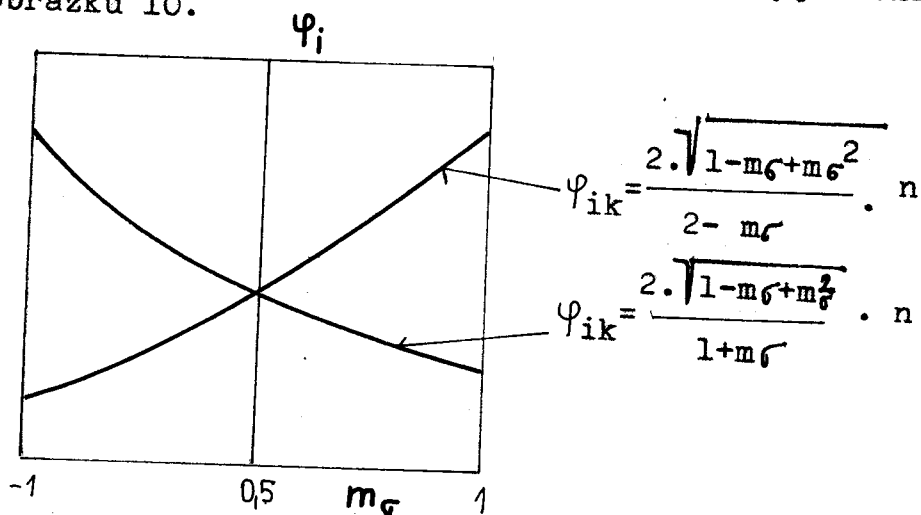
Podmínka stability má tvar

$$\left( \frac{d \sigma_i}{d \varphi_i} \right)_k = f_3(m_\sigma) \cdot \sigma_{ik} \quad /47/$$

Dosazením vztahu /17/ do vztahu /47/ získáme pro intenzitu kritického přetvoření vztah

$$\varphi_{ik} = \frac{2 \cdot \sqrt{1 - m_\sigma + m_\sigma^2}}{m_\sigma + 1} \cdot n \quad /48/$$

Vztahy /42/ a /48/ představují v grafickém vyjádření dvě větve křivky přetvoření mezních, toto vyjádření je na obrázku 10.



Obr. 10. Křivky mezních přetvoření v souřadnicích  $\varphi_{ik}-m$

Z praktického hlediska nás zajímají  $\psi_{1k}$ ,  $\psi_{2k}$ .

Z teorie plastického tečení lze odvodit, že platí

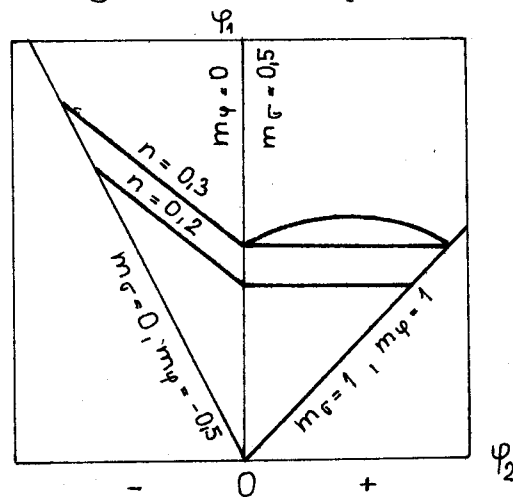
$$\psi_2 = \frac{2m_\sigma - 1}{2 \cdot \sqrt{1 - m_\sigma + m_\sigma^2}} \cdot \psi_i \quad / 49/$$

Po dosazení vztahu /42/ do rovnic /38/ a /49/ dostáváme pro hodnoty  $\psi_{1k}$  a  $\psi_{2k}$  výsledné vztahy

$$\psi_{1k} = n \quad /50/$$

$$\psi_{2k} = \frac{2m_\sigma - 1}{2 - m_\sigma} \cdot n \quad /51/$$

Vztahy pro  $\psi_1$  a  $\psi_2$  lze graficky znázornit a výsledkem je tzv. diagram mezních přetvoření ( obr. 11 ).



$$m_\sigma \in \langle 0, 1 \rangle$$

$$m_\psi \in \langle -0,5 ; 1 \rangle$$

Obr. 11. Diagram mezních přetvoření

$m_\psi$  charakterizuje stav přetvoření a obdobně jako pro  $m_\sigma$  platí

$$m_\psi = \frac{\psi_2}{\psi_1} = \frac{2m_\sigma - 1}{2 - m_\sigma} \quad / 52/$$

Diagram mezních přetvoření má opět dvě větve. V levé větvi dochází k lokální ztrátě stability. V případě, že uvažujeme anizotropii vlastností pro výpočet  $\psi_{ik}$ ,  $\psi_{1k}$ ,  $\psi_{2k}$  platí ( $\sigma > 0$ ,  $\tau_2 < 0$ ,  $\psi_2 < 0$ ) :

$$\psi_{1k} = \frac{1 + r_0 - m_\sigma \cdot r_0}{1 + m_\sigma \cdot \frac{r_0}{r_{90}}} \cdot n \quad /53/$$

$$\psi_{2k} = \frac{\left( r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \cdot m_\sigma \cdot r_0}{1 + m_\sigma \cdot \frac{r_0}{r_{90}}} \cdot n \quad /54/$$

$$\psi_{ik} = \frac{\left\{ \frac{2}{3} \left( 1 + r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \cdot \left[ (1 + r_0) - 2r_0 m_\sigma + \left( r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \cdot m_\sigma^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}}{1 + m_\sigma \cdot \frac{r_0}{r_{90}}} \cdot n \quad /55/$$

V pravé větvi můžeme uvažovat lokální nebo difuzní ztrátu stability. Difuzní ztráta způsobuje to, že úsečky jsou ve skutečnosti prohnuté nahoru, dále se difuzní ztráta projevuje zmatováním povrchu a změnou teploty.

V pravé větvi můžeme mezní hodnoty přetvoření překračovat, neboť zde existují takové stavy napjatosti, které brzdí místní zeslabování. Pro difuzní ztrátu stability platí vztahy ( libovolná napjatost a  $\psi_2 \lesseqgtr 0$  ) :

$$\psi_{ik} = \frac{\left[ \frac{2}{3} \left( 1 + r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ (1 + r_0) - 2r_0 m_\sigma + \left( r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \cdot m_\sigma^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{\left[ (1 + r_0) - r_0 m_\sigma \right]^2 + \left[ \left( r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \cdot m_\sigma \cdot r_0 \right]^2 \cdot m} \cdot n \quad /56/$$

$$\varphi_{1k} = \frac{1 + r_0 - r_0 \cdot m\sigma}{\left\{ \frac{2}{3} \left( 1 + r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \cdot \left[ (1 + r_0) - 2r_0 m\sigma + \left( r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \cdot m^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \cdot \varphi_{ik} \quad /57/$$

$$\varphi_{2k} = \frac{\left( r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \cdot m\sigma - r_0}{\left\{ \frac{2}{3} \left( 1 + r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \cdot \left[ (1 + r_0) - 2r_0 m\sigma + \left( r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \cdot m^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \cdot \varphi_{ik} \quad /58/$$

Pro lokální ztrátu stability platí vztahy ( $\sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0, \varphi_2 > 0$ )

$$\varphi_{1k} = n \quad /59/$$

$$\varphi_{2k} = \frac{\left( r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \cdot m\sigma - r_0}{1 + r_0 - m\sigma} \cdot n \quad /60/$$

$$\varphi_{ik} = \frac{\frac{2}{3} (1 + r_0) + \frac{r_0}{r_{90}} \left[ (1 + r_0) - 2r_0 m\sigma + \left( r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \cdot m^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{1 + r_0 - m\sigma} \cdot n \quad /61/$$

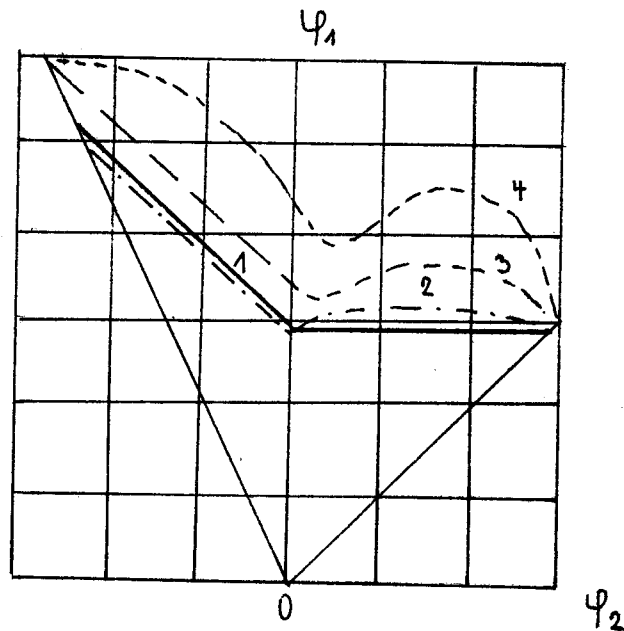
Na obrázku 12 jsou diagramy mezních přetvoření určené různými autory.

Použití jednotlivých metod stanovení mezních přetvoření závisí na funkci, kterou bude výtažek plnit.

Křivky stanovili :

- 1 ...Tomlenov
- 2 ...Ruzanov
- 3 ...Goodwin - Keeler
- 4 ...experimentálně určené křivky (podle kriteria lomu)





Obr. 12. Diagramy mezních přetvoření

5. METODY URČOVÁNÍ MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY  $n$  VE VZTAHU K HODNOCENÍ HLUBOKOTAŽNOSTI OCELOVÝCH PLECHŮ ZKOUŠKOU TAHEM

Ke zjišťování exponentu zpevnění z hlediska tažení plechů se využívá zkouška tahem. Dosahované výsledky exponentu zpevnění lze jen těžko porovnávat, neboť různí autoři používají různou metodiku. Z toho vyplývá, že je důležité řešit otázku sjednocení metodiky měření exponentu zpevnění, aby výsledky různých pracovišť mohly být exaktněji využívány. Obecně můžeme říci, že existují dvě metody určování materiálové charakteristiky :

- I. nepřímá metoda vycházející ze vztahu  $\sigma_i = C \cdot \varphi_i^n$
- II. přímá metoda vycházející ze vztahu  $\varphi_k = n_k$

## 5.1 Nepřímá metoda určování materiálové charakteristiky n

Ke získání křivky zpevnění daného materiálu se používají dvě metody :

- 1/ dvojbodová metoda - exponent  $n_{NW}$  (Nelson, Winlock)
- 2/ metoda FC (" full curve ") - exponent  $n_{FC}$

Hodnoty  $\sigma_i, \varphi_i$  jsou obvykle zjišťovány přerušovanou zkouškou tahem. Aproximace křivek zpevnění je nejčastěji prováděna přímkou v logaritmických souřadnicích. Pro stanovení konstanty C a hodnoty n se užívá

- a/ grafická metoda
- b/ graficko - početní metoda
- c/ matematická metoda.

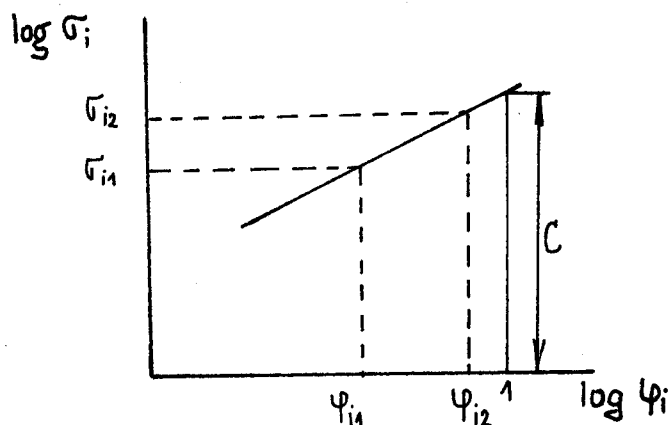
### 5.1.1 Dvojbodová metoda

Dvojbodová metoda předpokládá, že k definování vztahu  $\sigma_i - \varphi_i$  úplně stačí dva body křivky zpevnění. Je to metoda, kdy přerušovanou zkouškou tahem získáme řadu bodů křivky  $\sigma_i - \varphi_i$ . Závislost aproximujeme a na aproximační přímce zvolíme dva body. Pro tyto dva body odečteme z grafu hodnoty  $\sigma$  a  $\varphi$  a vypočteme n a C podle vztahů :

$$n = \frac{\log \sigma_{i2} - \log \sigma_{i1}}{\log \varphi_{i2} - \log \varphi_{i1}} \quad /62/$$

$$\log C = n. ( \log 100 - \log \varphi_{i1} ) + \log \sigma_{i1} \quad /63/$$

Tento způsob vyhodnocení se nazývá graficko - početní. Na obrázku 13 je tato metoda znázorněna.



Obr. 13. Grafické znázornění dvojbodové metody

Hlavní nevýhodou grafické metody je nepřesnost, která se projevuje nejen při odečítání hodnot z diagramu závislosti  $\log \sigma_i - \log \psi_i$  potřebných pro výpočet exponentu zpevnění, ale také už při samotné konstrukci diagramu  $\log \sigma_i - \log \psi_i$ . Hodnoty exponentů stanovené grafickou metodou jsou nepřesné, pouze dva body závislosti  $\sigma_i - \psi_i$  nemohou dát obraz o skutečné průměrné hodnotě exponentu zpevnění zkoumaného materiálu. Dvojbodovou metodu je možno použít jen pro běžnou kontrolu výroby, ale na exaktní měření je třeba použít metodu FC, neboť hodnoty  $n_{FC}$  exaktněji vystihují závislost  $\sigma_i - \psi_i$ .

#### 5.1.2 Metoda FC ("full curve")

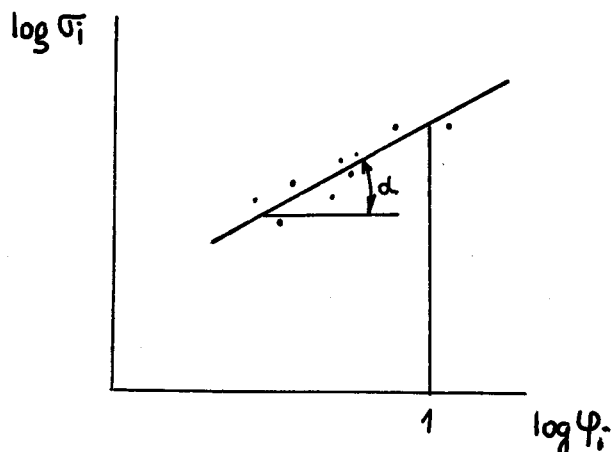
Tato metoda opět vychází z přerušované zkoušky tahem. Měří se jednotlivé hodnoty  $\sigma_i, \psi_i$  pravidelně rozložené v intervalu  $\sigma_{kt} - \sigma_{pt}$ . Získáme exponent zpevnění  $n_{FC}$ .

Vyhodnocování :

a/ grafické

Zkouškou tahem získáme řadu bodů v závislosti  $\sigma_i - \psi_i$ .

Body vyneseme v logaritmických souřadnicích a proložíme jimi přímkou ( obr. 14 ).



Obr. 14. Grafické znázornění metody FC

Velikost materiálové konstanty  $C$  odečteme při  $\varphi_i = 1$  a odměříme úhel  $\alpha$ , pomocí něhož ze vztahu  $n_{FC} = \text{tg } \alpha$  vypočteme hodnotu exponentu zpevnění  $n_{FC}$ .

b/ matematické

Matematická metoda umožňuje určení hodnoty  $n$  přímo z výsledků měření. Vychází z metody nejmenších čtverců aplikované na rovnici /18/, která vyjadřuje přímku. Tuto přímku nahradíme obecnou rovnicí přímky

$$y = A \cdot x + B \quad /64/$$

$$\text{kde bude platit : } y = \log \sigma_i$$

$$x = \log \varphi_i$$

$$A = n \quad /65/$$

$$B = \log C$$

V daném případě jsou proměnnými veličinami  $x$  a  $y$ .

Hodnoty  $A$  a  $B$  jsou hledané parametry.

Podle následujících vztahů stanovíme průměrné hodnoty a kvadráty proměnných  $x$  a  $y$ :

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k}$$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{k}$$

$$\overline{x_i y_i} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i y_i}{k} \quad /66/$$

$$\overline{x_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i^2}{k} \quad \overline{x_i}^2 = (\overline{x_i})^2 \quad /66/$$

Hledané parametry potom vyjádříme ze vztahů

$$A = n = \frac{\overline{x_i y_i} - \overline{x_i} \overline{y_i}}{\overline{x_i^2} - \overline{x_i}^2} \quad /67/$$

$$B = \log C = \frac{\overline{x_i^2 y_i} - \overline{x_i} \cdot \overline{y_i} \cdot \overline{x_i}}{\overline{x_i^2} - \overline{x_i}^2} \quad /68/$$

Kde  $\overline{x_i}$  je střední hodnota logaritmů všech měřených deformací.

$\overline{x_i y_i}$  - střední hodnota ze součinu logaritmů všech měřených deformací a napětí

$\overline{x_i}^2$  - čtverec střední hodnoty logaritmů všech měřených deformací

$\overline{x_i^2}$  - střední hodnota ze čtverců hodnot logaritmů všech měřených deformací

$\overline{y_i}$  - střední hodnota logaritmů všech měřených napětí

$\overline{x_i} \overline{y_i}$  - součin středních hodnot logaritmů všech měřených deformací a napětí .

i	$\sigma_i$	$y_i = \log \sigma_i$	$\varphi_i$	$x_i = \log \varphi_i$	$x_i y_i$	$x_i^2$
1	$\sigma_1$	$\log \sigma_1$	1	$\log \varphi_1$	$\log \sigma_1 \cdot \log \varphi_1$	$(\log \varphi_1)^2$
:						
k	$\sigma_k$	$\log \sigma_k$	k	$\log \varphi_k$	$\log \sigma_k \cdot \log \varphi_k$	$(\log \varphi_k)^2$
$\Sigma$		$\Sigma$		$\Sigma$	$\Sigma$	$\Sigma$

Obr. 15. Vzorová tabulka pro výpočet exponentu zpevnění

Výhodou matematické metody je to, že odpadá grafické zpracování a aplikací počítače pak můžeme dojít ke snížení pracnosti. Vyloučení subjektivních chyb při aproximaci a podstatné snížení pracnosti při graficko - početním zpracování rovněž může zajistit použití počítače.

Na VŠST v Liberci byla aplikace linearizační metody prováděna s využitím počítače Hawlet Packrd.

Vztah /18/ je upraven

$$\ln \sigma = \ln C + n \cdot \ln \varphi \quad /69/$$

Hledáme aproximační funkci pro proměnné C a n :

$$\bar{S} = \sum_i (\ln \sigma - \ln C - n \cdot \ln \varphi)^2 \quad /70/$$

$$\text{Pro } \frac{\partial \bar{S}}{\partial \ln C} = 0 \quad /71/$$

dostaneme

$$\ln C \sum_i 1 + n \sum_i \ln \varphi = \sum_i \ln \sigma \quad /72/$$

$$\text{a pro } \frac{\partial \bar{S}}{\partial n} = 0 \quad /73/$$

dostaneme

$$\ln C \sum_i \ln \varphi + n \sum_i (\ln \varphi)^2 = \sum_i \ln \sigma \ln \varphi \quad /74/$$

Zavedeme označení

$$\begin{aligned} \sum_i 1 &= U_0 & \sum_i \ln \sigma &= V_0 \\ \sum_i \ln \varphi &= U_1 & \sum_i \ln \sigma \cdot \ln \varphi &= V_1 \\ \sum_i (\ln \varphi)^2 &= U_2 & & \end{aligned} \quad /75/$$

a dosazením těchto vztahů do vztahu /70/ a /72/ dostaneme

$$\ln C U_0 + n U_1 = V_0 \quad /76/$$

$$\ln C U_1 + n U_2 = V_1 \quad /77/$$

Po úpravě

$$\ln C = \frac{V_0 \cdot U_2 - V_1 \cdot U_1}{U_0 \cdot U_2 - U_1^2} \quad /78/$$

$$n = \frac{V_1 \cdot U_0 - V_0 \cdot U_1}{U_0 \cdot U_2 - U_1^2} \quad /79/$$

Použití počítače umožňuje i přímé stanovení konstanty C a hodnoty n bez použití linearizace.

## 6.2 Přímá metoda určování materiálové charakteristiky n

Tato metoda lze provádět dvěma způsoby, které závisí na tom, jak budeme uskutečňovat tahovou zkoušku.

Je to :

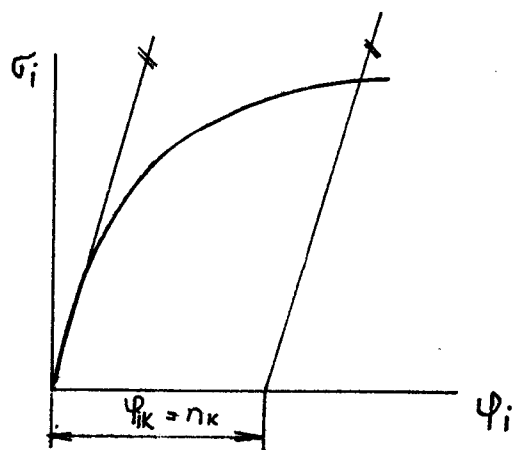
- 1/ provedení tahové zkoušky do porušení vzorku ( metoda dle Ruzanova )
- 2/ přerušeni tahové zkoušky na mezi pevnosti

### 5.2.1 Metoda dle Ruzanova

Vzhledem k tomu, že princip této metody vychází přímo ze vztahu /42/ se tato metoda nazývá přímá. Předpokládá provedení zkoušky jednoosým tahem do porušení vzorku. Pro jednoosý stav napjatosti platí  $\psi_i = \psi_1 = \psi$ , potom vztah /42/ má po dosazení za  $m_6 = 0$  tvar

$$\psi_{ik} = n_k \quad /80/$$

Hodnota n představuje v tomto případě maximální rovnoměrné přetvoření odpovídající mezi pevnosti zkoušeného materiálu ( obr. 16 ).



Obr. 16. Určování  $n$  metodou dle Ruzanova

$$\psi_{ik} = \log \frac{L}{L_0} = n_k$$

Odměřování délky  $L$  se musí provádět v oblasti neovlivněné krčkem vzniklým při tahové zkoušce a v oblasti neovlivněné upevněním čelistí.

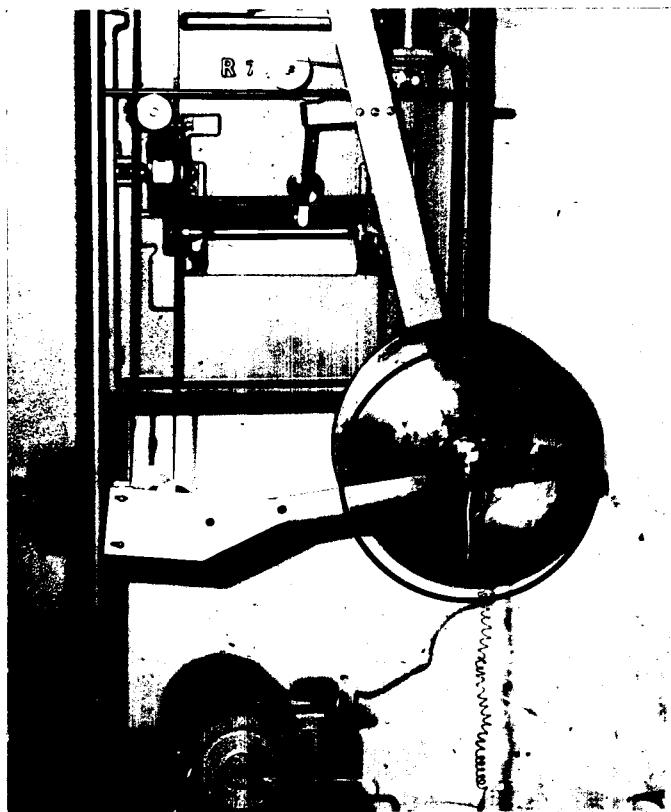
### 5.2.2 Metoda provedená přerušením tahové zkoušky na mezi pevnosti

Metoda vychází z předpokladu, že na úseku dostatečně vzdáleném od upínacích hlav je maximální rovnoměrné přetvoření odpovídající mezi pevnosti daného materiálu. Zastavení tahové zkoušky se provede na základě poklesu zatěžovací síly trhacího stroje. Na VŠST v Liberci pro přerušování tahové zkoušky bylo využito speciální zařízení, jež umožňuje přerušování tahové zkoušky těsně za mezí pevnosti, a to na principu minimálního registrovaného poklesu zatěžovací síly.

Zařízení je nutno považovat pouze za laboratorní, jeho citlivost je však velmi dobrá. Lze jím registrovat pokles o  $F = 3 - 7 \cdot 10^2$  N, při zatěžovací síle v rozsahu  $F = 3700 - 4300$  N. Celkový pohled na přídatné zařízení je



umístěné na trhacím stroji je na obr. 17.



Obr. 17. Přídavné zařízení umožňující přerušeni tahové zkoušky při minimálním poklesu zátěžné síly

### 5.3 Provedení tahové zkoušky na dvoustupňové tyči

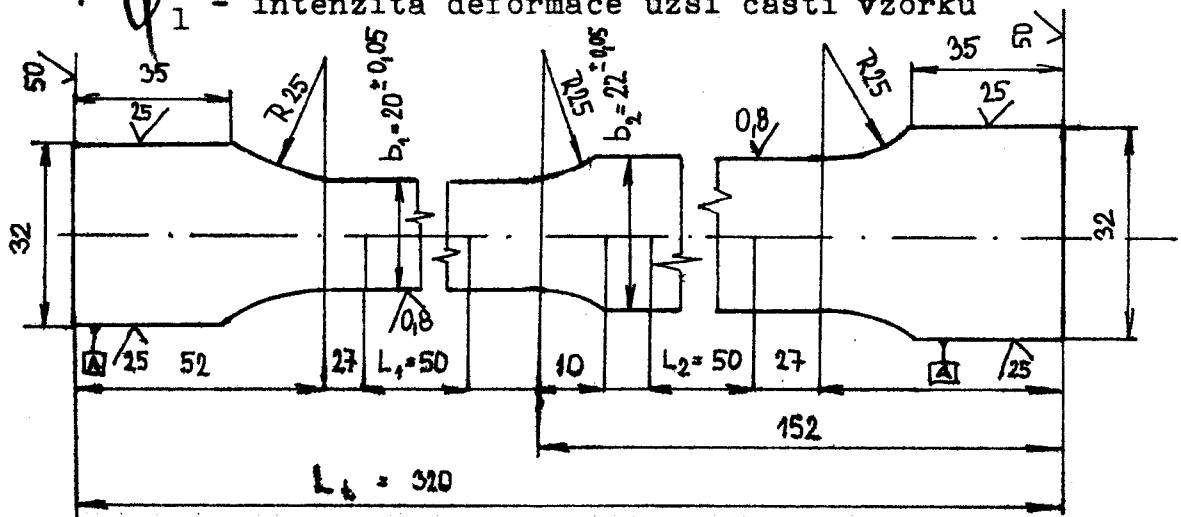
Dvoustupňový tvar zkušební tyče ( obr. 18 ) umožňuje vypočítat exponent zpevnění na základě zákona stálosti objemu při plastické deformaci užší a širší části zkušební tyče při stejném osovém zatížení bez potřeby jeho zjištění. Při této metodě vycházíme opět ze vztahu /17/. Pro daný vzorek vyplývá zvláštní způsob hodnocení. Pro užší část vzorku platí :

$$\frac{F}{S_1} = c \cdot \psi_1^n$$

/81/

kde  $F$  je síla, kterou byl vzorek zatížen

$S_1$  - průřez užší části vzorku po zatížení silou  $F$   
 $\varphi_1$  - intenzita deformace užší části vzorku



Obr. 18. Dvoustupňový tvar zkušební vzorku

Pro širší část vzorku platí :

$$\frac{F}{S_2} = c \cdot \varphi_2^n \quad /82/$$

kde  $S_2$  je průřez širší části vzorku po zatížení silou  $F$   
 $\varphi_2$  - intenzita deformace širší části vzorku

Po úpravě

$$\frac{S_2}{S_1} = \left( \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \right)^n \quad /83/$$

Po zlogaritmování a po úpravě získáme výsledný vztah

$$n = \frac{\log \frac{S_2}{S_1}}{\log \frac{\varphi_1}{\varphi_2}} \quad /84/$$

Na základě zachování objemu lze tento vztah vyjádřit pomocí délek.

Pak dostáváme vztah

$$\begin{aligned} S_2 &= b'_2 \cdot L_1 \\ S_1 &= b'_1 \cdot L_2 \end{aligned} \quad /85/$$

$$\psi_1 = \ln \frac{L_1}{L'_1} \quad /86/$$

$$\psi_2 = \ln \frac{L_2}{L'_2} \quad /87/$$

Po dosazení vztahů /85/, /86/ a /87/ do vztahu /84/ získáme výsledný vztah

$$n = \frac{\log \frac{b'_2 \cdot L_1}{b'_1 \cdot L_2}}{\log \frac{L_1}{L'_1} \cdot \log \frac{L_2}{L'_2}} \quad /88/$$

## 6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Úkolem experimentální části je :

- a/ určování materiálové charakteristiky n metodou nejmenších čtverců, určování maximálního rovnoměrného přetvoření  $\varphi_k$  odpovídajícího mezi pevnosti ze závislosti  $F-\Delta L$  a maximálního rovnoměrného přetvoření proměřováním vzorků  $\varphi_u$
- b/ ověřování vlivu n,  $\varphi_k$  a  $\varphi_u$  na mezní křivky přetvoření určené výpočtem a porovnání vypočtených hodnot přetvoření s experimentálně zjištěnými hodnotami
- c/ závěry z hlediska určování mezních hodnot přetvoření

### 6.1 Charakteristika použitého materiálu

Plech 11 305.21, označovaný KOHAL 20 EXTRA .

ocel : 11305

skupina ocelí : pro hluboké tažení

chemické složení : 0,07 % C (max)

0,40 % Mn (max)

0,025 % P (max)

0,025 % S (max)

0,025 % Al (min)

tavba : č. 58 220

svitek : č. 33 59 16

provedení : válcovaný za studena

stav : rekrytalizačně žiháno

stupeň přetvoření : lehce převálcovaný za studena

tloušťka : 0,71 mm

tvar vzorku : zkušební tyčinka ( obr. 19 )

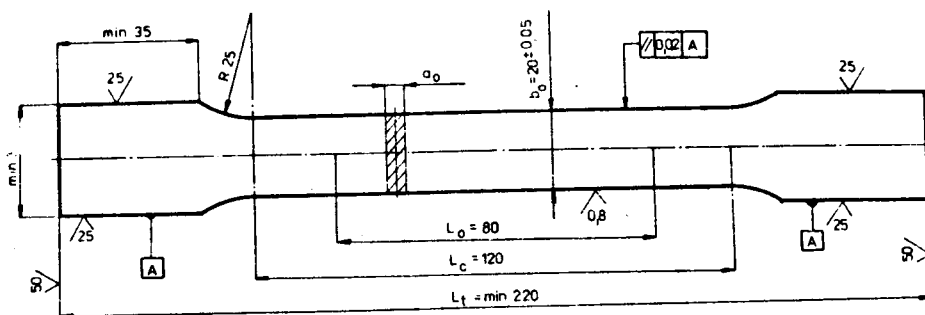
použití : plech je opakovaně dodáván do AZNP Mladá Boleslav na lisování dílů karosérií

## 6.2 Metodika provádění experimentu

### 6.2.1 Výběr zkušebních vzorků

Zkušební tyče byly vyrobeny frézováním a broušením při intenzivním chlazení, které má zabránit místnímu zpevnění povrchu vzorku od řezného nástroje. Pro jejich výrobu bylo použito plechu z jedné tavby, jednoho svitku a jedné tabule. Toto vyjadřuje první dvojčíslí vzorků - 92. Za dvojčíslím je označení směru odebrání a dále pořadové číslo vzorku.

Zkušební vzorky byly odebrány ve třech směrech vzhledem ke směru válcování ( A - směr rovnoběžný se směrem válcování, B - směr kolmý a C - směr pod úhlem  $45^\circ$  ku směru válcování ). Pro každý směr byly odebrány minimálně tři vzorky pro určení materiálové charakteristiky  $n$  a další vzorky pro každý směr pro určení součinitele normálové anizotropie  $r$  a základní charakteristiky materiálu. Hodnota  $n$  i  $r$  je závislá na tvaru zkušební tyče. Proto z hlediska dosažení porovnatelných výsledků musí být předepsaná a používaná jednotná zkušební tyč. Podle ČSN 42 04 64 byla navržena a použita zkušební tyč na obr. 19 ), přičemž norma uvažuje tloušťku plechů v rozmezí 0,5 - 3 mm.

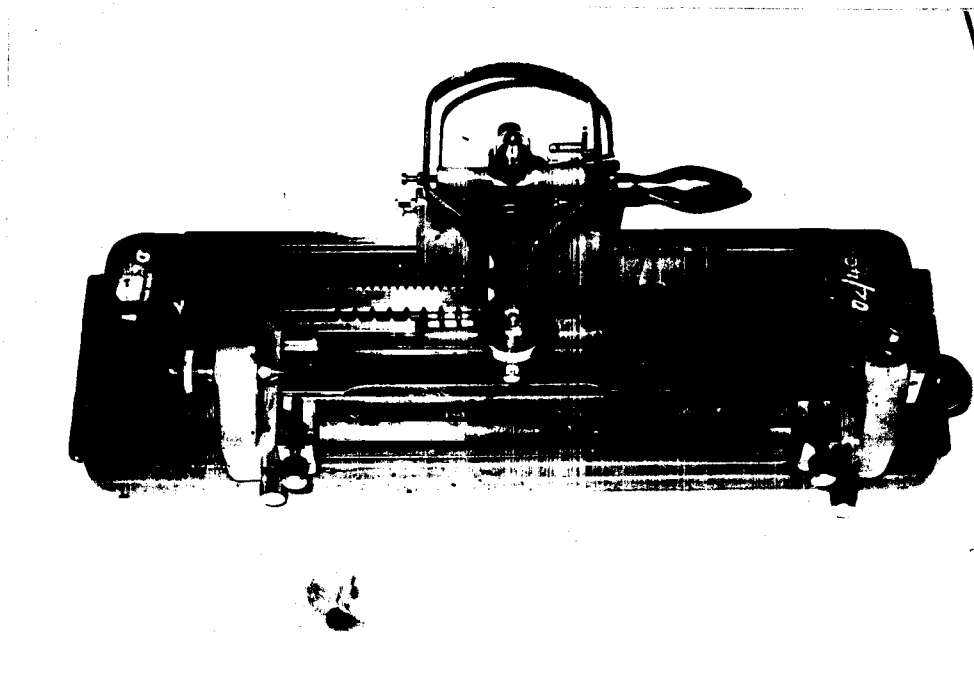


$L_t$	= 220 mm		
$L_c$	= 120 mm		
$L_o$	= 80 mm	→ okamžitá deformácia $\epsilon$	$L_k$
$b_o$	= 20 $\pm$ 0,05 mm	→ okamžitá deformácia $\epsilon$	$b_k$
$a_o$	= 0,5 - 3 mm		

Obr. 19. Zkušební tyčka

### 6.2.2 Proměřování vzorků

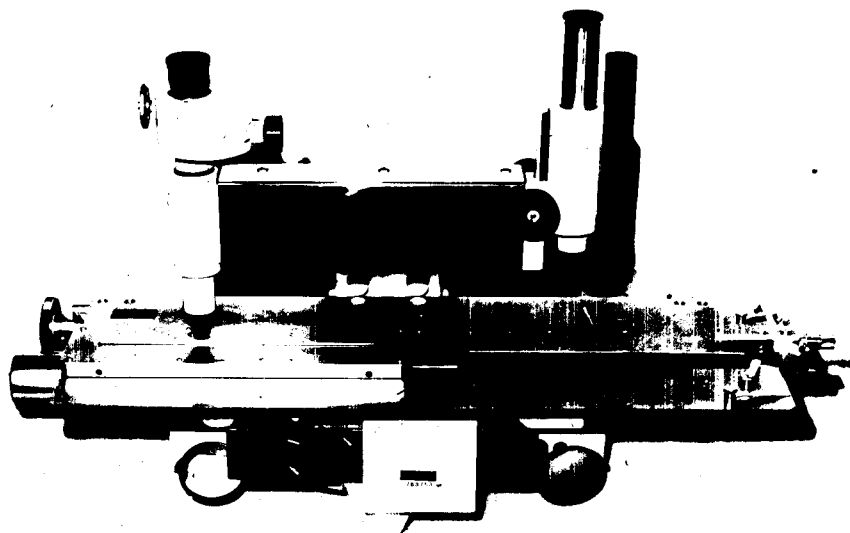
Vzorky byly orýsovány po 5 mm v rozsahu celé pracovní délky  $L_c = 120\text{mm}$ . K orýsování jsme použili přípravek na orýsování ( obr. 20 ).



Obr. 20. Přípravek na orýsování zkušebních vzorků

Byla proměřena délka pracovní části vzorku po 5 mm na Abbého délkoměru ( obr. 21 ) s přesností 0,0001 mm. Šířka vzorku se měří minimálně ve třech místech pracovní délky ( dvakrát na okraji vzorku a jednou uprostřed ). Za směrodatnou šířku se považuje aritmetický průměr ze všech tří měření. Pomocí indikátorových hodinek jsme šířku změřili s přesností 0,01 mm.

Tloušťka měřená opět ve třech místech měrné délky byla změřená v ose vzorku mikrometrem s přesností 0,01 mm. Za směrodatnou hodnotu považujeme aritmetický průměr ze všech tří naměřených hodnot.



Obr. 21. Abbého délkoměr

### 6.2.3 Postup experimentu

Na trhacím stroji FPZ 100 R ( obr. 22A) jsme provedli tahovou zkoušku dle ČSN 42 03 10 pro určení charakteristiky materiálu na jednom vzorku od každého směru. Podstata tahové zkoušky spočívá v natahování zkušební tyče předepsanou rychlostí, zpravidla až do jejího přetržení, a zaznamenání charakteristiky mechanických hodnot zkoušeného materiálu.

Mezi základní charakteristiky mechanických hodnot patří mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a kontrakce. Norma určuje označení mechanických vlastností a definuje přesně dané veličiny.

Jmenovité smluvní napětí je dáno vztahem

$$R = \frac{F}{S_0}$$

/89/

Pokud materiál vykazuje výraznou mez kluzu  $R_e$ , stanovuje se pouze  $R_e$ , eventuelně horní mez kluzu  $R_{eH}$  a dolní mez kluzu  $R_{eL}$ . Nevykazuje - li materiál výraznou mez kluzu stanovuje se tzv. smluvní mez kluzu určená z trvalé deformace pod zatížením  $R_p$  nebo se určuje smluvní mez kluzu z celkové deformace pod zatížením.

Pevnost v tahu je definována vztahem

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad /90/$$

kde  $F_m$  je zatížení předcházející přetržení  
 $S_0$  - počáteční průřez vzorku

Tažnost je definovaná jako poměr prodloužení měřené délky zkušební tyče po přetržení a počáteční měřené délky

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad \%/ \quad /91/$$

U značky pro tažnost se píše číselný index podle počáteční délky zkušební tyče :

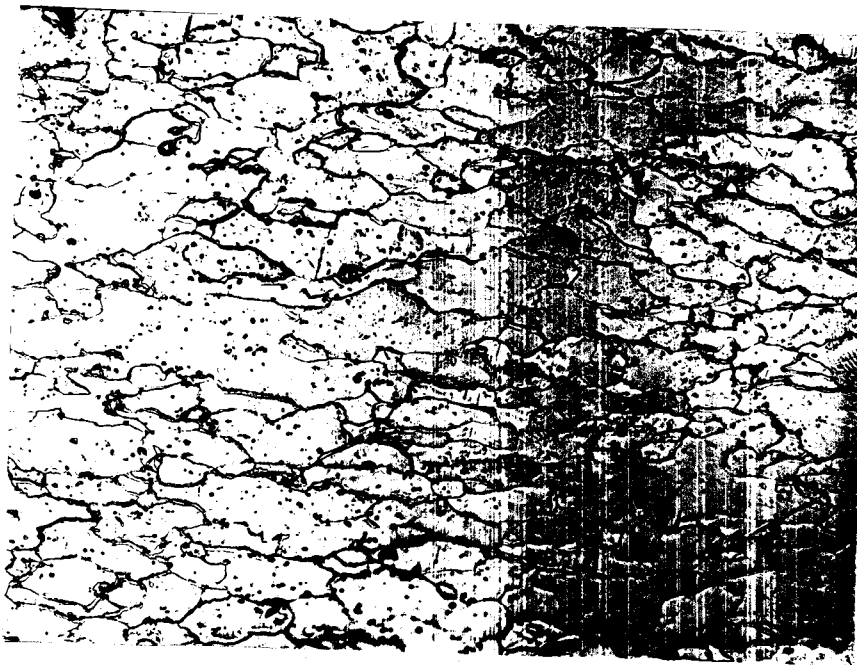
$A_5$  ... krátká tyč  $L_0 = 50$  mm  
 $A_{10}$  .. dlouhá tyč  $L_0 = 100$  mm .

Tahový diagram je v příloze 1 a podle vztahů /89/, /90/ a /91/ vypočtené mechanické hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1.

Dále byla provedena tahová zkouška dle ČSN 42 04 35 na vzorcích od každého směru pro určení součinitele normálové anizotropie  $r$ . Po skončení tahové zkoušky byla u vzorků opět proměřena délka a šířka. Dosazením do vztahu /4/ jsme získali směrové součinitele normálové anizotropie a určili aritmetický průměr směrových součinitelů normálové anizotropie, a dále užitím vztahu /5/ součinitel  $r_m$ .  
V tab. 2 jsou uvedeny hodnoty průměrných směrových součinitelů a výsledný průměrný součinitel normálové anizotropie.



Na ostatních vzorcích byla provedena tahová zkouška ukončená na mezi pevnosti. Záznam závislosti  $F - \Delta L$  v měřítku 20 : 1 využijeme pro stanovení materiálové charakteristiky  $n$  a maximálního rovnoměrného přetvoření  $k$ . Ze vzorku byla dále zjištěna charakteristická struktura ( obr. 22 ) a ( obr. 23 ).



Obr. 22. Struktura vzorku ve směru válcování

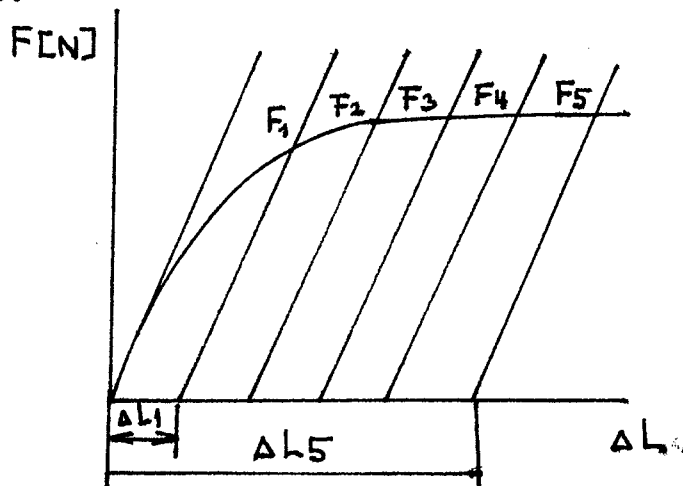


Obr. 23. Struktura vzorku kolmá na směr válcování

### 6.3 Zpracování grafické závislosti F - ΔL

#### 6.3.1 Výpočet exponentu deformačního zpevnění n užitím metody nejmenších čtverců

Metodika určování hodnoty n vychází ze vztahu / 17 /. Interval  $R_e - R_m$  v závislosti F - ΔL rozdělíme minimálně na 5 úseků ( obr. 24 ). Hodnoty F a ΔL odečítáme s přesností na 1%.



Obr. 24. Princip určování hodnoty n metodou nejmenších čtverců

Postup výpočtu :

$$S_0 = a_0 \cdot b_0 \quad /92/$$

$$\psi = \ln \frac{L}{L_0}$$

$$\sigma = \frac{F \cdot L}{L_0 \cdot S_0}$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \text{deformační}$$

/93/

Hodnotu n vypočteme využitím vztahů /65/ až /68/.

Průměrný exponent zpevnění určíme ze vztahu /23/.

Pro výpočet materiálové konstanty C využijeme také vztahy /65/ až /68/.

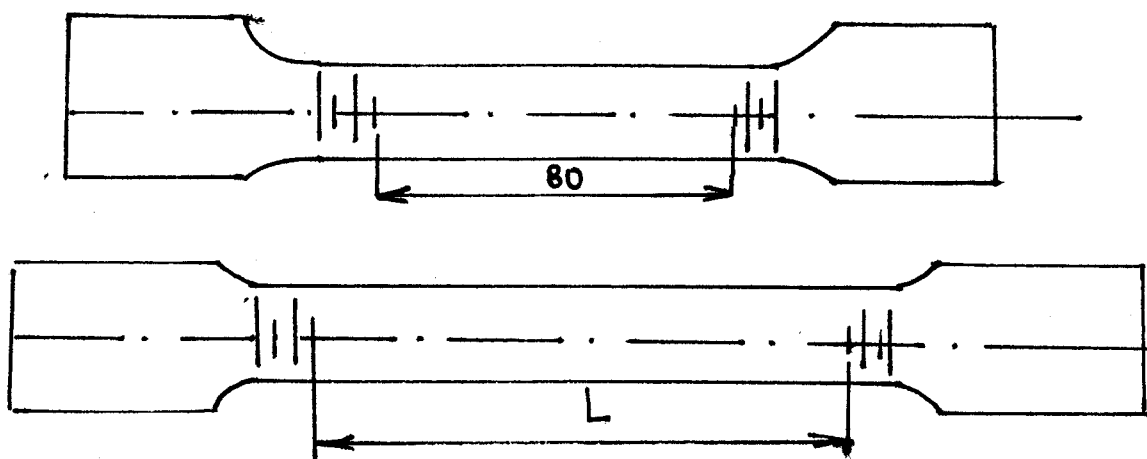
Pro tři vzorky je příklad výpočtu uveden v přílohách 2,3,4. Souhrně jsou získané hodnoty  $n$  a  $C$  pro všechny vzorky uvedeny v tab. 3. Hodnoty  $n$  a průměrné směrové hodnoty  $n$  jsou v tab. 4.

6.3.2 Stanovení maximálního rovnoměrného přetvoření  $\psi_k$  odpovídajícího mezi pevnosti ze závislosti  $F - \Delta L$

Princip stanovení vychází z obr. 16 a vztahu /8/. Získané hodnoty jsou uvedeny v tab.4.

6.3.3 Určení maximálního rovnoměrného přetvoření  $\psi_u$  proměřováním vzorků

Zkušební tyčku po skončení tahové zkoušky opět proměříme na Abbého délkoměru. Princip proměření je uveden na obr. 25.



Obr. 25. Princip proměřování vzorků pro určení  $\psi_u$

Hodnotu maximálního rovnoměrného přetvoření  $\psi_u$  určíme ze vztahu /8/.

V přílohách 5,6,7 jsou uvedeny jednotlivé proměřené úseky tří tyček před a po zatížení a dále jsou zde hodnoty skutečného prodloužení jednotlivých úseků tyček, hodnoty  $\varphi_{U_i}$ . Tyto hodnoty byly graficky zpracovány v závislosti na poloze měřené délky. V přílohách jsou tyto závislosti uvedeny ( přílohy 8;9,10 ).

V tab. 4 jsou vypočtené hodnoty maximálních rovnoměrných přetvoření  $\varphi_u$  pro všechny zkušební vzorky. Tab. 5 obsahuje maximální a minimální odchylky  $\varphi_u$  jednotlivých vzorků od příslušné průměrné hodnoty daného směru. Tyto odchylky jsou v tab. 6 vyjádřeny v procentech.

#### 6.4 Určování mezních hodnot přetvoření výpočtem

Pro výpočet mezních přetvoření využijeme vztahů /53/, /54/ a /55/ , pomocí nichž potom sestrojíme levou větev diagramu mezních přetvoření ( lokální ztráta stability ) a vztahů /56/, /57/ a /58/, pomocí nichž sestrojíme pravou větev diagramu mezních přetvoření ( difuzní ztráta stability ). Stav napjatosti je charakterizovaný hodnotou  $m$  , která v levé části diagramu nabývá hodnot  $\langle 0,1 - 0,5 \rangle$  a v pravé části  $\langle 0,5 - 0,95 \rangle$ .

Vypočtené hodnoty mezních přetvoření jsou uvedeny v tab. přílohách 11, 12, 13.

Pro výpočet  $\varphi_{1k}$  a  $\varphi_{2k}$  byly použity hodnoty  $n$  ,  $\varphi_k$  a  $\varphi_u$  a byl proveden rozbor vlivu  $n$  ,  $\varphi_k$  a  $\varphi_u$  na hodnoty mezních přetvoření. Dále byl proveden rozbor vzájemné souvislosti vypočtených hodnot mezních přetvoření a hodnot, které byly stanoveny experimentálně.

## 6.5 Výsledky

Tab.1 Mechanické charakteristiky materiálu zkušebních vzorků

VZOREK	$R_e$ /MPa/	$R_m$ /MPa/	$A_{80}$ /%/
A	188,356	328,767	39,375
B	194,770	323,165	38,125
C	195,010	338,402	36,563

Tab.2 Hodnoty součinitelů normálové anizotropie

VZOREK	r	$r_m$
A	1,72	
B	1,98	1,68
C	1,51	

Tab.3 Hodnoty exponentu zpevnění a konstanty C

VZOREK	A2	A3	A4	A5	B2	B3
n	0,224	0,220	0,223	0,230	0,224	0,222
C/MPa/	573,36	565,01	566,89	579,84	572,81	565,81
VZOREK	B4	B5	C2	C3	C4	
n	0,224	0,222	0,224	0,221	0,220	
C/MPa/	582,43	566,34	606,36	595,21	589,45	

Tab.5 Maximální a minimální odchylky  $\Delta \psi_u$  od průměrné hodnoty  $\psi_u$

ODCHYLKY	A2	A3	A4	A5	B2	B3
$\Delta \psi_{u; \max}$	+0,023	+0,029	+0,029	+0,023	-	+0,030
$\Delta \psi_{u; \min}$	-0,019	-0,031	-0,030	-0,024	-	-0,042

Pokračování tab.5

ODCHYLKY	B4	B5	C2	C3	C4
$\Delta\psi_{ui} \max$	++0,037	+0,023	+0,028	+0,010	+0,029
$\Delta\psi_{ui} \min$	-0,024	-0,032	-0,028	-0,018	-0,018

Tab.4 Tabulka vypočtených hodnot  $n$ ,  $\psi_k$  a  $\psi_u$

VZOREK	n		$\psi_k$		$\psi_u$	
A2	0,224	0,224	0,240	0,243	0,255	0,256
A3	0,220		0,248		0,261	
A4	0,223		0,246		0,259	
A5	0,229		0,227		0,248	
B2	0,224		0,234		0,	
B3	0,227	0,234	0,232	0,246	0,243	
B4	0,222	0,231	0,241			
B5	0,222	0,230	0,241			
C2	0,224	0,222	0,207	0,209	0,220	0,217
C3	0,221		0,213		0,216	
C4	0,220		0,208		0,216	

Tab.6 Maximální a minimální odchylky  $\Delta\psi_u$  od průměrné hodnoty  $\psi_u$  vyjádřené v procentech

ODCHYLKY	A2	A3	A4	A5	B2
$+\Delta\psi_{ui} \max$	9,02	11,11	11,20	9,27	12,-
$-\Delta\psi_{ui} \max$	7,45	11,88	11,58	9,68	-
$\Delta\psi \max_{\text{celk}}$	16,47	22,99	22,78	18,95	-

Pokračování tab.6

ODCHYLKY	B3	B4	B5	C2	C3	C4
+ $\Delta\psi_{ui} \max$	12,20	15,35	9,54	12,73	4,62	13,43
- $\Delta\psi_{ui} \max$	17,07	9,96	13,28	12,73	8,33	8,33
$\Delta\psi_{\max} \text{ celk}$	29,27	25,31	22,83	25,45	12,95	21,76

6.6 Rozbor výsledků

6.6.1 Vztah hodnot  $n$ ,  $\psi_k$ ,  $\psi_u$

Pro určení hodnot  $n$ ,  $\psi_k$  a  $\psi_u$  jsme využili tahovou zkoušku ukončenou na mezi pevnosti. Protože jsme neměli k dispozici speciální zařízení, jež umožňuje přerušení tahové zkoušky těsně za mezí pevnosti, pokusili jsme se o zastavení tahové zkoušky na mezi pevnosti na základě poklesu zatěžující síly. U jednotlivých měření se nám podařilo zaregistrovat poklesy sil uvedené v tab.7.

Tab.7 Zaregistrované poklesy sil

Vzorek	A2	A3	A4	A5	B2	B3	B4	B5	C234
Pokles síly/N/	9,84	19,69	11,81	7,87	7,87	3,94	11,81	3,94	0 0 0

V případě vzorků odebraných ve směru C jsme nezaregistrovali pokles žádný, neboť v důsledku špatné funkce průtahoměru ( obr.26 ) jsme byli nuceni přerušit tahovou zkoušku hned při dosažení meze pevnosti. V důsledku toho je materiálová charakteristika  $n$  pro vzorky odebrané ve směru C větší než hodnoty  $\psi_k$  a  $\psi_u$ . Další vzorky nebyly k dispozici, proto jsou v tab.4 pro tyto vzorky uvedené pouze hodnoty  $\psi_k$  a  $\psi_u$  ovlivněné špatnou funkcí průtahoměru.

U vzorků odebraných ve směrech A a B jsou hodnoty materiálové charakteristiky  $n$  menší vzhledem k hodnotám  $\psi_k$  a  $\psi_u$ . Dále platí, že maximální rovnoměrné přetvoření  $\psi_k$  je menší než maximální rovnoměrné přetvoření  $\psi_u$ . Z tohoto vyplývá vzájemný vztah mezi hodnotami  $n$ ,  $\psi_k$  a  $\psi_u$ , který lze matematicky zapsat ve tvaru :

$$n < \psi_k < \psi_u .$$

### 6.6.2 Rozbor skutečných délkových deformací

Po ukončení tahové zkoušky byly všechny vzorky opět proměřeny na Abbého délkoměru a byla určena skutečná přetvoření délek jednotlivých úseků zkušební tyčky  $\psi_{IIi}$ . Grafické znázornění závislosti  $\psi_{IIi}$  - počáteční vzdálenost od středu vzorku je uvedena v přílohách 8,9,10. Z obrázků vyplývá, že nejmenší nerovnoměrnost přetvoření ve směru délky se vyskytuje u vzorků C. To opět souvisí s tím, že jsme museli přerušit tahovou zkoušku při dosažení meze pevnosti a tedy, že přetvoření nemohlo dosáhnout takových hodnot jako v případě vzorků A a B, kde byla zkouška přerušena až za mezí pevnosti. Největší nerovnoměrnost přetvoření se vyskytuje u vzorku A3, protože zde jsme dovolili pokles zatěžující síly až o 19,69 N.

### 6.6.3 Zhodnocení vlivu hodnot $n$ , $\psi_k$ a $\psi_u$ na velikost mezních přetvoření a vzájemný vztah křivek mezních přetvoření získaných z vypočtených hodnot $\psi_{1k}$ a $\psi_{2k}$ a křivek experimentálně zjištěných

Na základě vztahů /53/ a /54/ a vztahů /57/, /58/ a /56/ byly vypočteny hodnoty mezních přetvoření potřebné pro sestrojení diagramu mezních přetvoření. Z obr.26,27,28 a 29 vyplývá, že experimentálně zjištěným křivkám se nejvíce



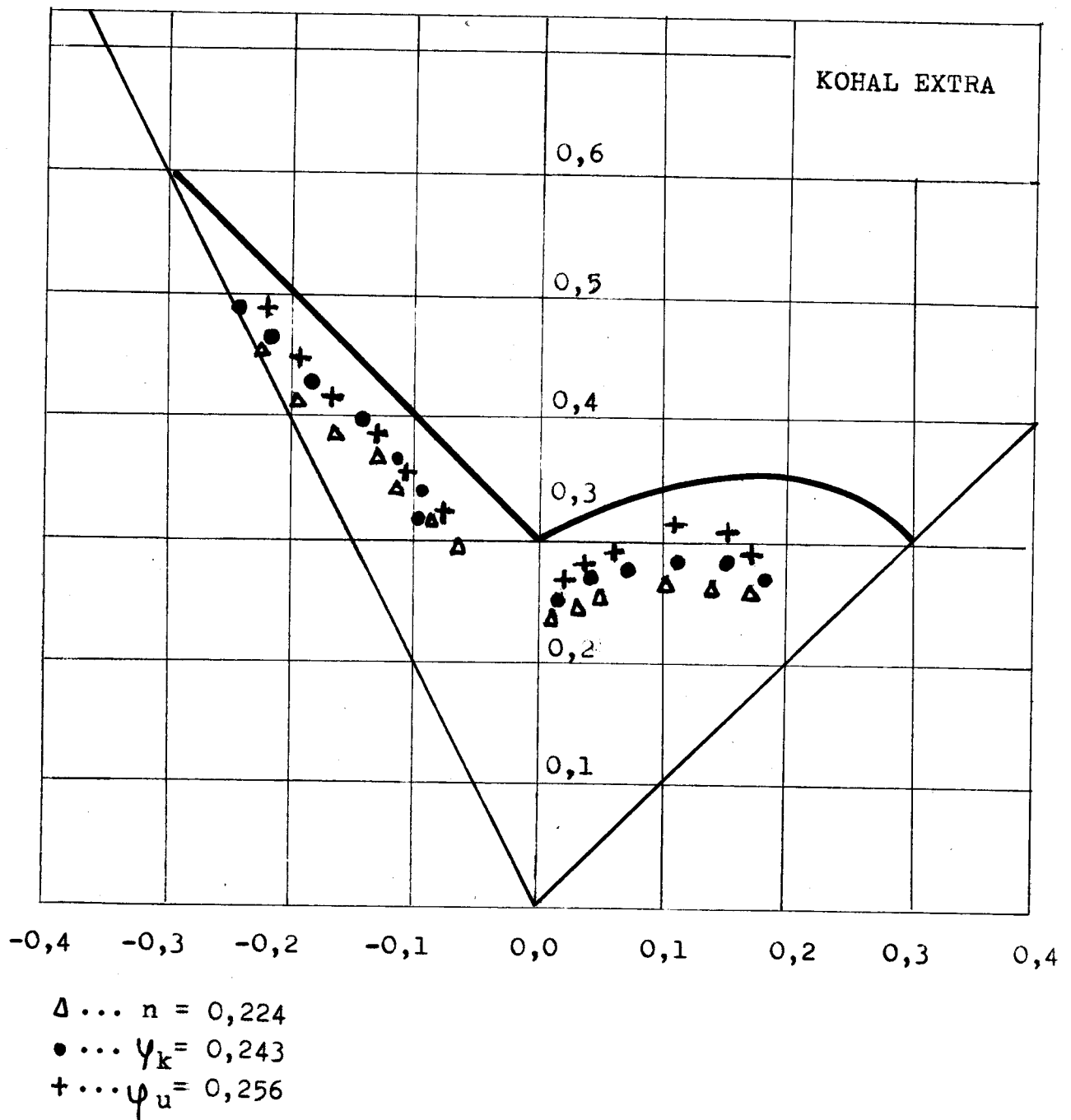
přibližují ty křivky, u kterých bylo pro výpočet mezních přetvoření využito co největších hodnot  $n$ ,  $\varphi_k$  a  $\varphi_u$ . Pro výpočet mezních hodnot přetvoření jsme využili aritmetické průměry směrových hodnot  $n$ ,  $\varphi_k$  a  $\varphi_u$  a ze vzájemného vztahu těchto tří hodnot vyplynulo, že lze říci, že nejvíce se experimentálně zjištěným křivkám blíží křivky sestavené na základě těch hodnot přetvoření, pro jejichž výpočet byly použity hodnoty  $\varphi_u$ . To znamená, že čím větší nerovnoměrnost přetvoření dovolíme, tím dostaneme větší hodnoty  $n$ ,  $\varphi_k$ , a  $\varphi_u$  a tím více se přiblížíme experimentálně zjištěným křivkám, protože experimentální křivky byly sestavené z hodnot přetvoření, které předchází vzniku trhliny.

U vzorku A3, u kterého jsme dovolili pokles zatěžující síly o 19,69 N a tedy největší nerovnoměrnost přetvoření, je z diagramu patrné, že křivka sestavená z mezních hodnot přetvoření, pro jejichž výpočet byla použita největší hodnota přetvoření  $\varphi_u = 0,261$ , se nejvíce přiblížila křivce experimentální.

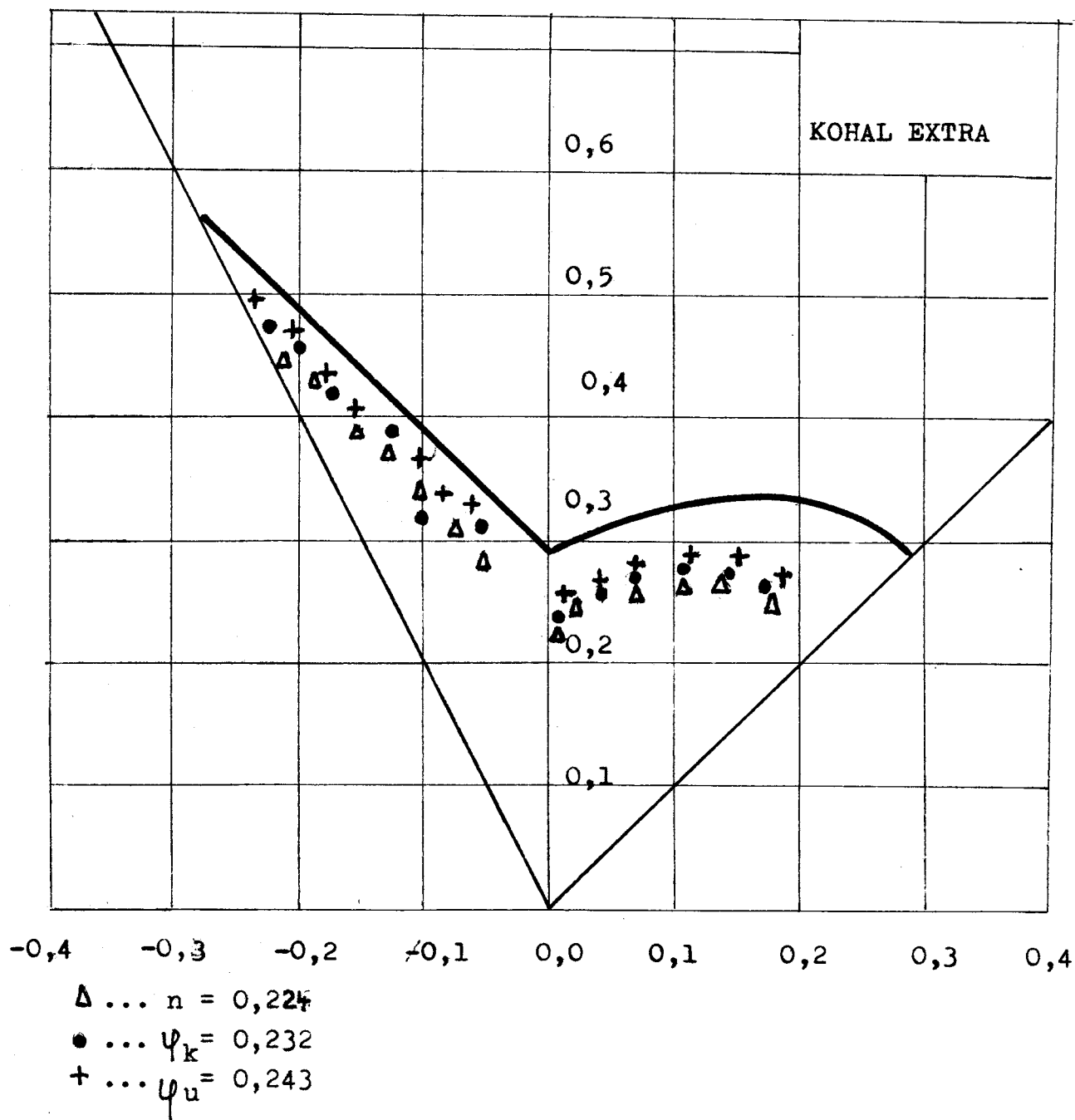


Obr. 22.1. Trhací stroj FPZ 100

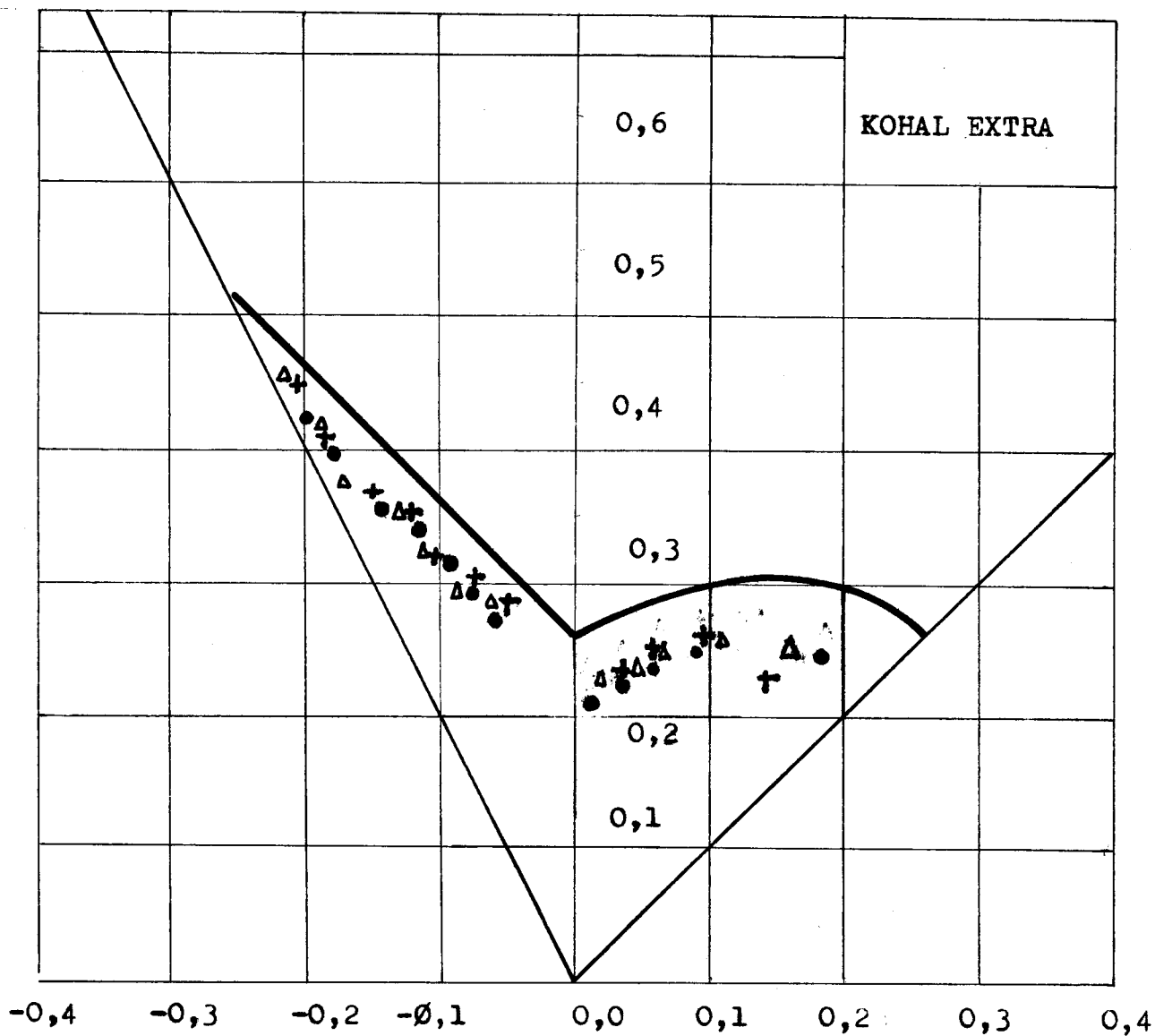
Obr. 26. Diagram mezních přetvoření pro hodnoty  $n$ ,  $\psi_k$   
a  $\psi_u$  určené u vzorků A



Obr. 27. Diagram mezních přetvoření pro hodnoty  $n, \psi_k$   
 a  $\psi_u$  určené u vzorků B

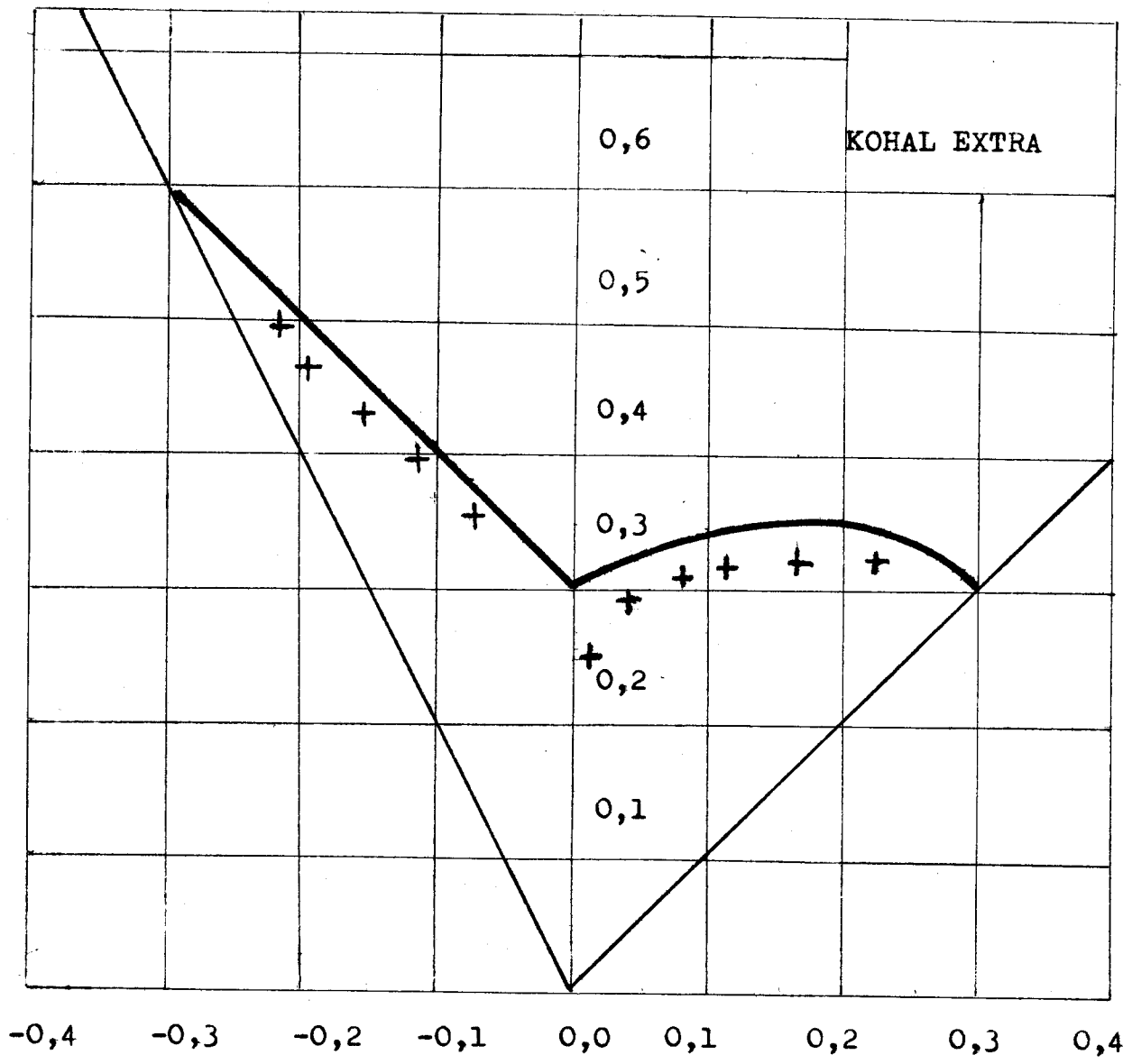


Obr. 28. Diagram mezních přetvoření pro hodnoty  $n$ ,  $\psi_k$   
 a  $\psi_u$  určené u vzorků C



$\Delta \dots n = 0,222$   
 $\bullet \dots \psi_k = 0,209$   
 $+\dots \psi_u = 0,217$

Obr. 29. Diagram mezních přetvoření pro hodnotu  $\varphi_u = 0,261$



## 7. ZÁVĚR

Dosažené výsledky této práce je možno shrnout v následujících bodech :

- 1/ Hodnota materiálové charakteristiky  $n$  určené metodou nejmenších čtverců je menší vzhledem k hodnotám maximálního rovnoměrného přetvoření  $\psi_k$  odečteného z grafu a maximálního rovnoměrného přetvoření získaného proměřováním vzorků  $\psi_u$ .

Souvislost těchto tří hodnot lze vyjádřit matematickým vztahem

$$n < \psi_k < \psi_u .$$

- 2/ Hodnoty materiálové charakteristiky  $n$  a maximálních rovnoměrných přetvoření  $\psi_k$  a  $\psi_u$  jsou tím větší, čím nerovnoměrnost přetvoření byla povolena. Největší hodnoty maximálních přetvoření byly získány u vzorku A3, kde  $\psi_k = 0,248$  a  $\psi_u = 0,261$  a největší hodnota  $n = 0,227$  byla vypočtena u vzorku B3. *z. v. h.*

- 3/ Experimentálně zjištěným křivkám mezních přetvoření ( zjištěné na základě přetvoření, které předchází vzniku trhliny ) se nejvíce přiblížily ty křivky mezních přetvoření, které byly sestaveny z hodnot  $\psi_{1k}$  a  $\psi_{2k}$  vypočtených z největších získaných hodnot  $n$ ,  $\psi_k$  a  $\psi_u$ . Nejvíce se přiblížovala křivka sestavená z hodnot  $\psi_{1k}$  a  $\psi_{2k}$  vypočtených z největší získané hodnoty  $\psi_u = 0,261$  u vzorku A3.

## 8. SEZNAM PŘÍLOH

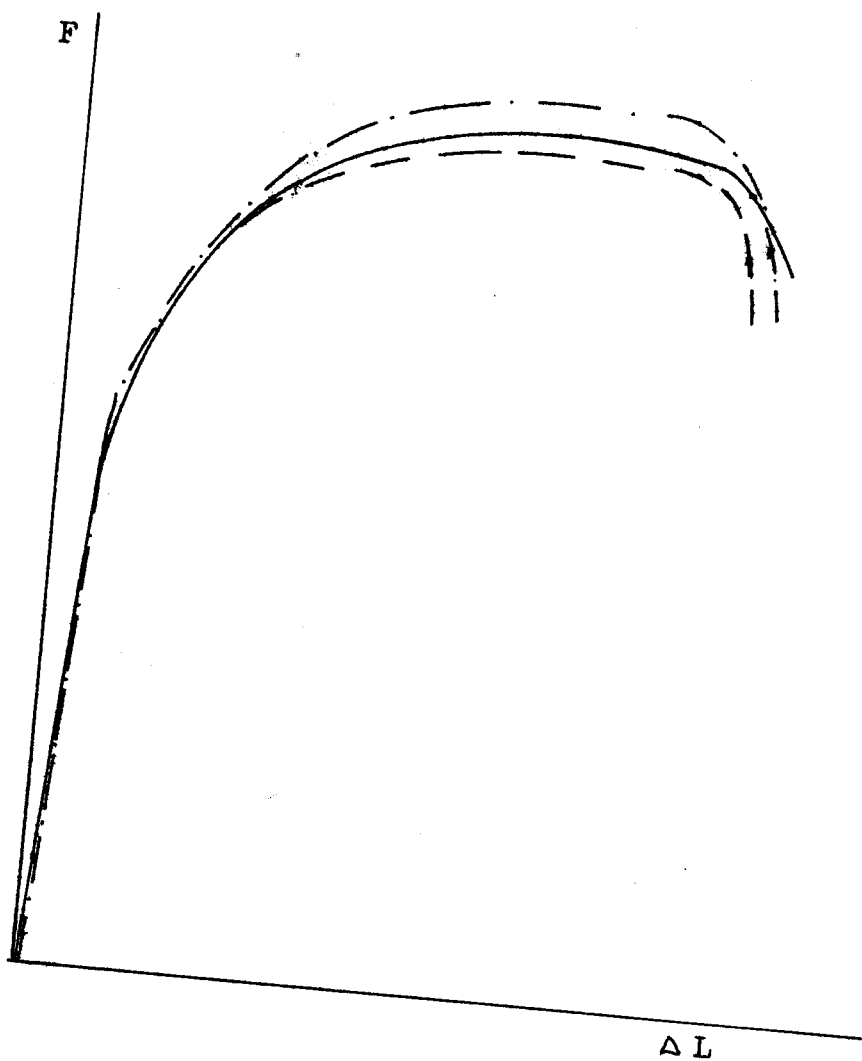
1. Diagram tahové zkoušky
2. Výpočet materiálové charakteristiky  $n$  a materiálové konstanty  $C$  u vzorku A3
3. Výpočet materiálové charakteristiky  $n$  a materiálové konstanty  $C$  u vzorku B4
4. Výpočet materiálové charakteristiky  $n$  a materiálové konstanty  $C$  u vzorku C4
5. Tabulka hodnot potřebných pro výpočet maximálního rovnoměrného přetvoření  $\psi_u$  a hodnot  $\psi_{ui}$  u vzorku C4
6. Tabulka hodnot potřebných pro výpočet maximálního rovnoměrného přetvoření  $\psi_u$  a hodnot  $\psi_{ui}$  u vzorku A3
7. Tabulka hodnot potřebných pro výpočet maximálního rovnoměrného přetvoření  $\psi_u$  a hodnot  $\psi_{ui}$  u vzorku B4
8. Grafická závislost hodnot  $\psi_{ui}$  na počáteční vzdálenosti od středu vzorku pro vzorky A2, A3, A4, A5
9. Grafická závislost hodnot  $\psi_{ui}$  na počáteční vzdálenosti od středu vzorku pro vzorky C2, C3, C4
10. Grafická závislost hodnot  $\psi_{ui}$  na počáteční vzdálenosti od středu vzorku pro vzorky B3, B4, B5
11. Hodnoty mezních přetvoření v případě lokální ztráty stability pro sestrojování diagramů mezních přetvoření
12. Hodnoty mezních přetvoření v případě difuzní ztráty stability pro sestrojení diagramů mezních přetvoření
13. Odchyšky přetvoření jednotlivých úseků zkušebních vzorků  $\psi_{ui}$  od průměrné směrové hodnoty  $\psi_u$ .

## 9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. Pollák, L. : Anizotropia a hĺbokotažnosť ocelových plechov, ALFA, Bratislava, 1978
2. Mikeš, V. : Příspěvek k problematice určování materiálové hodnoty tenkých hlubokotažných ocelových plechů, Strojírenství, 1972
3. ČSN 42 04 36 - návrh : Skúška exponenta deformačného spevnenia
4. Pollák, L. : Nové kritériá tváritelnosti plechov, Zborník prednášok z konferencie " Rozvoj technològie tvárenia v 7. 5RP, Dom techniky, Košice, 1985
5. Kolektiv : Metodika experimentálního hodnocení plechů z hlediska mezních hodnot velkých plastic-  
kých přetvoření, výzkumná práce, Liberec, 1982
6. Mikeš, V. : Teorie tváření plechů, přednášky, VŠST Liberec, 1987
7. Plaštiak, V. : Přímá metoda určování koeficientu zpevnění "n", Diplomová práce, VŠST, Liberec, 1984
8. Svoboda, B. : Přímá a nepřímá metoda určování koeficientu zpevnění "n", Diplomová práce, VŠST, Liberec, 1982
9. Kořátková, D. : Určování koeficientu zpevnění zkouškou tahem, Diplomová práce, VŠST, Liberec, 1983
10. Kolektiv : Sborník vědeckých prací VŠST v Liberci, sv. XVIII, VŠST, LIBEREC, 1985
11. Mikeš, V. : Teorie tváření, přednášky, VŠST, Liberec, 1987



PŘÍLOHA 1 : DIAGRAM TAHOVÉ ZKOUŠKY



- .....směr A
- - -.....směr B
- · -.....směr C

PŘÍLOHA 2 : VÝPOČET MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY  $n$   
A MATERIÁLOVÉ KONSTANTY  $C$  U VZORKU A3

F/N/	L/mm/	$\psi_i$	$x_i$	$\sigma_i$ /MPa/	$y_i$	$x_i^2$	$x_i y_i$
3272	1,5	0,018	-1,731	234,216	2,369	2,996	4,102
3700	3	0,037	-1,434	269,728	2,431	2,056	3,486
4024	4,5	0,055	-1,262	298,648	2,475	1,592	3,124
4212	6	0,072	-1,141	318,150	2,503	1,301	2,856
4340	7,5	0,089	-1,048	333,537	2,523	1,098	2,644
4428	9	0,109	-0,972	346,133	2,539	0,945	2,468
4500	10,5	0,123	-0,909	357,689	2,554	0,826	2,321
4548	12	0,139	-0,855	367,497	2,565	0,730	2,193
4580	13,5	0,156	-0,807	376,117	2,575	0,651	2,078
4596	15	0,172	-0,765	383,486	2,584	0,585	1,977
4604	16,5	0,186	-0,727	390,219	2,591	0,528	1,884
4612	18	0,203	-0,693	396,973	2,599	0,479	1,801
4620	19,5	0,218	-0,661	403,748	2,606	0,437	1,723
4628	21	0,233	-0,632	410,545	2,613	0,400	1,652
4628	22,5	0,248	-0,606	416,642	2,619	0,367	1,588
			14,243		38,146	14,991	35,897

$$n = 0,220$$

$$C = 565,013$$

PŘÍLOHA 3 : VÝPOČET MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY  $n$   
A MATERIÁLOVÉ KONSTANTY  $C$  U VZORKU B4

F/N/	L/mm/	$\psi_i$	$x_i$	$\bar{\sigma}_i$ /MPa/	$y_i$	$x_i^2$	$x_i y_i$
3212	1,5	0,018	-1,731	229,087	2,360	2,996	4,085
3704	3	0,037	-1,434	269,039	2,430	2,056	3,484
4020	4,5	0,055	-1,262	297,269	2,473	1,592	3,121
4216	6	0,072	-1,141	317,297	2,501	1,301	2,854
4340	7,5	0,089	-1,048	332,326	2,522	1,098	2,643
4440	9	0,107	-0,972	345,812	2,539	0,945	2,468
4500	10,5	0,123	-0,909	356,392	2,552	0,826	2,320
4540	12	0,139	-0,855	365,519	2,563	0,730	2,191
4560	13,5	0,156	-0,807	373,116	2,572	0,651	2,075
4592	15	0,172	-0,765	381,762	2,582	0,585	1,975
4600	16,5	0,188	-0,727	388,465	2,589	0,528	1,882
4608	18	0,203	-0,693	395,190	2,597	0,480	1,799
4608	19,5	0,218	-0,661	401,238	2,603	0,437	1,721
4608	21	0,233	-0,632	407,287	2,610	0,400	1,649
			13,637		35,493	14,624	34,267

$$n = 0,227$$

$$C = 569,905$$

PŘÍLOHA 4 : VÝPOČET MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY n  
A KONSTANTY C U VZORKU C4

F/N/	L/mm/	$\psi_i$ /MPa/	$x_i$	/MPa/	$y_i$	$x_i^2$	$x_i y_i$
3368	1,425	0,018	-1,753	241,251	2,382	3,073	4,176
3888	2,925	0,036	-1,445	283,629	2,453	2,087	3,544
4200	4,425	0,054	-1,259	311,932	2,494	1,610	3,165
4412	5,925	0,071	-1,146	333,499	2,523	1,313	2,891
4556	7,425	0,089	-1,052	351,396	2,545	1,106	2,677
4488	8,925	0,106	-0,976	352,1088	2,554	0,952	2,484
4700	10,425	0,122	-0,912	373,875	2,573	0,832	2,346
4748	11,925	0,139	-0,857	383,958	2,584	0,735	2,215
4772	13,425	0,155	-0,809	390,196	2,594	0,655	2,098
4792	14,925	0,171	-0,767	400,163	2,602	0,588	1,996
4800	16,425	0,187	-0,729	407165	2,610	0,531	1,903
4800	17,925	0,202	-0,694	413,499	2,616	0,482	1,816
			12,409		30,520	13,964	31,311

$$n = 0,220$$

$$C = 589,445$$

PŘÍLOHA 5 : TABULKA HODNOT POTŘEBNÝCH PRO VÝPOČET  
 MAXIMÁLNÍHO ROVNOMĚRNÉHO PŘETVOŘENÍ  $\psi_u$   
 A HODNOT  $\psi_{ui}$  U VZORKU C4

číslo čárky	před zatížením		po zatížení		$\psi_{ui}$
	poloha čárky	délka úseku /mm/	poloha čárky	délka úseku /mm/	
1	4,1077	5,0552	4,3682	5,8643	0,148
2	9,1629	4,9721	10,2325	5,9824	0,185
3	14,1350	4,9271	16,2149	6,0426	0,204
4	19,0621	5,0442	22,2475	6,1527	0,199
5	24,1063	5,2064	28,4002	6,1232	0,201
6	29,1127	4,9307	34,5234	6,0233	0,200
7	34,0434	5,1009	40,5467	6,2705	0,206
8	39,1443	4,9502	46,8172	6,1454	0,216
9	44,0945	5,0274	52,9626	6,2294	0,214
10	49,0219	4,9731	59,1920	6,1728	0,216
11	54,0950	4,9051	65,3648	6,2641	0,245
12	59,0001	5,0991	71,6289	6,2820	0,208
13	64,0992	4,9816	77,9109	6,2369	0,225
14	69,0808	4,9693	84,1478	6,3841	0,235
15	74,0501	5,0340	90,4319	6,3708	0,236
16	79,0841	5,0388	96,8027	6,2904	0,222
17	84,1229	4,9143	103,0961	6,1124	0,218
18	89,0372	5,0371	109,2085	6,2548	0,217
19	94,0743	4,9291	115,4633	6,0360	0,203
20	99,0034	5,0771	121,5993	6,1888	0,198
21	104,0805	5,0000	127,6881	6,0546	0,191
22	109,0805	5,0096	133,7427	6,0597	0,190
23	114,0901	5,0282	139,8024	6,0060	0,178
24	119,1183	4,8906	145,8084	5,7188	0,156
25	124,0089		151,5272		

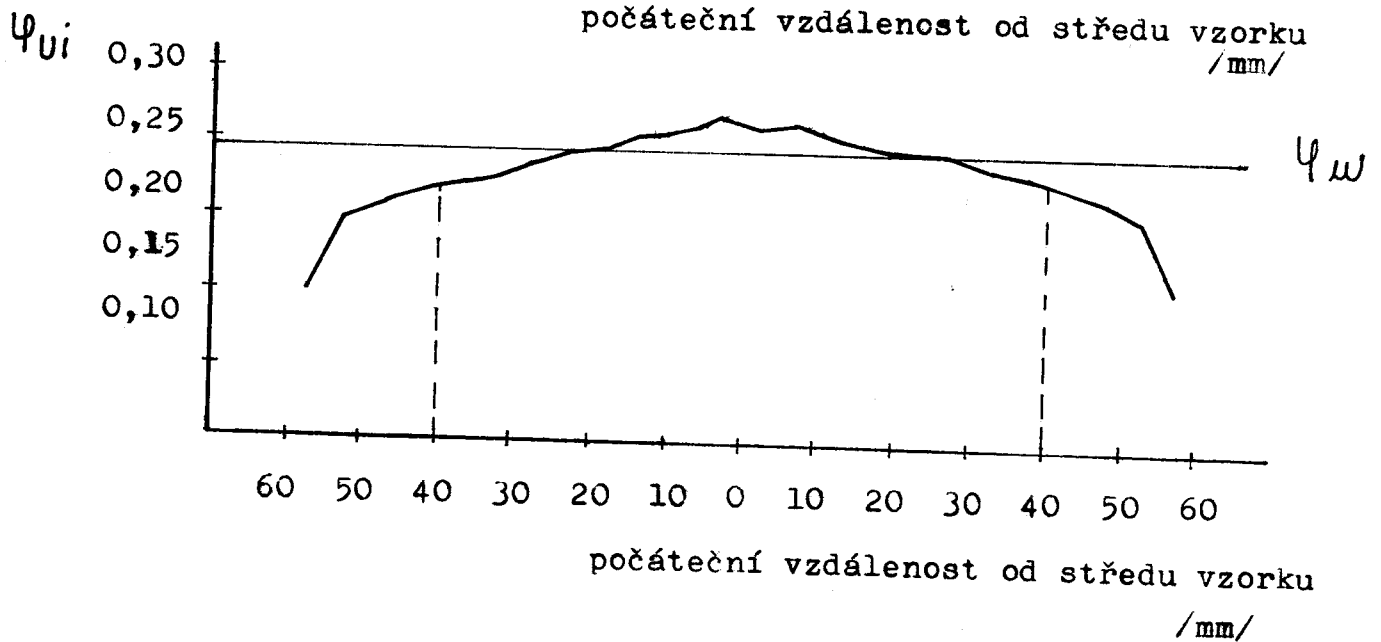
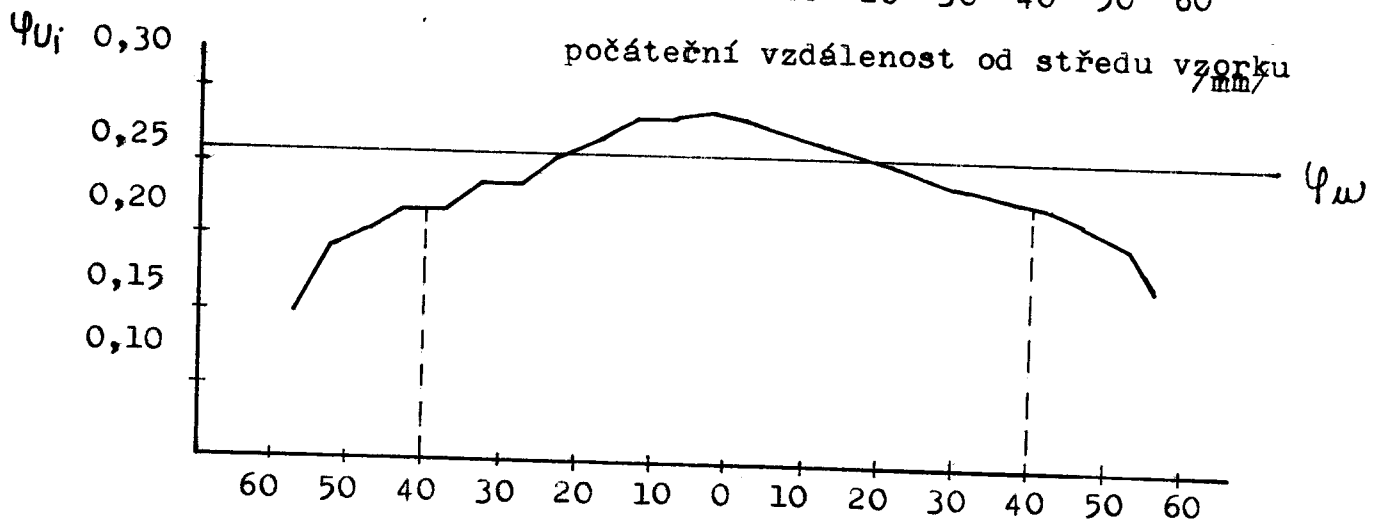
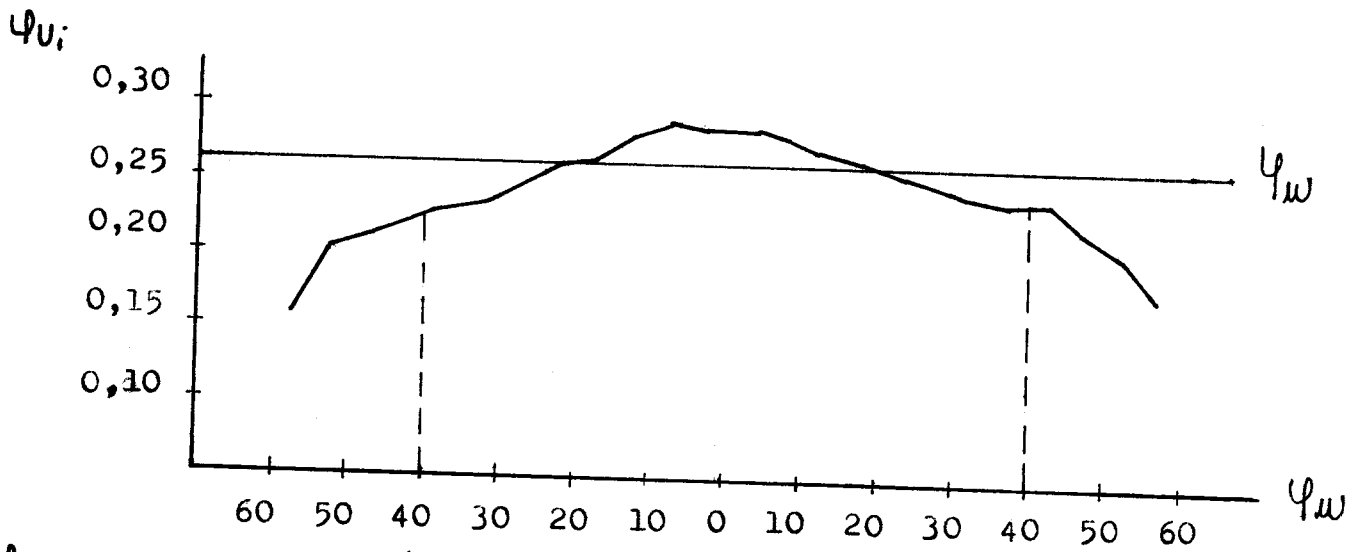
PŘÍLOHA 6 : TABULKA HODNOT POTŘEBNÝCH PRO VÝPOČET  
 MAXIMÁLNÍHO ROVNOMĚRNÉHO PŘETVOŘENÍ  $\psi_u$   
 A HODNOT  $\psi_{Di}$  U VZORKU A3

číslo čárky	před zatížením		po zatížení		$\psi_{Di}$
	poloha useku	délka useku /mm/	poloha čárky	délka useku /mm/	
1	0,3836	5,0522	0,5151	5,8996	0,155
2	5,4358	4,9624	6,4137	6,0748	0,20,202
3	10,3982	4,9978	12,4885	6,1702	0,212
4	15,3960	4,9898	18,6587	6,2287	0,222
5	20,3858	4,9988	24,8874	6,2917	0,230
6	25,3846	5,0916	31,1791	6,4400	0,235
7	30,4762	4,9082	37,6191	6,2814	0,247
8	35,3844	4,9772	43,9004	6,4480	0,259
9	40,3616	5,0352	50,3484	6,5490	0,263
10	45,3968	4,9802	56,8974	6,5938	0,281
11	50,3770	4,9960	63,4912	6,6771	0,290
12	55,3730	5,0918	70,1683	6,7717	0,285
13	60,4648	4,9884	76,9400	6,6324	0,285
14	65,4532	4,9446	83,5724	6,6628	0,283
15	70,3978	4,9812	90,1352	6,5323	0,271
16	75,3790	5,0778	96,6675	6,6188	0,265
17	80,4568	5,0118	103,2863	6,4685	0,255
18	85,4682	5,0004	109,7548	6,4184	0,249
19	90,4686	4,9248	116,1732	6,2599	0,239
20	95,3934	5,0378	122,4331	6,3844	0,237
21	100,4312	4,9952	128,8175	6,3476	0,239
22	105,4682	5,0048	135,1651	6,2266	0,218
23	110,4730	5,0348	141,3817	6,1695	0,203
24	115,5078	4,9914	147,3912	5,9098	0,169
25	120,4992		153,4710		

PŘÍLOHA 7 : TABULKA HODNOT POTŘEBNÝCH PRO VÝPOČET  
 MAXIMÁLNÍHO ROVNOMĚRNÉHO PŘETVOŘENÍ  $\Psi_u$   
 A HODNOT  $\Psi_{ui}$  U VZORKU B4

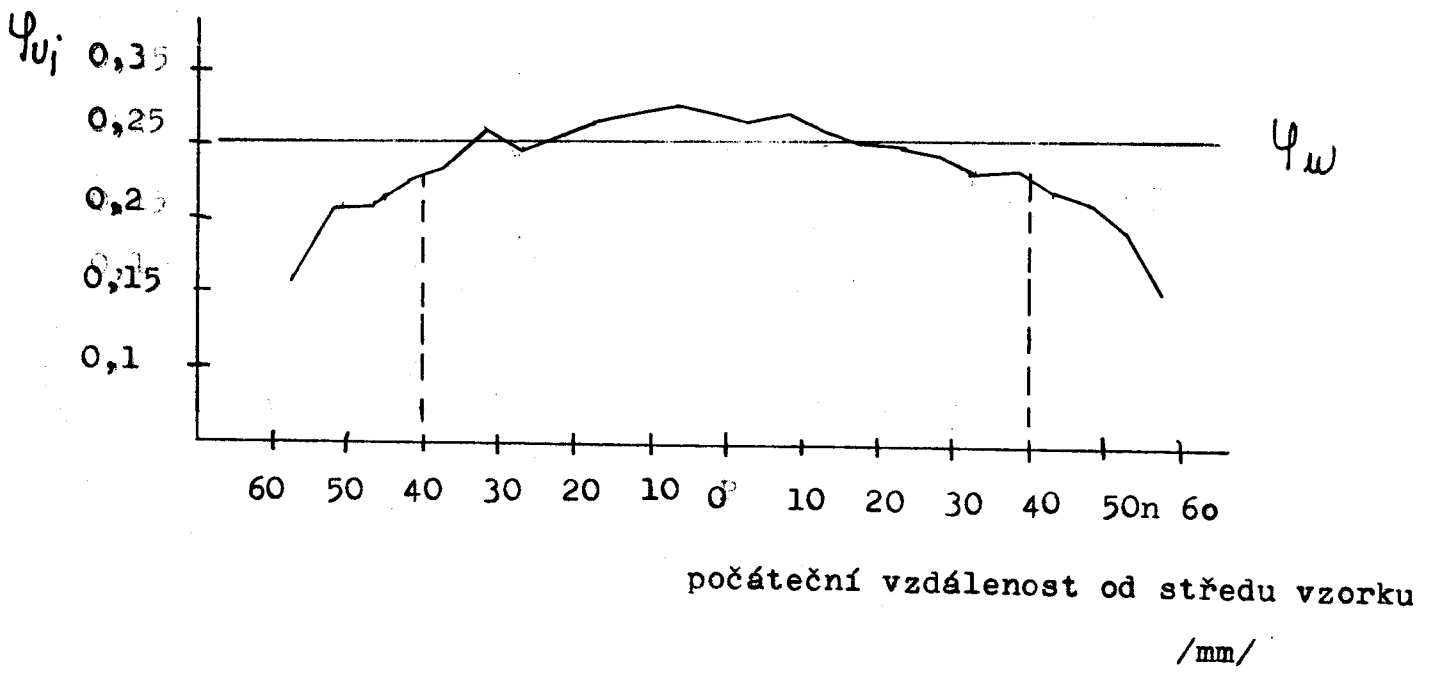
číslo čárky	před zatížením		po zatížení		$\Psi_{ui}$
	poloha čárky	délka useku /mm/	poloha čárky	délka useku /mm/	
1	7,1741	5,0307	1,1275	5,8049	0,143
2	12,2048	4,9374	6,9324	6,0566	0,204
3	17,1422	4,9902	12,9890	6,0868	0,199
4	22,1324	5,0763	19,0758	6,1816	0,197
5	27,2087	4,9597	25,2574	6,1820	0,220
6	32,1684	4,9831	31,4394	6,1963	0,218
7	37,1515	4,9838	37,6357	6,3084	0,236
8	42,1353	5,0480	43,9441	6,3933	0,220
9	47,1833	4,9521	50,2374	6,3942	0,256
10	52,1345	4,9991	56,6316	6,4091	0,248
11	57,1345	5,0030	63,0407	6,3355	0,236
12	62,1375	5,0903	69,3771	6,3364	0,219
13	67,2278	4,9806	75,7126	6,5736	0,278
14	72,2084	4,9815	82,3862	6,5002	0,266
15	77,1899	4,9739	88,7864	6,4601	0,261
16	82,1638	4,9825	95,2465	6,4880	0,264
17	87,1468	5,0630	101,7345	6,2917	0,217
18	92,2093	4,9798	108,0262	6,3359	0,241
19	97,1891	5,0247	114,3621	6,4673	0,252
20	102,2138	4,9768	120,8294	6,1827	0,217
21	107,1906	4,9878	127,0121	6,3149	0,236
22	112,1784	5,0036	133,3270	6,1298	0,203
23	117,1820	4,9871	139,4568	6,0626	0,195
24	122,1691	4,9885	145,5194	5,8585	0,161
25	127,1576		151,3779		

PŘÍLOHA 8 : GRAFICKÁ ZÁVISLOST HODNOT  $\psi_{U_i}$  NA POČÁTEČNÍ VZDÁLENOSTI OD STŘEDU VZORKU PRO VZORKY A2, A3, A4, A5

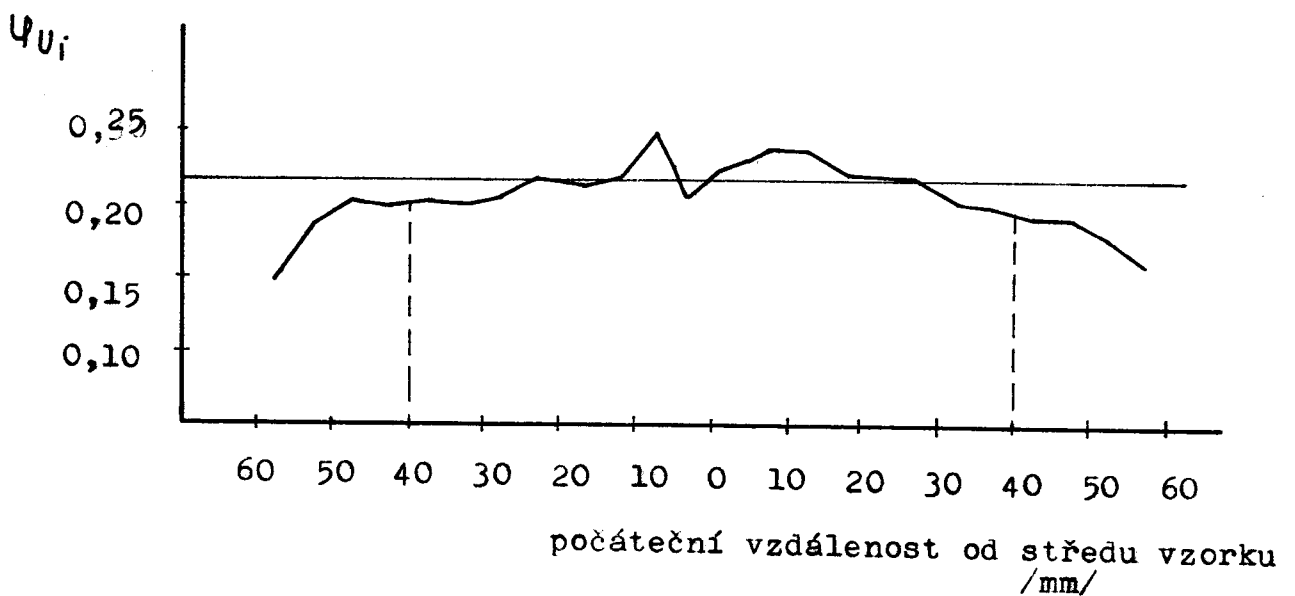
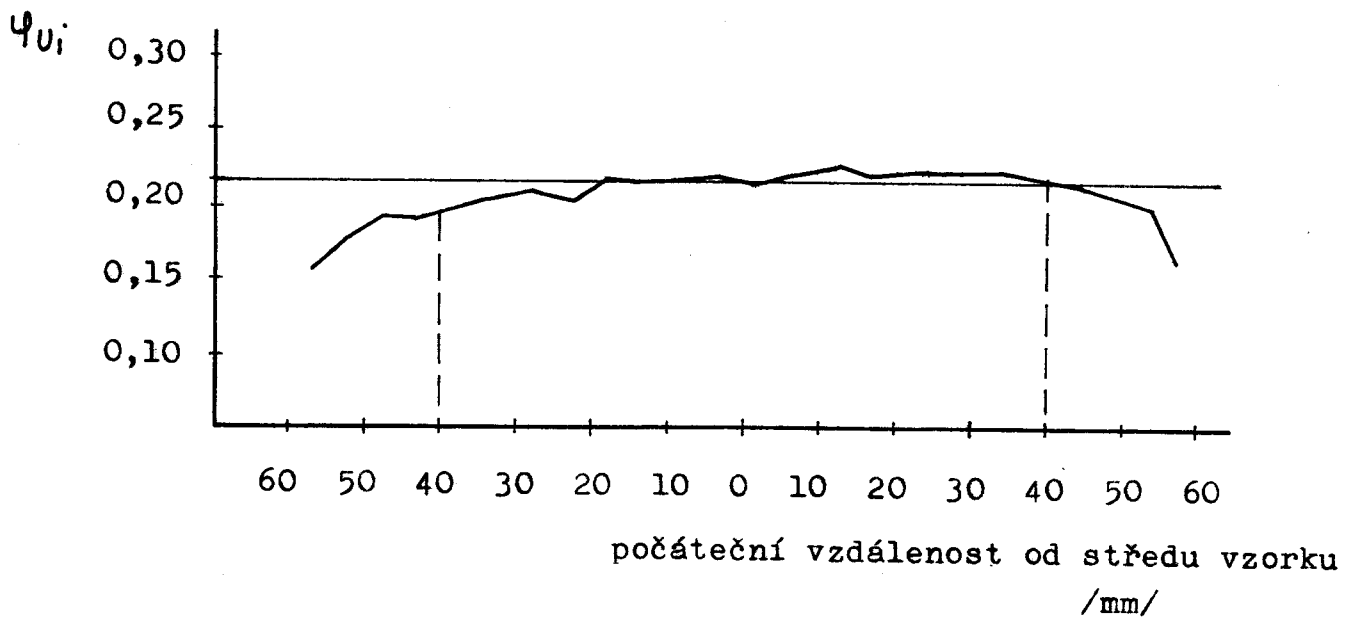
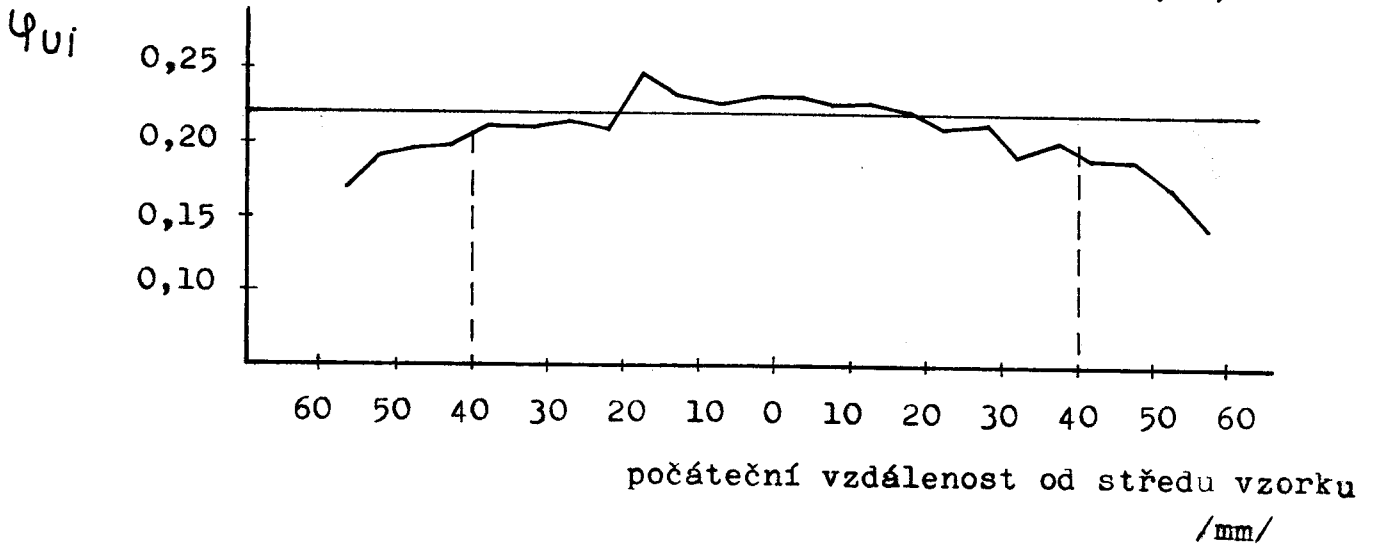




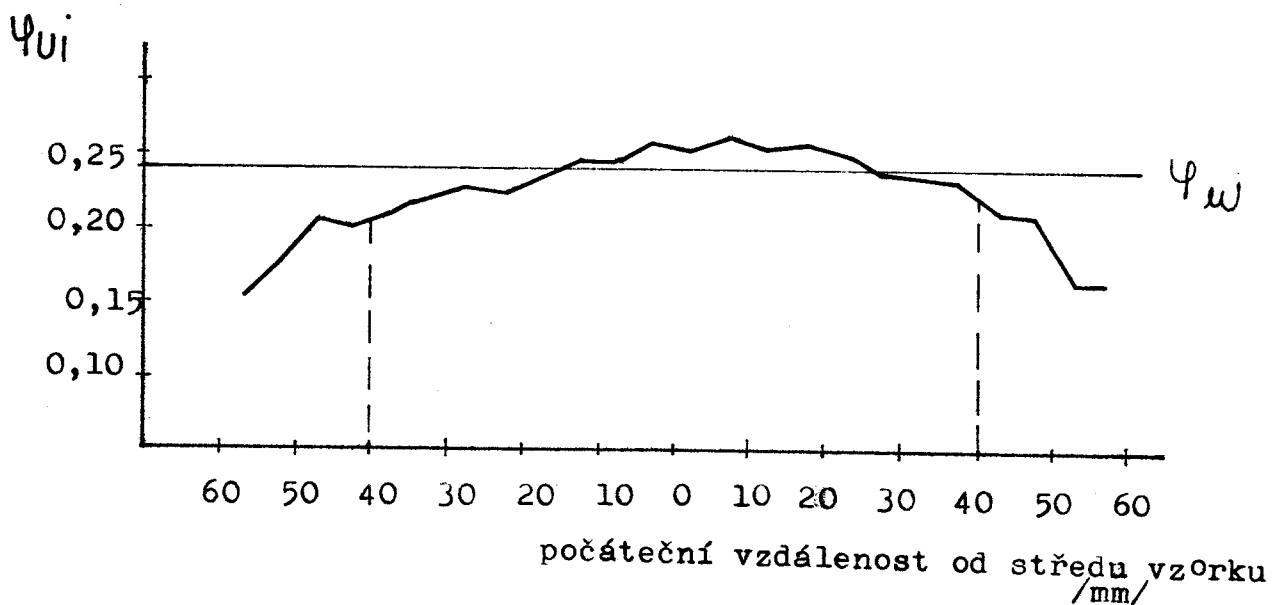
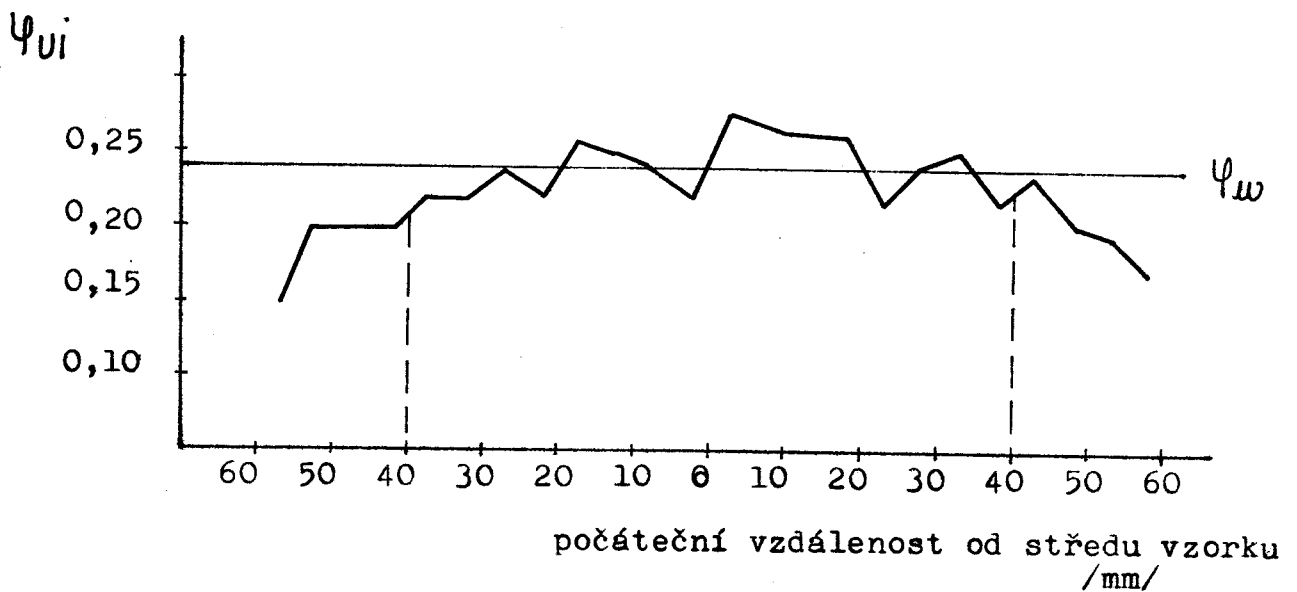
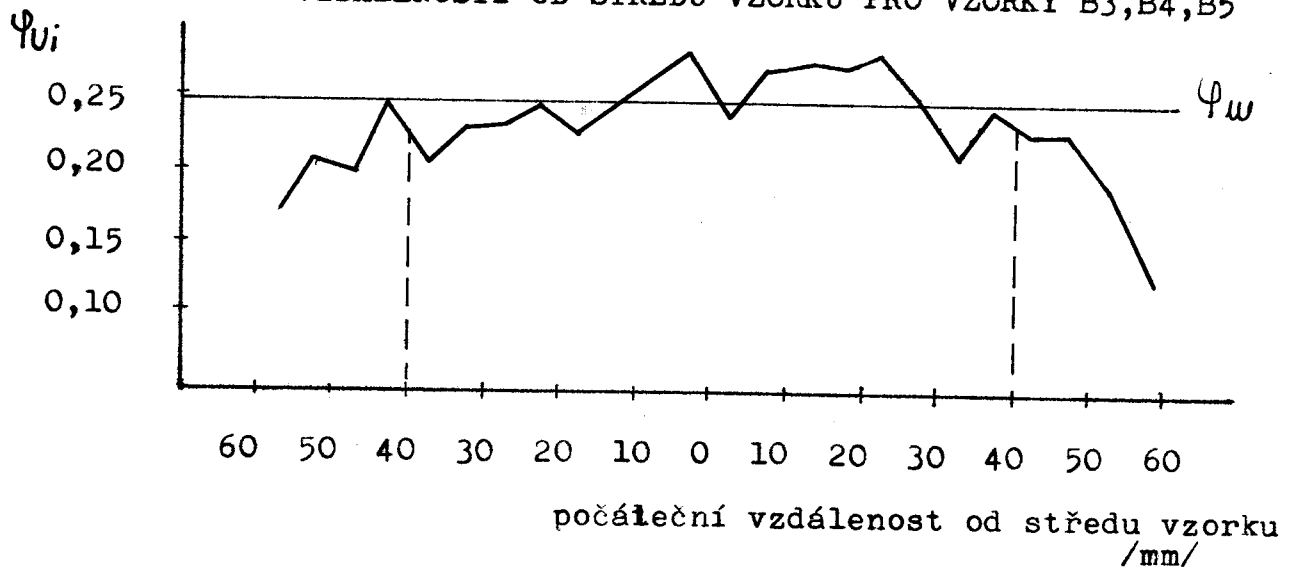
PŘÍLOHA 8 : pokračování



PŘÍLOHA 9 : GRAFICKÁ ZÁVISLOST HODNOT  $\psi_{U_i}$  NA POČÁTEČNÍ VZDÁLENOSTI OD STŘEDU VZORKU PRO VZORKY C2, C3, C4



PŘÍLOHA 10 : GRAFICKÁ ZÁVISLOST HODNOT  $\psi_{Di}$  NA POČÁTEČNÍ VZDÁLENOSTI OD STŘEDU VZORKU PRO VZORKY B3, B4, B5



PŘÍLOHA 11 : HODNOTY MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ V PŘÍPADĚ LOKÁLNÍ ZTRÁTY STABILITY PRO SESTROJENÍ DIAGRAMU NA

1. obr. 26

$n = 0,224$	m	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
	$\psi_{1k}$	0,525	0,488	0,453	0,421	0,391	0,364	0,338	0,313	0,290
	$\psi_{2k}$	-0,301	-0,264	-0,229	-0,197	-0,167	-0,140	-0,113	-0,089	-0,067

$n_k = 0,243$	m	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
	$\psi_{1k}$	0,570	0,529	0,492	0,457	0,425	0,395	0,366	0,340	0,315
	$\psi_{2k}$	-0,327	-0,286	-0,249	-0,214	-0,182	-0,152	-0,123	-0,097	-0,072

$n_u = 0,256$	m	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
	$\psi_{1k}$	0,600	0,558	0,518	0,482	0,447	0,415	0,386	0,358	0,315
	$\psi_{2k}$	-0,344	-0,302	-0,262	-0,226	-0,191	-0,160	-0,130	-0,102	-0,076

2. obr. 29

$n_u = 0,261$	m	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
	$\psi_{1k}$	0,612	0,568	0,528	0,491	0,456	0,424	0,394	0,365	0,338
	$\psi_{2k}$	-0,351	-0,030	-0,267	-0,229	-0,195	-0,163	-0,133	-0,104	-0,078

3. obr. 27

$n_k = 0,224$	m	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
	$\psi_{1k}$	0,525	0,488	0,453	0,421	0,391	0,364	0,338	0,313	0,290
	$\psi_{2k}$	-0,301	-0,264	-0,229	-0,197	-0,167	-0,140	-0,113	-0,089	-0,067

PŘÍLOHA 11 : pokračování

$\psi_H = 0,232$

m	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$\psi_{1k}$	0,544	0,505	0,470	0,436	0,406	0,377	0,250	0,325	0,301
$\psi_{2k}$	-0,312	-0,274	-0,238	-0,204	-0,174	-0,145	-0,118	-0,093	-0,069

$\psi_W = 0,243$

m	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$\psi_{1k}$	0,570	0,529	0,492	0,457	0,425	0,395	0,366	0,340	0,335
$\psi_{2k}$	-0,327	-0,286	-0,249	-0,214	-0,182	-0,152	-0,123	-0,097	-0,072

4. obr. 28

$n = 0,222$

m	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$\psi_{1k}$	0,520	0,484	0,449	0,418	0,388	0,361	0,335	0,311	0,288
$\psi_{2k}$	-0,298	-0,262	-0,227	-0,196	-0,166	-0,139	-0,113	-0,089	-0,066

$\psi_K = 0,209$

m	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$\psi_{1k}$	0,490	0,455	0,423	0,393	0,365	0,339	0,315	0,292	0,271
$\psi_{2k}$	-0,281	-0,246	-0,214	-0,184	-0,156	-0,130	-0,106	-0,089	-0,062

$\psi_U = 0,217$

m	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$\psi_{1k}$	0,509	0,473	0,439	0,408	0,379	0,352	0,327	0,304	0,281
$\psi_{2k}$	-0,292	-0,301	-0,207	-0,191	-0,162	-0,135	-0,110	-0,087	-0,064

PŘÍLOHA 12 : HODNOTY MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ V PŘÍPADĚ DIFUZNÍ  
ZTRÁTY STABILITY PRO SESTROJENÍ DIAGRAMU NA

1. obr. 26

m	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$\psi_{1k}$	0,193	0,203	0,210	0,221	0,233	0,246	0,257	0,264	0,265
$\psi_{2k}$	-0,044	-0,034	-0,021	-0,005	+0,014	0,038	0,067	0,101	0,138

m	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$\psi_{1k}$	0,210	0,220	0,227	0,239	0,253	0,266	0,279	0,287	0,287
$\psi_{2k}$	-0,048	-0,037	-0,022	-0,005	+0,015	0,041	0,073	0,110	0,150

m	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$\psi_{1k}$	0,221	0,232	0,240	0,252	0,267	0,281	0,293	0,302	0,302

2. obr 29

m	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$\psi_{1k}$	0,225	0,236	0,244	0,257	0,271	0,286	0,299	0,307	0,309
$\psi_{2k}$	-0,045	-0,040	-0,024	-0,005	+0,016	0,044	0,078	0,118	0,161

3. obr 27

m	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$\psi_{1k}$	0,195	0,205	0,211	0,223	0,236	0,248	0,259	0,266	0,267
$\psi_{2k}$	-0,046	-0,036	-0,021	-0,005	+0,014	0,039	0,068	0,102	0,139

PŘÍLOHA 12 : pokračování

m	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$\psi_{1k}$	0,201	0,210	0,217	0,229	0,241	0,255	0,266	0,273	0,274
$\psi_{2k}$	-0,048	-0,035	-0,021	-0,005	+0,015	0,050	0,069	0,105	0,143

m	0,5	0,55	0,6	0,65	0,75	0,8	0,7	0,85	0,9
$\psi_{1k}$	0,210	0,220	0,227	0,239	0,266	0,279	0,253n	0,287	0,287
$\psi_{2k}$	-0,051	-0,037	-0,022	-0,005	+0,015	0,041	0,073	0,110	0,150

obr. 28

m	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$\psi_{1k}$	0,192	0,201	0,208	0,219	0,231	0,244	0,254	0,261	0,255
$\psi_{2k}$	-0,044	-0,034	-0,020	-0,005	+0,014	0,038	0,066	0,100	0,136

m	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$\psi_{1k}$	0,180	0,188	0,196	0,206	0,218	0,229	0,240	0,246	0,247
$\psi_{2k}$	-0,041	-0,034	-0,019	-0,004	+0,013	+0,035	0,063	0,094	0,163

m	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$\psi_{1k}$	0,187	0,197	0,203	0,214	0,225	0,238	0,249	0,256	0,248
$\psi_{2k}$	-0,043	-0,033	-0,020	-0,004	+0,014	0,037	0,065	0,098	0,134

PŘÍLOHA 13 : ODCHYLKY PŘETVOŘENÍ JEDNOTLIVÝCH ÚSEKŮ ZKUŠEB-  
NÍCH VZORKU  $\Delta\psi_{ui}$  OD PRUMĚRNÉ HODNOTY  $\psi_u$

VZOREK $\psi_u$	ODCHYLKY ÚSEKŮ <sup>o</sup>								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A2 $\psi_u=0,255$	-0,019	+0,004	-0,008	+0,001	+0,012	+0,018	+0,023	+0,019	+0,013
A3 $\psi_u=0,261$	-0,031	-0,026	-0,014	-0,002	+0,002	+0,020	+0,029	+0,024	+0,024
A4 $\psi_u=0,259$	-0,030	-0,023	-0,020	-0,001	+0,022	+0,025	+0,029	+0,026	+0,018
A5 $\psi_u=0,248$	-0,024	-0,018	-0,009	-0,002	+0,002	+0,011	+0,015	+0,023	+0,013
B3 $\psi_u=0,246$	-0,042	-0,020	-0,018	-0,002	-0,023	-0,003	+0,014	+0,030	-0,011
B4 $\psi_u=0,241$	-0,021	-0,023	-0,005	-0,021	+0,015	+0,007	-0,005	-0,022	+0,037
B5 $\psi_u=0,241$	-0,032	-0,019	-0,013	-0,016	-0,007	+0,004	+0,005	+0,017	+0,014
C2 $\psi_u=0,220$	-0,006	-0,008	-0,005	-0,010	+0,028	+0,011	+0,006	+0,013	+0,012
C3 $\psi_u=0,216$	-0,018	-0,010	-0,008	-0,012	+0,002	-0,003	0	+0,001	-0,001
C4 $\psi_u=0,216$	-0,015	-0,016	-0,010	0	-0,002	0	+0,029	-0,008	+0,009



## PŘÍLOHA 13 : Pokračování

VZOREK $\psi_u$	ODCHYLKY ÚSEKU <sup>o</sup>						
	10	11	12	13	14	15	16
A2 $\psi_{u=0,255}$	+0,018	+0,007	-0,001	-0,004	-0,009	-0,021	-0,019
A3 $\psi_{u=0,261}$	+0,022	+0,010	+0,004	-0,006	-0,012	-0,022	-0,024
A4 $\psi_{u=0,259}$	+0,018	+0,010	+0,002	-0,004	-0,014	-0,022	-0,025
A5 $\psi_{u=0,248}$	+0,017	+0,008	0	-0,004	0	-0,010	-0,016
B3 $\psi_{u=0,246}$	+0,021	+0,027	+0,024	+0,029	+0,003	-0,029	-0,005
B4 $\psi_{u=0,241}$	+0,025	+0,020	+0,023	-0,024	0	+0,011	-0,024
B5 $\psi_{u=0,241}$	+0,023	+0,014	+0,017	+0,009	-0,002	-0,006	-0,008
C2 $\psi_{u=0,220}$	+0,008	+0,009	+0,004	-0,009	-0,006	-0,028	-0,019
C3 $\psi_{u=0,216}$	+0,010	+0,005	+0,008	+0,009	+0,007	+0,006	+0,005
C4 $\psi_{u=0,216}$	+0,019	+0,020	+0,006	+0,002	+0,001	-0,013	-0,018