

Prof. Ing. Milan Forejt, CSc

# TEORIE TVÁŘENÍ

## Návody do cvičení

### SYLABUS

Magisterské studijní programy  
M2307-02, Strojírenská technologie Tváření, svařování  
M2303-01 Stavba výrobních strojů a zařízení, Obráběcí a tvářecí stroje  
Navazující magisterské studijní programy  
N2307-02 Strojírenská technologie, Tváření, svařování  
N2326-00 Výrobní technologie a průmyslový management

2.stupeň



Brno, říjen 2004 (2019)

## OBSAH

	strana
<b>Obsah</b>	2
<b>Osnova předmětu</b>	3
<b>Výpis kurzu VUT v Brně - karta předmětu hta</b>	4
<b>Studijní literatura</b>	6
<b>Vzor první strany a osnovy elaborátu</b>	7
<b>1.cvičení. Fyzikální základy plastické deformace</b>	8
<b>2.cvičení. Parametry tvařitelnosti</b>	9
<b>3.cvičení. Parametry tenzoru napjatosti</b>	13
<b>4.cvičení. Křivky přetvárného odporu</b>	15
<b>5.cvičení. Pěchování mezi rovnoběžnými rovinami</b>	21
<b>6.cvičení. Dopředné kvazistatické protlačování</b>	27
<b>7.cvičení. Zpětné protlačování</b>	37
<b>8.cvičení. Zápustkové kování</b>	46
<b>9.cvičení. Parametry ohýbání</b>	59
<b>10.cvičení. Hluboké tažení</b>	64
<b>11.cvičení. Metoda přetvárného odporu</b>	73
<b>12.cvičení. Běžné a přesné vystřihování</b>	78

**Poznámky:**

**Tato studijní opora je vhodná i pro cvičení v některých předmětech s obsahem technologie tváření v magisterském i bakalářském studiu. Dále je vhodnou oporou při zpracování magisterských i bakalářských projektů.**

**Případné nejasnosti a možné chyby v Návodech do cvičení je třeba odstranit v souladu s tematikou skript z teorie tváření viz studijní literatura [1] a [3]. Pro cvičení z předmětu je nutné používat novelizované verze Návodu do cvičení pro příslušný akad. rok.**

## TEORIE TVÁŘENÍ- HTA

### osnova přednášek a cvičení

pro 4. ročník (2.stupeň, 1.roč., v letním semestru akademického roku **20XX/20XX**  
skupiny 4o STG/1, 4o STG/2, 4o STG/3, 4o STM/12,

LS	Přednáška A5/ U4	Datum
1.	Úvodní přednáška , tvařitelnost	<b>1</b>
2.	Přetvárné odpory-křivky zpevnění I. a II. druhu	<b>2</b>
3.	Matem.teorie plasticity, shrnutí	
4.	Podmínky plasticity Analýza přetvoření Zákony tváření	<b>3</b>
5.	Pěchování, matem. modely	<b>4</b>
6.	Dopředné protlačování	<b>5</b>
7.	Zpětné protlačování	<b>6</b>
8.	Kování, zápusťkové kování	<b>7</b>
9.	Ohýbání nosníků a tenkých desek	<b>8</b>
10.	Tažení bez ztenčení stěny	<b>9</b>
11.	Stříhání a přesné stříhání	<b>10</b>
12.	Metody řešení tvářecích procesů	<b>11</b>
13.	Metody řešení tvářecích procesů	<b>12</b>
14.	Brífink ke zkušebním otázkám	<b>13</b>

LS	Cvičení A1/1614	LS	Datum
1.	Fyzikální podstata plast.deformace	<b>1</b>	
2.	Parametry tvařitelnosti	<b>2</b>	
4.	Křivky přetvárných odporů, přetvárné práce a rychlosti přetvoření	<b>3</b>	
5.	Pěchování dle Siebela a Unksova	<b>4</b>	
6.	Dopředné protlačování	<b>5</b>	
7.	Zpětné protlačování dle Dippera	<b>6</b>	
8.	Zápusťkové kování dle Tomlenova,	<b>7</b>	
9.	Ohýbací síly a odpružení	<b>8</b>	
10.	Hluboké tažení. Počet operací,	<b>9</b>	
11.	Běžné a uzavřené stříhání	<b>10</b>	
12.	Metoda přetvárných odporů	<b>11</b>	
13.	Dokončování elaborátů- Zápočty	<b>12</b>	
14.	Zápočty	<b>13</b>	

Hlavní důraz je kladen na porozumění podstaty matematického řešení tvářecích technologií a na osvojení metody inženýrského přístupu k řešeným problémům a na aplikace při závěrečném a diplomovém projektování.

**Každý student dostane ve cvičení osobní zadání. Opsané texty a kopírované-  
přejímané obrázky a výpočty se vrací k přepracování!!! Podmínkou zápočtu je  
přijetí všech zadaných elaborátů cvičícím (přednášejícím)! U zkoušky student mj.  
prokazuje, že rozumí postupům ve cvičení!!!!**

## Výpis kursu z karty předmětu HTA, FSI VUT v Brně

Karta předmětu **HTA**  
**Teorie tváření**

FSI VUT v Brně  
 Akademický rok: **20xx/20xx**

Garant: Prof. Ing. Milan Forejt, CSc  
 Garantující pracoviště: Ústav strojírenské technologie, odbor tváření kovů a plastů

### Anotace:

Základem komplexního, inženýrského řešení technologických procesů tváření je teorie plasticity a tváření se systémem počítačové podpory. Základní obsah předmětu, vychází z nejdůležitějších vybraných kapitol fyzikální podstaty plastické deformace, tvařitelnosti kovů a slitin, základů matem. teorie plasticity, analytických a experimentálně analytických metod teoretického řešení tvářecích procesů s počítačovou podporou. Předmět poskytuje základní vědomosti a schopnost matematického popisu tvářecích dějů při uplatnění fyzikálních, chemických, mechanických a termodynamických principů přechodu kovových těles z elastického do plastického stavu a při jejich plast.přetváření do požadovaného tvaru. Stanovuje zatížení tvářecích nástrojů, strojů, provádí analýzu přetvoření, určuje kritické hodnoty a poskytuje úvod do modelování procesů tváření, za účinné počítačové podpory na síti FORM.

### Cíl:

Hlavním cílem předmětu "Teorie tváření" je vybavit studenty teoretickým základem a metodikou k řešení technologií tváření na fyzikálních principech plastické deformace a na teorii plasticity. Úkolem předmětu je studentům poskytnout znalosti, které jsou nezbytné pro tvůrčí a komplexní inženýrské řešení technologií tvářecích procesů.

### Získané znalosti a dovednosti:

Předmět TEORIE TVÁŘENÍ umožňuje studentům získat potřebné vědomosti ke zjednodušeným matematickým popisům tvářecích dějů při uplatnění fyzikálních, chemických, mechanických a termodynamických principů změny kovových těles z elastického do plastického stavu a dále při jejich plastickém přetváření do požadovaného tvaru. Student se naučí stanovit zatížení tvářecího nástroje, stroje a určit kritické hodnoty přetvoření.

### Hodinová dotace:

Přednáška 13 x 2 hod.  
 laboratoře a at. 13 x 2 hod.

### Osnova:

1. Fyzikální podstata tvárné deformace. Tvařitelnost kovů a slitin.
2. Přetvárné odpory, vliv základních parametrů. Přetvárná práce a síla.
3. Shrnutí základů matematické teorie plasticity.
4. Podmínky vzniku plastické deformace. Analýza procesu přetvoření.
5. Pěchování mezi rovnoběžnými rovinami, Siebelovo a Unksovo řešení.
6. Dopředné protlačování, rozbor napjatosti a přetvoření.
7. Zpětné protlačování.
8. Volné a zápusťkové kování.
9. Ohýbání nosníků a tenkých desek. Zakružování.
10. Hluboké tažení, napjatost a přetvoření.
11. Volné a uzavřené stříhání, přesném stříhání.
12. Analytické metody řešení tvářecích procesů.
13. Experimentálně analytické metody řešení tvářecích procesů.

### Přednášky

<b>Cvičení</b>	1. Otázky z fyzikální podstaty plastické deformace, ukázky.	protokol.
	2. Vyhodnocení parametrů přetvoření, rychlosti přetvoření.	protokol.
	3. Vyhodnocení křivek přetvárných odporů z experimentů.	protokol.
	4. Výpočty deformačních odporů a sil při pýchování.	protokol.
	5. Napjatost a síly při dopřed. protlačování.	protokol.
	6. Napjatost a síly při zpětném protlačování.	protokol.
	7. Zápustkové kování, výpočet kovacíh sil.	protokol.
	8. Výpočet ohýbacích sil a odpružení.	protokol.
	9. Napjatost, síly a počet tažných operací.	protokol.
	10. Vyhodnocení napjatosti a přetvoření na výtažku.	protokol.
	11. Napjatosti při běžném a přesném střihání.	protokol.
	12. Metoda přetvárných odporů.	protokol.
	13. Dokončení protokolů, závěr cvičení.	zápočet.

### Vymezení kontrolované výuky a způsob jejího provádění a formy nahrazování zameškané výuky:

#### Podmínky udělování zápočtů, forma zkoušek a způsob a pravidla výsledné klasifikace předmětu:

Podmínky udělení zápočtu: prezenze ve cvičení, vypracování a přijetí všech protokolů na samostatná zadání ve cvičení. Pokud tuto podmínku student nesplní, může učitel v odůvodněných případech zadat náhradní programy cvičení. **Zkouška je veřejná a prověřuje znalosti ze tří základních okruhů předmětu, tj.:**

- 1) fyzikální podstaty plastické deformace a tvařitelnosti kovů a slitin,
- 2) matematické teorie plasticity,
- 3) metod řešení tvářecích procesů.

Ústní zkouška je vykonána po předběžné písemné přípravě k vytažené komplexní otázce se třemi podotázkami, ze základních okruhů předmětu. Hlavní důraz je kladen na pochopení metody řešení a na schopnosti aplikace známých analytických a experimentálně-analytických modelů výpočtu.

#### Literatura:

##### základní

1. **ASM handbook**. Vol 14A Metalworking: Bulk Forming. Materials Park, Ohio: ASM International, 2005. ISBN 0-87170-708-x.
2. **LANGE, Kurt. Handbook of Metal Forming**. New York: McGraw-Hill, c 1985. ISBN 0-07-036285-8
3. **MIELNIK, Edward M. Metalworking science and engineering**. New York: McGraw-Hill, c1991. ISBN 0-07-041904-3.

##### doporučená

- 1 **FOREJT, Milan. Teorie tváření**. Vyd. 2., Brno, Akademické nakladatelství CERM. 2004. ISBN 80-214-2764-7.
2. **STOROŽEV, Michail, V. a Jevgenij. A.-POPOV. Překlad Karol POLÁK. Teória tvárnenia kovov**. 1.vyd. ALFA Bratislava/SNTL Praha, 1978. MDT 621.77.001.1
- 3 **FARLÍK Alois a Emanuel ONDRÁČEK. Teorie dynamického tváření**. sv.6137. Praha: SNTL, 1968, 315 s., DT 621.7.014

Předmět bývá zařazen v následujících studijních programech:									
Program	Forma	Obor	Specializace.	Typ ukončení	Kredity	Povinnost	St.	Roč.	Semestr
M2301-5 N2301-2	prezenční studium	M2307-02 N2307-02 Strojírenská technologie	02 Tváření a svařování	z, zá	6	povinný	2	1	L
N2301-3	prezenční studium	N2326-00 Výrobní technologie a průmyslový management. bez zaměření zk, zá 6 povinně volitelný 2 1 ZS							
N2301-3	kombinované studium	N2326-00 Výrobní technologie a průmyslový management zk, zá 6 povinně volitelný 2 1 ZS							

## Osnova "Teorie tváření" HTA-K 4m STG/16 a 17 pátek A1/1644 LS 20XX , 9. až 14. týden, 8:00 až 10:50 h

### Dle karty HTA-K

1. Fyzikální podstata tvárné deformace. Tvařitelnost kovů a slitin.
2. Přetvárné odpory, vliv základních parametrů. Přetvárná práce a síla.
3. Shrnutí základů matematické teorie plasticity. Dílčí teorie.
4. Podmínky vzniku plastické deformace. Analýza procesu přetvoření.
5. Analytické a experiment. analytické metody řešení tvářecích procesů.
6. Pěchování mezi rovnoběžnými rovinami, Siebelovo a Unksovo řešení.
7. Dopředné protlačování, rozbor napjatosti a přetvoření.
8. Zpětné protlačování, řešení podle Dippera Sachse a Siebela.
9. Zápusťkové kování, podle Tomlenova, Gubkina, Gelei a Storoževa.
10. Ohýbání tenkých prutů a širokých pásů. Zakružování.
11. Hluboké tažení, napjatost a přetvoření, výpočet dle Sachse a Šofmana.
12. Metoda přetvárných odporů. Teorie malých pružně-plast. deformací.
13. Napjatost při volném a uzavřeném stříhu a při přesném stříhání.

### Konzultace v pátek

#### 1. 8:00-10:50

1. Fyzikální podstata tvárné deformace. Tvařitelnost kovů a slitin.
2. Přetvárné odpory, vliv základních parametrů. Přetvárná práce a síla.

#### 2. 8:00-10:50

3. Shrnutí základů matematické teorie plasticity. Dílčí teorie.
4. Podmínky vzniku plastické deformace. Analýza procesu přetvoření.
5. Analytické a experiment. analytické metody řešení tvářecích procesů.

#### 3. 8:00-10:50

6. Pěchování mezi rovnoběžnými rovinami, Siebelovo a Unksovo řešení.
7. Dopředné protlačování, rozbor napjatosti a přetvoření.

#### 4. 8:00-10:50h

8. Zpětné protlačování, řešení podle Dippera Sachse a Siebela.
9. Zápusťkové kování, podle Tomlenova, Gubkina, Gelei a Storoževa.

#### 5. 8:00-10:50h

10. Ohýbání tenkých prutů a širokých pásů. Zakružování.
11. Hluboké tažení, napjatost a přetvoření, výpočet dle Sachse a Šofmana.

#### 6. 8:00-10:50h

12. Metoda přetvárných odporů. Teorie malých pružně-plast. deformací.
13. Napjatost při volném a uzavřeném stříhu a při přesném stříhání.

### Souhrnné cvičení 5. HTA-K

#### **PĚCHOVÁNÍ MEZI ROVNOBĚŽNÝMI ROVINAMI, řešení podle SIEBELA a UNKSOVA.**

Zadání:

Pro soubor zadání Ax proveďte výpočet normálových a smykových napětí na čelní ploše válcového polotovaru pěchovaného mezi tuhými rovnoběžnými rovinami pro konečné spēchování. Graficky znázorněte průběh napětí  $\sigma_r$ ,  $\sigma_z$  a  $\tau_{rz}$  podle SIEBELA a UNKSOVA.

Pro stanovení a výpočty použijte přetvárné odpory a pěchovací sílu dle výstupů z měření. U zadaného souboru dopočítejte kritéria pro jednotlivé kroky spēchování a proveďte testování přítomnosti pásem podle Unksova.

## Studijní literatura:

### Povinná studijní literatura:

[1] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2., Brno, Akademické nakladatelství CERM. 2004. ISBN 80-214-2764-7.

[2] FOREJT, M. *Teorie tváření, Návody do cvičení*. Studijní opora FSI VUT, říjen 2004 (novela 2020)

### Další doporučená studijní literatura:

[3] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9. ( dotisk 2008, 2012, 2015, 2018)

[4] FOREJT, Milan. *Teorie tváření a nástroje: Učeb. texty*. Brno: Na. VUT, 1991, 187 s. ISBN 80-214-0294-6.

### Ostatní studijní literatura:

[5] MARCINIAK Zdzislaw. *Teorie tváření plechů*.sv 5029. Překlad Věslav JANDURA. Praha: SNTL, 360 s., 1964, DT 621.777.001

[7] PETRUŽELKA, Jiří. *Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000. ISBN 80-7078-635-3.

[8] FARLÍK Alois a Emanuel ONDRÁČEK. *Teorie dynamického tváření*.sv.6137.Praha: SNTL, 1968, 315 s., DT 621.7.014

[9] THOMSEN, Erich G., Charles T. YANG a Shiro KOBAYASHI. *Mechanika plastičeských deformací při obrábění kovů: Mechanics of plastic deformation in metal processing*. Překlad E.P.UNKSOVA. Moskva: Mašinstrojenie, 1968, 504 s. UDK 621.73.011.

[10] MENDELSON, A.: *Plasticity. Theory and Application*. 2.printing, National Aeronautics and Space

[11] BAREŠ, Karel. *Lisování: Strojírenská literatura*. 6870. Praha: SNTL, 1971, 544 s. DT 621.979.

[12] SMIRNOV-AJAEV, Georgij A. *Soprotivlenie materiálov plastičeskomu deformirovaniju: Inženernye razčoty procesov koněčno formoizmenenia materialov*. Překlad E.P.UNKSOVA. Leningrad: Mašinstrojenie, 1978, 368 s., UDK 539.374

[13] *ASM handbook. Vol 14A Metalworking: Bulk Forming*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2005. ISBN 0-87170-708-x.

[14] BILLIGMANN, J.-FELDMANN, H.D.: *Stauchen und Presen*. München, 1973

[15] LANGE, H.: *Lehrbuch der Umformtechnik*. Band 1., 2. a 3., Berlin-New York, 1972, 1974, 1975

[16] DRASTÍK, F.-EFLMARK, J. a kol.: *Plastometry a tvařitelnost kovů*. SNTL Praha, 1977

[17] STOROŽEV, Michail, V. a Jevgenij. A.-POPOV. Překlad Karol POLÁK. *Teória tvárnenia kovov*. 1.vyd. ALFA Bratislava/SNTL Praha, 1978. MDT 621.77.001.1

[18] JOHNSON, W. and P.B.MELLOR. *Engineering plasticity*. London, 1973, (překlad do ruštiny OVČINIKOV, A.G.: *Teoria plastičnosti dlja inženěrov*. Mašinstrojenije Moskva, 1979) YDK 621.7.011

[19] EVSTRATOV, V. A. *Teorija obrabotki metallov davlenijem*. Vyšča škola Charkov 1981. YDK 621.77.001

[20] UNKSOV, E. P. a Alexander, G.OVČINIKOV. *Teorija plastičeských deformací kovů*. Mašinstrojenije Moskva, 1983. YDK 621.73

[21] BLAŠČÍK, František a Karel POLÁK. *Teoria tvárnenia*. 1.vyd. ALFA Bratislava/SNTL Praha, 1985

[22] LANGE, Kurt. *Handbook of Metal Forming*. New York: McGraw-Hill, c 1985. ISBN 0-07-036285-8 Hamburg, 1985, ISBN 0-07 036285-8

[23] LANGE, Kurt. *Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft: Band 1: Grundlagen*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1984. ISBN 3-540-13249-x.

[24] LANGE, Kurt. *Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft: Band 2: Massivumformung*. 2.Aufl. Berlin: Springer, 1988. ISBN 3-540-17709-4.

[25] MIELNIK, Edward M. *Metalworking science and engineering*. New York: McGraw-Hill, c1991. ISBN 0-07-041904-3.

[26] HRIVŇÁK, Andrej, Michal PODOLSKÝ a Vuko DOMAZETOVÍČ. *Teória tvárnenia a nástroje*. Bratislava: Alfa, 1992. ISBN 80-05-01032-X.

[27] DRASTÍK, František a J.EFLMARK, J. a kol. *Plastometry a tvařitelnost kovů*. SNTL Praha, 1977. DT 539.214.07

## Vzor první strany a osnovy protokolu

Ústav strojírenské technologie FSI VUT v BRNĚ Odbor tváření kovů a plastů Akad. rok 20xx/20xx ZS	NÁZEV CVIČENÍ Číslo cvičení	Jméno, příjmení Ročník Studijní skupina
<p>Zadání:</p>          <p>Výpočtový model: <i>Geometrický model</i> <i>Materiálový model</i> <i>Matematický model</i></p> <p>Výpočty- výsledky:</p>  <p>Hodnocení výsledků</p>  <p>Závěry:</p> <p style="text-align: right;"><i>Datum a podpis</i></p>  <p>Přílohy:</p>		



## 1.cvičení

### FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY PLASTICKÉ DEFORMACE

#### Zadání:

Vypracujte stručné a výstižné odpovědi na následující otázky a doplňte je potřebnými náčrty.

1. Znázorněte a popište monokrystalickou a polykrystalickou stavbu kovů a slitin.
2. Jaké poruchy v kovových krystalech známe a které z nich se významně podílí na plastické deformaci a proč?
3. Co jsou to dislokace? Znázorněte dislokaci hranovou, šroubovou a smíšenou pomocí Burgersova vektoru.
4. Vysvětlete mechanismy vzniku dislokací.
5. Jaký je vztah mezi kluzovým napětím a hustotou dislokací ?
6. Znázorněte vznik pružných a plastických deformací kluzem a dvojčatěním.
7. Nejdůležitější podmínky - zákony kluzu z hlediska stavby krystalografické mřížky.
8. Proč plastická deformace nastává kluzem ve směru smykového napětí ( $\tau_{\max} = \tau_{\text{krit}}$ ) ?
9. Proč skutečné skluzové napětí je podstatně menší než teoretické?
10. Znázorněte a popište vznik a postup plastické deformace polykrystalů.
11. Čím je způsobeno deformační zpevnění?
12. Znázorněte závislosti změn mechanických vlastností ( $R_m$ ,  $R_e$ ,  $A_5$ ) na stupni deformace-přetvoření.
13. Popište význam a postup rekrytalizačního žhání a nakreslete příslušné rekrytalizační diagramy.

## 2.cvičení

**PARAMETRY TVAŘITELNOSTI****Zadání:**

1. Stanovte poměrné a logaritmické přetvoření pro jednotlivé operace zadaného technologického postupu.

\*\*\*

2. Vypočtete a graficky znázorněte rychlost přetvoření jako funkci stlačované výšky pěchovaného válce na hydraulickém lisu z počáteční výšky  $h_o = 600$  mm na konečnou výšku  $h_k = 100$  mm.

Výpočet proved'te po minimálním kroku  $\Delta h = 50$  mm a pro rychlost pohybu pěchovníku

$v = \text{mm.s}^{-1}$ . Dále stanovte střední rychlost přetvoření  $\dot{\phi}_{\text{stř}}$  a vynesete ji do grafu průběhu rychlosti přetvoření.

\*\*\*

3. Vypočtete a graficky znázorněte rychlost přetvoření pro kování válcového polotovaru na

bucharu. Rychlost pohybu beranu je definována rovnicí paraboly  $v^2 = \frac{v_o^2}{h_o - h_k} (h_o - h_k - \Delta h)$ ,

$h_o = 220$  mm,  $h_k = 100$  mm, krok  $\Delta h_i = 20$  mm,  $v_o = \text{ms}^{-1}$ .

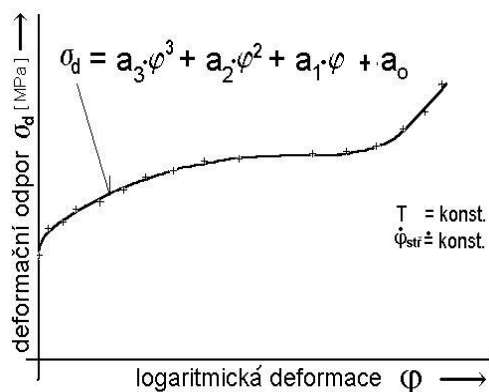
Graficko-analyticky stanovte a vykreslete střední hodnotu rychlosti přetvoření  $\dot{\phi}_{\text{stř}}$ .

## Příklad tabulky dílčích zadání rychlostí pohybu beranu

Zadání	Hydraulický lis	Buchar	Příjmení ,jméno
	[ mm.s <sup>-1</sup> ]	[ m.s <sup>-1</sup> ]	
1.	50	4,0	
2.	60	4,2	
3.	70	4,6	
4.	80	4,8	
5.	90	5,0	
6.	100	5,2	
7.	110	5,4	
8.	120	5,8	
9.	130	6,0	
10.	140	6,2	
11.	150	6,4	
12.	160	6,8	
13.	170	7,0	
14.	180	7,2	
15.	190	7,4	

**1. úloha.** Stanovte poměrné a logaritmické přetvoření pro jednotlivé operace zadaného technologického postupu.

Změny logaritmických přetvoření jsou dle závislosti napětí-deformace doprovázeny konkrétními hodnotami deformačního odporu, jak je zřejmé z křivky zpevnění.



V zásadě vycházíme ze zákona nestlačitelnosti kovových materiálů, který je obecně definován nulovým součtem normálních nebo hlavních složek logaritmických přetvoření. Prakticky to znamená že, objem tělesa před a po přetvoření je stejný.

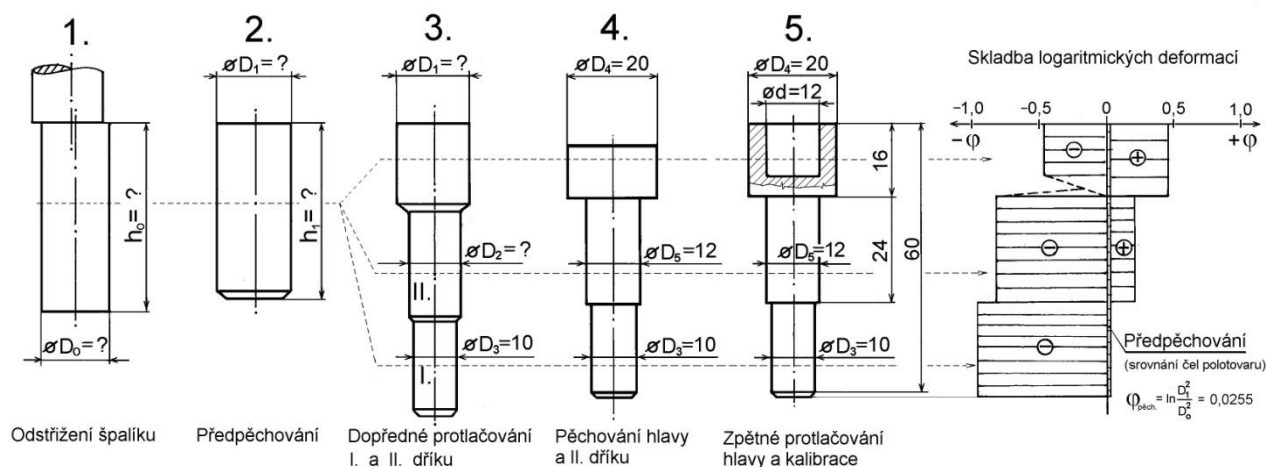
$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$$

← Křivka zpevnění

### Příklad postupu optimalizace

Postup optimalizace geometrických charakteristik přetvoření na navrženém postup výroby součásti se dvěma dříky a hlavou s vnitřní dutinou, který sestává z těchto operací:

1. operace stříhání,
2. operace srovnání čel- předpěchování,
3. operace dopředné protlačování I. a II. dříku
4. operace pěchování hlavy
5. operace zpětného protlačování hlavy a kalibrace



### Technologický postup výroby čepu se dvěma dříky

Z obrázku je zřejmé že, průřezové charakteristiky se větví do tří konečných tvarů u nichž očekáváme vyrovnané konečné hodnoty přetvoření

$$\varphi_{\text{pěch. hlavy}} + \varphi_{\text{protl. hlavy}} = \varphi_{\text{protl. dříku II}} + \varphi_{\text{pěch. dříku II}} = \varphi_{\text{protl. dříku I}}$$

po dosazení jednotlivých geometrických charakteristik obdržíme dvě navazující rovnice

$$\ln \frac{D_4^2}{D_1^2} + \ln \frac{D_4^2}{D_4^2 - d^2} = \ln \frac{D_1^2}{D_2^2} + \ln \frac{D_5^2}{D_2^2} = \ln \frac{D_1^2}{D_3^2}$$

úpravou odlogaritmováním a logickým postupem matematické úpravy první rovnice obdržíme

$$D_1^4 = \frac{D_2^4 \cdot D_4^4}{D_5^2 (D_4^2 - d^2)} \quad \text{a podobně u druhé rovnice} \quad D_3^2 = \frac{D_2^4}{D_5^2} \quad \text{a dosazením do první}$$

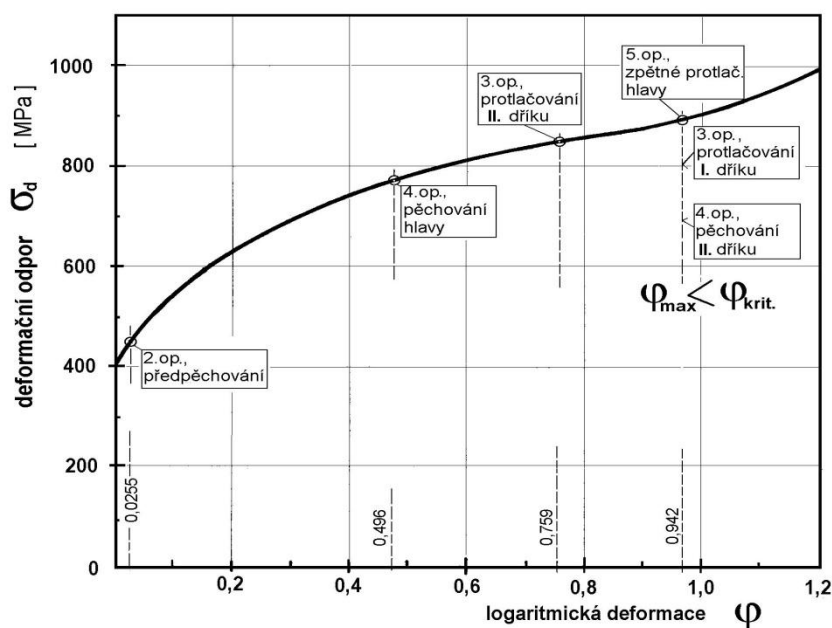
úpravy obdržíme konečný výraz pro výpočet průměru výchozího polotovaru  $D_1$ .

$$D_1 = D_4 \sqrt[4]{\frac{D_3^2}{D_4^2 - d^2}} = 20 \sqrt[4]{\frac{10^2}{20^2 - 12^2}} = \underline{\underline{15,81 \text{ mm}}}$$

Průměr II. díku  $D_2$  pak vypočteme z druhé rovnice.

$$D_2 = \sqrt[4]{(D_3^2 \cdot D_5^2)} = \sqrt[4]{(10^2 \cdot 12^2)} = \underline{\underline{10,95 \text{ mm}}}$$

Zpravidla se ustřížený polotovar podává do 2. pýchovací operace ve které se provede srovnání čel ústřížku předpýchováním celého objemu z průměru  $\varnothing D_0$  na průměr  $\varnothing D_1$ , případně s úpravou středícího důlku. Z postupu na obrázku lze vyvodit že, tato hodnota logaritmické deformace je velmi malá, jak je zřejmé i z následující křivky napětí deformace, ze které je především vidět jak narůstají hodnoty deformačního odporu až do maximální hodnoty přetvoření (logaritmické deformace)  $\varphi_{\max} = 0,916$  ve všech objemech součásti (hlavy, I. a II. díku). Toto největší přetvoření nesmí přesáhnout kritickou hodnotu logaritmické deformace,  $\varphi_{\max} < \varphi_{\text{krit}}$ , při které nastávají počátky porušení spojitého kontinua materiálu.



Křivka napětí deformace  $\sigma_d - \varphi$ , vývoj zpevnění v jednotlivých operacích

## Závěr

Optimální skladbou změny tvaru tvářeného tělesa v jednotlivých operacích lze docílit vyrovnaných hodnot přetvoření ve všech tvářených objemech.

### LITERATURA související s tímto cvičením

- [1] BABOR,K.-CVILINEK,A-FIALA,J.: Objemové tváření ocelí. SNTL Praha 1967
- [2] ŠACHPAZOV, Ch., S. a kol.: Proizvodstvo metizov. Metallurgia Moskva 1977
- [3] LANGE,K.: Handbook of Metal Forming. 1<sup>st</sup> ed. New York, London, Hamburg, McGraw-Hill Book Comp. 1985. pp1236 . Edit. Kurt Lange. ISBN 0-07 036285-8
- [4] MIELNIK,E.M. Metalworking Science and Engineering. McGraw-Hill, Inc. New York, London, Hamburg 1991, pp 976, ISBN 0-07-041904-3
- [5] FOREJT, M.: Teorie tváření. FSI VUT Brno. **2. vydání**. Akad. nakl.CERM, listopad 2004, ISBN 80-214-2764-7 ( FOREJT,M.: Teorie tváření. 1. vydání FS VUT Brno, duben 1992)
- [6] FOREJT, M. Teorie tváření, Návody do cvičení. Studijní opora FSI VUT, říjen 2004 (**novela 2020**)
- [7] FOREJT,M., KRÁSNÝ,D., POKORNÝ, J.. Technologie objemového tváření přesných součástí. Cold forming technology of precise machine components. In METAL 2004 Hradec nad Moravicí. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Metalurgical & Materials Conference, Symposium B.* 1<sup>st</sup> ed. Ostrava, TANGER, TU-VŠB and CSNMT, Ostrava, May 18 - 20. 2004. Volume 1. p 155/1-155/5. CD ROM, ISBN 80-85988-95-X.
- [8] FOREJT,M.: Příspěvek k optimalizaci zpevnění přesných objemově tvářených součástí. On the optimization of hardening of accurate bulk cold formed components., In FOREJT, M. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Intern.Conference Forming Technology, Tools and Machines, FORM 2004.* 1<sup>st</sup> ed. Brno, Brno University of Technology Departement of Metal Forming September 21-22, 2004.vol. 1. p 31 -34. ISBN 80-86607-11-9..

### 3.cvičení

## PARAMETRY TENZORU NAPJATOSTI

#### Zadání:

Je dán tenzor napjatosti v bodě tvářeného tělesa  $\mathbf{T}_\sigma$  s hodnotami napětí dle tabulky čísla zadání. Určete invarianty tenzoru napjatosti  $\mathbf{I}_1^\sigma, \mathbf{I}_2^\sigma, \mathbf{I}_3^\sigma$ , invarianty deviátoru napjatosti  $\mathbf{I}_{D1}^\sigma, \mathbf{I}_{D2}^\sigma, \mathbf{I}_{D3}^\sigma$ , střední napětí  $\sigma_s$ , efektivní napětí  $\sigma_{ef}$ , hlavní napětí  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , maximální smykové napětí  $\tau_{max}$ . Nakreslete grafické schéma napjatosti a Peřczyňského hvězdičci.

$$\mathbf{T}_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix}$$

Tabulka dílčích zadání

Číslo zadání	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{xz}$	Příjmení, jméno
	Nmm <sup>-2</sup>						
1.	45	-27	90	4,5	27	-36	
2.	70	20	-30	20	-40	10	
3.	55	20	-30	20	-40	10	
4.	70	30	-15	15	-18	-10	
5.	75	20	-30	20	-40	10	
6.	60	35	-25	20	-20	-20	
7.	65	20	-20	20	-20	-15	
8.	60	35	-25	20	-20	-20	
9.	70	30	-50	15	-18	-10	
10.	65	40	-20	20	-25	-15	
11.	45	20	-30	20	-40	10	
12.	50	20	-30	20	-40	10	

### Výpočtový model- *matematický model*, [1], [2]

Pro složky hlavních napětí  $\sigma_n$  rozvedeme determinant soustavy pro deviator napjatosti  $\mathbf{D}_s = \mathbf{0}$  sestavený z koeficientů při neznámých směrových kosinech  $\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 = 1$  a obdržíme charakteristickou kubickou rovnici tenzoru napjatosti .

$$(\sigma_n - \sigma_s)^3 - I_{1D}^\sigma (\sigma_n - \sigma_s)^2 - I_{2D}^\sigma (\sigma_n - \sigma_s) - I_{3D}^\sigma = 0$$

Jelikož první invariant deviatoru napjatosti je roven nule

$$I_{1D}^\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 - 3\sigma_s = 0 \quad \text{a} \quad \sigma_s = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3),$$

pak se kubická rovnice zjednoduší a její řešení v trigonometrické formě bude

$$(\sigma_n - \sigma_s) = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{I_{2D}^\sigma} \cdot \cos\left(\beta_\sigma + \frac{2}{3}k\pi\right) \quad \text{kde} \quad \cos 3\beta_\sigma = \frac{9}{2\sqrt{3}} \frac{I_{3D}^\sigma}{\sqrt{(I_{2D}^\sigma)^3}}.$$

Ukazatel schématu napjatosti je ohraničen intervalem  $\beta_\sigma \in <0; 60^\circ >$  a parametr  $k$  pro hodnoty 0; 1 a 2 určuje vždy jedno ze tří hlavních napětí. Při použití rovnice pro efektivní napětí

$$\sigma_{ef} = \sqrt{3I_{2D}^\sigma} \quad \text{bude kubická rovnice ve tvaru}$$

$$(\sigma_n - \sigma_s) = \frac{2}{3}\sigma_{ef} \cdot \cos\left(\beta_\sigma + \frac{2}{3}k\pi\right) \quad \text{pro} \quad \cos 3\beta_\sigma = \frac{27}{2} \frac{I_{3D}^\sigma}{\sigma_{ef}^3} \quad \text{a}$$

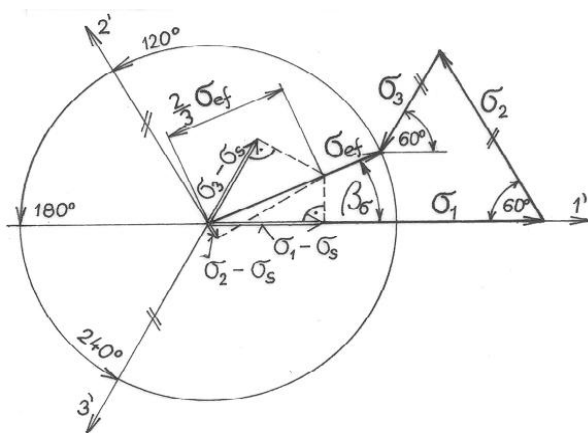
parametrické rovnice pro složky hlavních napětí

$$(\sigma_1 - \sigma_s) = \frac{2}{3}\sigma_{ef} \cdot \cos(\beta_\sigma) \quad k = 0$$

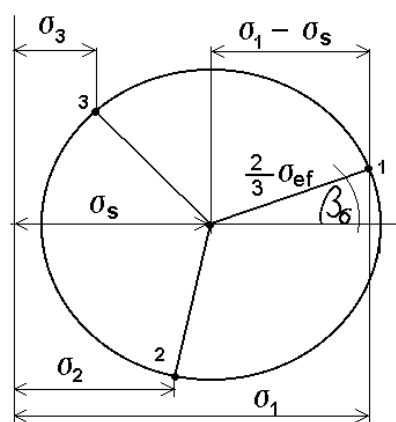
$$(\sigma_2 - \sigma_s) = \frac{2}{3}\sigma_{ef} \cdot \cos\left(\beta_\sigma + \frac{2}{3}\pi\right) \quad k = 1$$

$$(\sigma_3 - \sigma_s) = \frac{2}{3}\sigma_{ef} \cdot \cos\left(\beta_\sigma + \frac{4}{3}\pi\right) \quad k = 2$$

Známe-li všechny obecné složky napjatosti, potom můžeme stanovit veškeré invariantní charakteristiky. Ostatní potřebné vztahy jsou uvedeny v [1] nebo v [2].



Grafické schéma napjatosti



Peřczyňského hvězdice

## 4. cvičení

### KŘIVKY PŘETVÁRNÉHO ODPORU

#### Zadání:

Z výsledků pēchovacích zkoušek vālcového polotovaru a ze záznamu průběhu tvāřecí síly  $F$  [kN] v závislosti na spēchování  $\Delta H$  [mm] a hodnot naměřených časů, provedte vyhodnocení křivek;

deformačního odporu  $\sigma_d = \sigma_d(\varphi)$ ,

měrné přetvárné práce  $A_J = A_J(\varphi)$  a

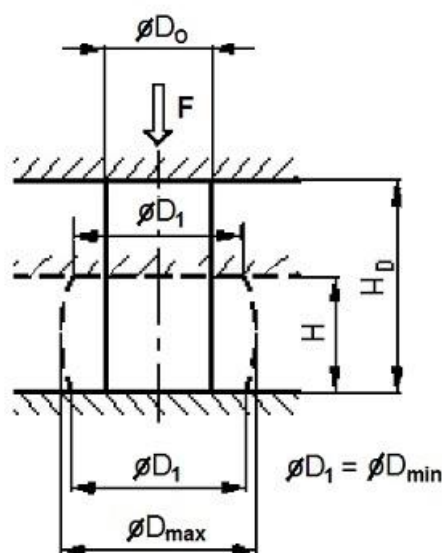
křivky rychlosti přetvoření  $\dot{\varphi} = \varphi(\varphi)$  pro zadané parametry:

- ocel **16 341. X**
- rozměry vālcového vzorku  $\phi D_0$ ,  $H_0$ ,
- hydraulický lis **CZR 600** a
- pēchovací teplotu dle tabulky.

Pēchovací zkoušky byly provedeny na hydraulickém lisu CZR 600. Pro měření tvāřecí síly byl použit tenzometrický siloměr typu **RA/Mp** a drāha přetvoření byla snímána inдукtivním snímačem drāhy **W50**. Snímače byly zapojeny na dynamický měřící zesilovač **KWS/6A-5** firmy Hottinger s výstupem na souřadnicový zapisovač **BAK 4T**. Schéma měření a metodika vyhodnocení jsou uvedeny dále.

Na základě tabulkových hodnot a parametrů statistiky volte nejvhodnější matematické vyjádření uvedených závislostí (do stupně polynomu 6). Pro křivky deformačních odporů ( $\sigma - \varphi$ ) jsou vhodné liché stupně polynomů.

#### Geometrický model pēchovaného vzorku





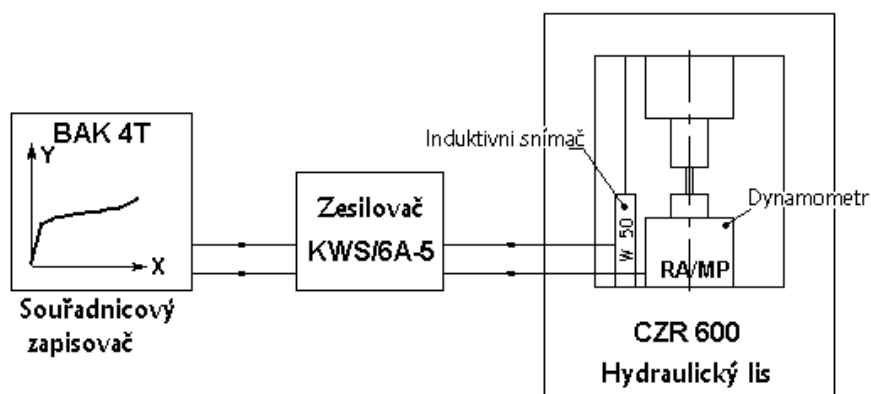
## Příklad tabulek dílčích zadání

Ocel 12024.1, $D_o' = 15,08$ , $H_o = 24,93$ , Hydraulický lis CZR 600			
Soubor zadání	Teplota °C	Studijní skupina	Jméno , příjmení
A1	25		
A2	100		
A3	200		
A4	300		
A5	400		
A6	500		
A7	600		
A8	700		
A9	750		

Ocel 12024.3, $D_o = 15,00$ , $H_o = 25,03$ , Hydraulický lis CZR 600			
Soubor zadání	Teplota °C	Studijní skupina	Jméno , příjmení
A10	25		
A11	100		
A12	200		
A13	300		
A14	400		
A15	500		
A16	600		
A17	700		
A18	750		

Ocel 15230.3, $D_o = 15,036$ , $H_o = 23,845$ , Hydraulický lis CZR 600			
Soubor zadání	Teplota °C	Studijní skupina	Jméno , příjmení
A28	25		
A29	100		
A30	200		
A31	300		
A32	400		
A33	500		
A34	600		
A35	700		
A36	750		

Schéma zapojení:

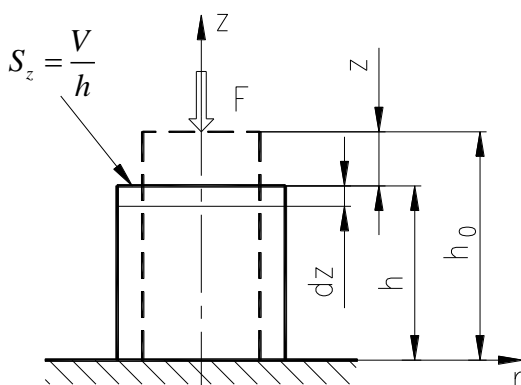


### Materiálový model

Ocel se zadaným souborem experimentálních výsledků (dle tabulky zadání)

### Matematický model

Přetvárná síla je definována deformačním přetvárným odporem na čelní ploše v dotyku s nástrojem.



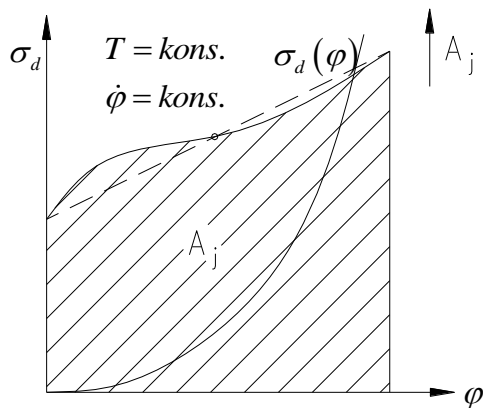
$$F_z = \sigma_d \cdot S_z$$

Práce síly  $F_z$  na celkové dráze je definována výrazem

$$A = \int_0^z \sigma_d \cdot S_z \cdot dz = \int_0^z \sigma_d \cdot \frac{V}{h} \cdot dz,$$

kde  $d\varphi = \frac{dz}{h}$  a po úpravě obdržíme

$$A = V \cdot \int_0^\varphi \sigma_d \cdot d\varphi \quad [J]$$



Vztah pro práci můžeme vyjádřit i pomocí součinitele plnosti  $\lambda$  dle grafu.

$$A = V \cdot \lambda \cdot \sigma_d \cdot \varphi \quad [J]$$

Měrná přetvárná práce je vztažena na jednotku objemu a představuje plochu pod křivkou  $\sigma_d(\varphi)$ .

$$A_j = \frac{A}{V} = \int_0^\varphi \sigma_d \cdot d\varphi \quad [J \cdot mm^{-3}]$$

### Příklad výpočtů pro jeden zvolený soubor

Výpočet průběhu měrné přetvárné práce numerickou integrací plochy pod křivkou napětí deformace:  $\sigma_d \approx \sigma_p(\varphi)$

$$\Delta A_1 = \sigma_{dstř1} \cdot \Delta\varphi_1 = 671,3MPa \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 0,1343 J \cdot mm^{-3}$$

$$\Delta A_2 = \sigma_{dstř2} \cdot \Delta\varphi_2 = 882,1MPa \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 0,1764 J \cdot mm^{-3}$$

$$\Delta A_3 = \sigma_{dstř3} \cdot \Delta\varphi_3 = 1009,6MPa \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 0,2019 J \cdot mm^{-3}$$

$$\Delta A_4 = \sigma_{dstř4} \cdot \Delta\varphi_4 = 1079,6MPa \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 0,2159 J \cdot mm^{-3}$$

$$\Delta A_5 = \sigma_{dstř5} \cdot \Delta\varphi_5 = 1116,0MPa \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 0,2232 J \cdot mm^{-3}$$

$$\Delta A_6 = \sigma_{dstř6} \cdot \Delta\varphi_6 = 1142,5MPa \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 0,2285 J \cdot mm^{-3}$$

$$\Delta A_7 = \sigma_{dstř7} \cdot \Delta\varphi_7 = 1184,2MPa \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 0,2368 J \cdot mm^{-3}$$

$$\Delta A_8 = \sigma_{dstř8} \cdot \Delta\varphi_8 = 1242,9MPa \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 0,1316 J \cdot mm^{-3}$$

$$A_j = \sum_{i=1}^8 \Delta A_i = 1,5486 J \cdot mm^{-3}$$

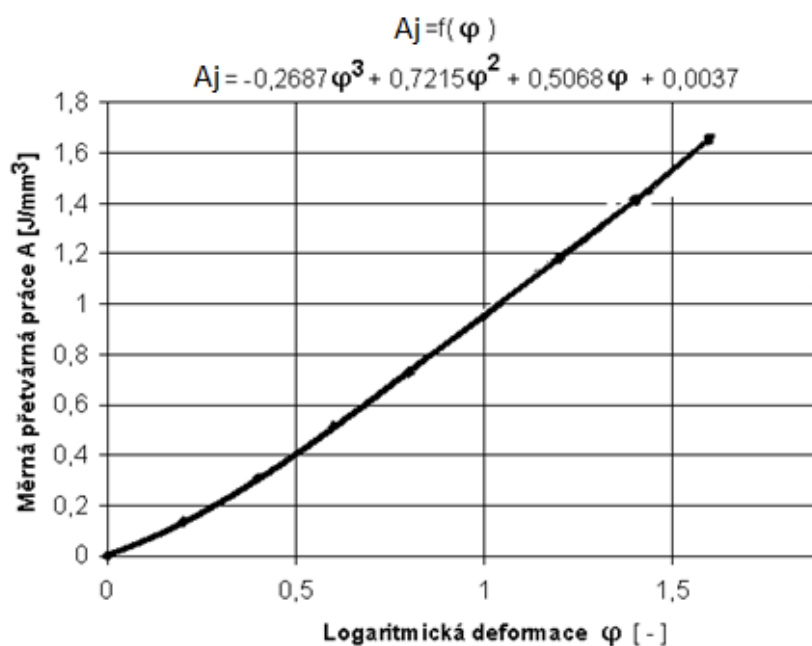
Celková přetvárná práce:

$$A_C = V_o \cdot A_j = \frac{\pi \cdot D_o^2}{4} \cdot H_o \cdot A_j = \frac{\pi \cdot 15,011^2}{4} \cdot 23,819 \cdot 1,5486 = \underline{6528 J}$$

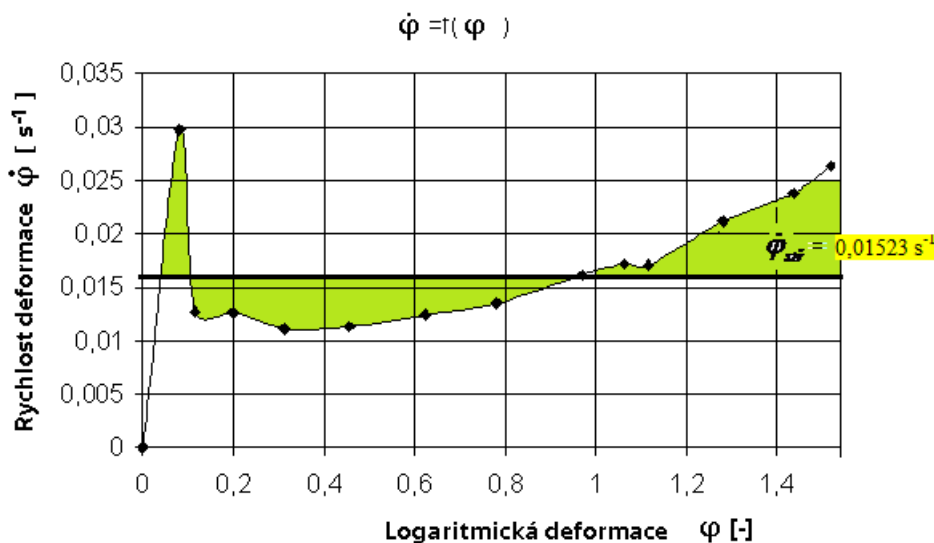
**Graf závislosti  $A_j = f(\varphi)$**

Tabulka hodnot:

$\varphi$ [-]	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,53
$\Delta A$ [J/mm <sup>3</sup> ]	0	0,134	0,176	0,202	0,216	0,223	0,229	0,237	0,132
$\Sigma A$ [J/mm <sup>3</sup> ]	0	0,134	0,311	0,513	0,729	0,952	1,18	1,417	1,549



Graf závislosti  $\dot{\varphi} = f(\varphi)$



Výpočet střední rychlosti deformace  $\dot{\varphi}_{stř}$  ( $v = \text{kons.}$  - hydraulický lis)

$$v = \frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{23,82\text{mm} - 5,21\text{mm}}{135,65\text{s}} = 0,1372\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{\varphi}_{stř} = \frac{v \cdot \ln \frac{H_0}{H_K}}{H_0 - H_K} = \frac{0,1372\text{mm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \ln \frac{23,82\text{mm}}{5,21\text{mm}}}{23,82\text{mm} - 5,21\text{mm}} = \underline{\underline{0,01121\text{s}^{-1}}}$$

jak je zřejmé

z průběhu rychlosti deformace na log. deformaci, není technicky přijatelné.

Výpočet střední rychlosti deformace  $\dot{\varphi}_{stř}$  pro  $v \neq \text{konstantní}$ ,

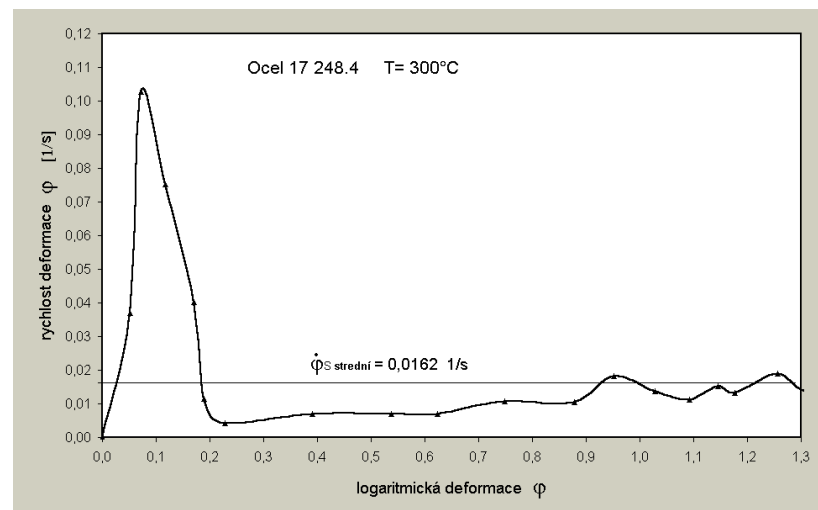
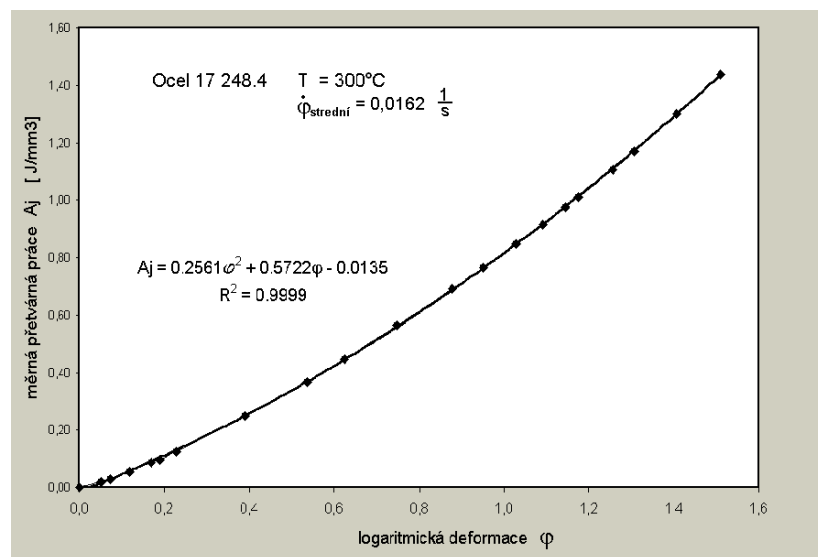
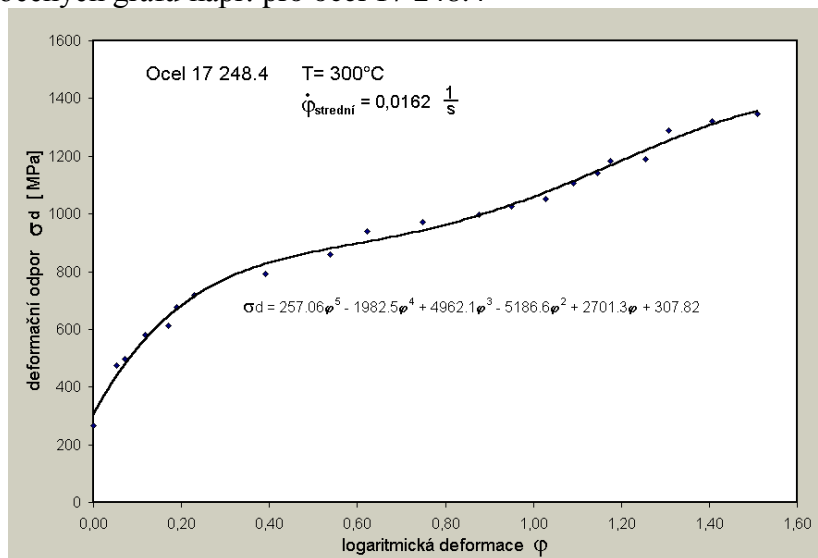
$$\dot{\varphi}_{stř} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2}(\dot{\varphi}_{i+1} + \dot{\varphi}_i)(\varphi_{i+1} - \varphi_i)}{\varphi_k - \varphi_0} = \underline{\underline{0,01523\text{s}^{-1}}}$$

což je technicky přijatelné

**Poznámka:**

V grafu  $\dot{\varphi} = f(\varphi)$  byly ne právě vhodně zvoleny přírůstky hodnot logaritického přetvoření, takže body grafu nelze proložit křivkou nižšího polynomu, tak aby byla více vyhlazená. Bylo by vhodné zvětšit hustotu bodů mezi hodnotami  $\varphi = 0 \div 0,2$ .

## Příklady vyhodnocených grafů např. pro ocel 17 248.4



## 5. cvičení

### PĚCHOVÁNÍ MEZI ROVNOBĚŽNÝMI ROVINAMI DLE UNKSOVA A SIEBELA

#### Zadání:

Pro soubor zadání  $A_1$  až  $A_{15}$  z předchozího 4. cvičení proveďte výpočet normálních a smykových napětí na čelní ploše válcového polotovaru pěchovaného mezi tuhými rovnoběžnými rovinami a to pro jednotlivé spěchování  $\Delta H_j$ . Pro konečné spěchování graficky znázorněte průběh napětí  $\sigma_z$  podle SIEBELA a UNKSOVA.

Příklad pro ocel 16 341. 3 (soubory A64 - A72)

$D_o = 15,011 \text{ mm}$

$H_o = 23,819 \text{ mm}$

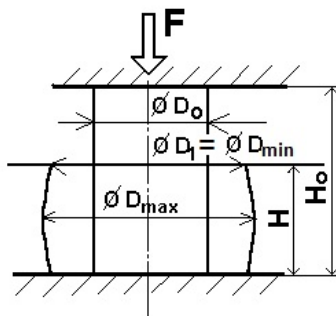
Lis: CZR 600

Teplota: dle zadání ( 25, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 750 °C )

- Úkoly:
- 1) Sestavit výpočtový model ( geometrický, materiálový, matematický).
  - 2) Vynést závislosti  $\sigma_{pU} = f(\varphi)$   $\sigma_{pS} = f(\varphi)$  a porovnat s grafem funkce  $\sigma_d = f(\varphi)$ .

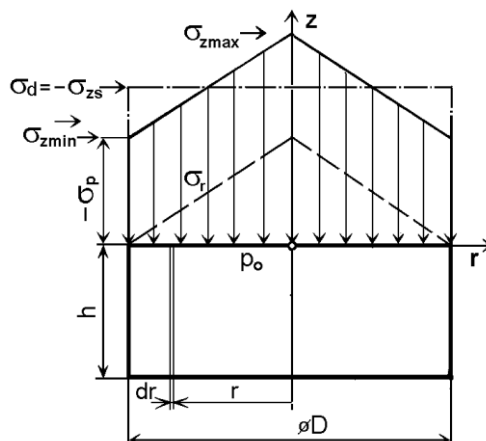
#### Výpočtový model

##### Geometrický model pěchovaného vzorku



#### 1) Výpočet napětí $\sigma_z$ pro konečné spěchování dle SIEBELA

##### Geometrický model



### Matematický model dle Siebela

Řešením diferenciální rovnice  $\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\tau_{rz}}{H} = 0$ , upravené záměnou proměnných cestou derivace podmínky plasticity maximálních smykových napětí  $\sigma_p = \sigma_r - \sigma_z$  na tvar  $\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{2\tau_{rz}}{H} = 0$  obdržíme rovnici průběhu osového napětí  $\sigma_z$  v závislosti na poloměru válce.

Rovnice průběhu osového napětí  $\sigma_z$  v závislosti na poloměru válce [1], [2]:

$$\sigma_z = -\sigma_p \left[ 1 + \frac{2 \cdot f}{H} \left( \frac{D}{2} - r \right) \right] \quad \text{pro } \tau_{rz} = -f \cdot \sigma_p$$

Výpočet dílčích hodnot napětí  $\sigma_z$

$$\sigma_{z \max} \quad \text{pro } r = 0$$

$$\sigma_{z \min} = -\sigma_{pS} \quad \text{pro } r = D/2$$

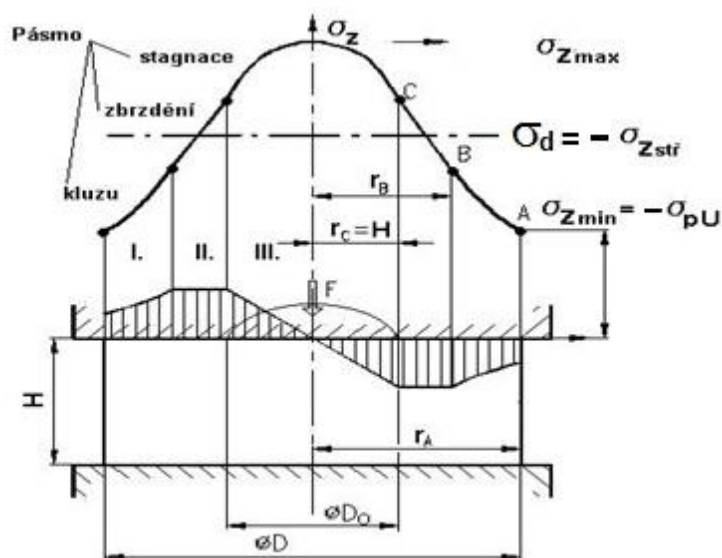
Deformační odpor pak integrací po ploše pěchovaného vzorku

$$\sigma_d = -\sigma_{zstř} = -\frac{1}{S} \int_S \sigma_z \cdot dz = \sigma_{pS} \left[ 1 + \frac{1}{3} \frac{f \cdot D}{H} \right]$$

a tvářecí-pěchovací síla  $F = \sigma_d \cdot S$ , která by měla odpovídat naměřené síle na posledním řádku tabulky zadaného souboru.

### Výpočet napětí $\sigma_z$ pro konečné spěchování dle UNKSOVA

#### Geometrický model



**Matematický model dle Unksova** dle[1], [2]

Řešením upravené diferenciální rovnice  $\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{2\tau_{rz}}{H} = 0$  obdržíme rovnici průběhu osového napětí  $\sigma_z$  v závislosti na poloměru válce ve tvarech:

$$\sigma_{zI} = -\sigma_p \cdot \exp\left[\frac{2 \cdot f}{H} \left(\frac{D}{2} - r\right)\right]; \text{ pro } \tau_{rz} = -f \cdot \sigma_{zI} \text{ pásma klusu, } r_B \leq r \leq \frac{D}{2};$$

$$\sigma_{zII} = \sigma_B + \sigma_p \frac{r_B - r}{H} = \sigma_p \frac{1}{2f} \left[1 + \frac{2f}{H} (r_B - r)\right]; \text{ pro } \tau_{rz} = -f \cdot \sigma_p$$

**pásma zbrzdění,  $r_C \leq r \leq r_B$**  (při existenci všech tří pásem je součinitel tření  $f = 1/2$ )

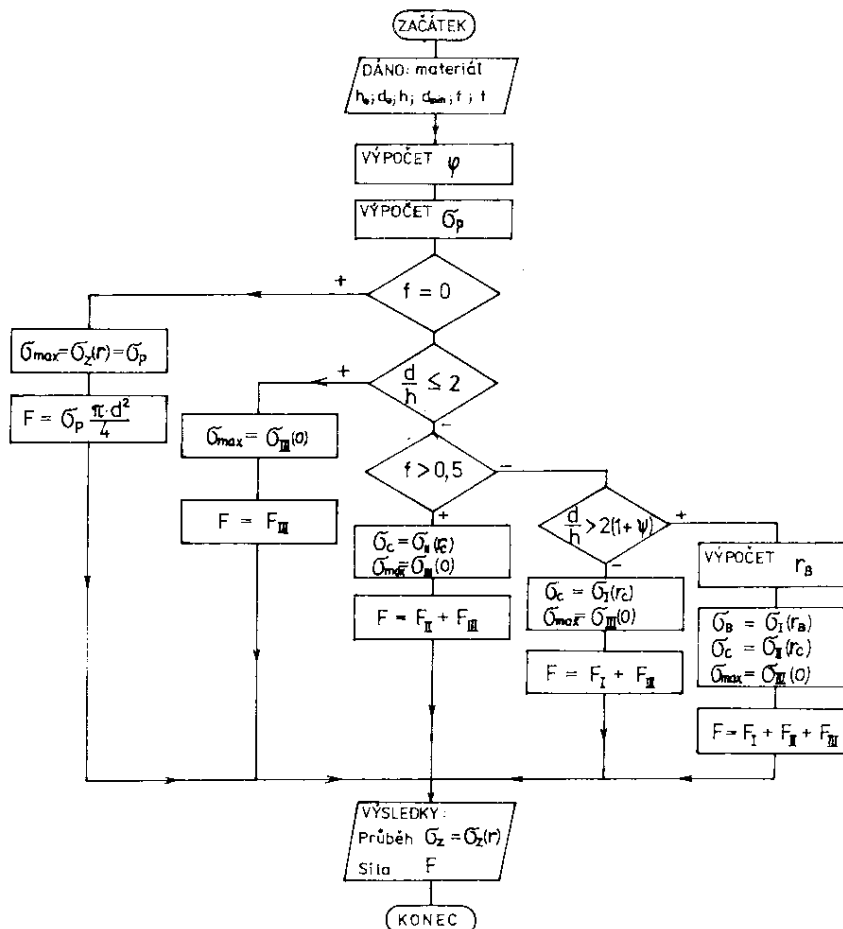
$$\sigma_{zIII} = -\sigma_C \cdot \left[1 + f \left(\frac{H^2 - r^2}{H^2}\right)\right]; \text{ pro } \tau_{rzIII} = -f \cdot \sigma_p \frac{r}{r_C} \text{ pásma stagnace-ulpívání,}$$

tj poklesu smykového napětí na nulu,  $r_C = H > 0$

Deformační odpor a tvářecí sílu pak opět integrací napětí  $\sigma_z$  po ploše pěchovaného vzorku

$$\sigma_d = -\sigma_{zstř} = -\frac{1}{S} \int_S \sigma_z \cdot dz = -2\pi \int_0^{D/2} \sigma_z \cdot r \cdot dr; \quad F = \sigma_d \cdot S$$

**Vývojový diagram postupu výpočtů pěchování**





## Výpočty-příklad

Příklad tabulky hodnot dle materiálového modelu souboru A64 (A1)

Mat. 16341.3, poc.D=15.011, H=23.819, t=25C, lis CZR 600

M.	$\Delta H$ deformace	F sila	$\min D = \frac{D_1 + D_2}{2}$	maxD	t cas	$\varphi$ fi	mins
1	0.000	70.163	15.011	15.011	0.000	0.000	176.974
2	1.120	117.714	15.242	15.405	2.230	0.048	182.462
3	1.570	139.892	15.438	15.533	6.040	0.068	187.185
4	2.950	152.516	15.929	16.113	13.620	0.132	199.281
5	3.700	167.870	16.135	16.465	21.240	0.169	204.469
6	5.850	201.308	16.947	17.490	38.180	0.282	225.567
7	8.230	252.147	18.071	18.890	58.650	0.424	256.480
8	11.210	318.687	19.668	21.043	78.410	0.636	303.815
9	13.520	417.629	21.574	23.278	98.840	0.838	365.553
10	15.470	529.542	24.176	25.570	113.520	1.048	459.048
11	16.170	610.748	25.252	26.680	119.730	1.136	500.819
12	16.610	685.812	26.083	27.530	125.500	1.195	534.324
13	17.200	737.845	27.016	28.575	132.080	1.281	573.234
14	17.550	821.439	28.101	29.660	133.810	1.335	620.202
15	18.280	955.360	30.087	31.470	140.480	1.459	710.963
16	18.580	1045.778	31.019	32.290	143.380	1.514	755.692

M.	maxS	$\sigma_d$ sigma	$\dot{\varphi}$ [s <sup>-1</sup> ] rychlost	$\sigma_{p U_{nksov}}$ sigma p	f treni	silap U	$\sigma_{p S_{lebel}}$ sigma p S
1	176.974	396.460	0.000	396.460	0.000	70.163	396.460
2	186.386	645.141	0.022	642.869	0.021	117.300	642.116
3	189.496	747.345	0.005	745.768	0.012	139.597	745.243
4	203.912	765.330	0.008	762.028	0.023	151.858	760.934
5	212.918	821.005	0.005	814.524	0.040	166.545	812.387
6	240.253	892.454	0.007	879.774	0.061	198.448	875.627
7	280.255	983.105	0.007	959.515	0.085	246.097	951.902
8	347.780	1048.949	0.011	999.669	0.126	303.715	984.255
9	425.580	1142.457	0.010	1059.786	0.141	387.408	1040.029
10	513.512	1153.565	0.014	1049.252	0.106	481.657	1046.437
11	559.064	1219.498	0.014	1092.407	0.104	547.098	1094.067
12	595.253	1283.514	0.010	1137.547	0.102	607.819	1142.476
13	641.301	1287.163	0.013	1114.393	0.106	638.808	1124.743
14	690.926	1324.470	0.031	1135.013	0.102	703.937	1148.770
15	777.827	1343.754	0.019	1145.982	0.086	814.751	1162.775
16	818.890	1383.867	0.019	1183.674	0.077	894.493	1200.949

M.	silap S
1	70.163
2	117.162
3	139.499
4	151.640
5	166.108
6	197.512
7	244.144
8	299.032
9	380.186
10	480.365
11	547.930
12	610.452
13	644.741
14	712.469
15	826.691
16	907.548

Soubor ma nazev : A1

Pocet mereni je : 16 , pocet sloupcu je : 16

Příklad tabulky hodnot dle materiálového modelu souboru A64 (A1), dopočet kriterií dle Unksova, strana 2

	$H_j = H_0 - \Delta H$	$\frac{D}{H}$	$\psi = -\frac{\ln 2f}{2f}$	$2(1 + \psi)$	
Mer.	$H = r_c = H_j$	$D_{min}/H_j$	$\psi$	$2*(1+\psi)$	Testování pásem
1	23.82	0.63	0.00	2.00	
2	22.70	0.67	75.24	152.48	
3	22.25	0.69	152.26	306.53	
4	20.87	0.76	68.08	138.16	
5	20.12	0.80	31.92	65.85	
6	17.97	0.94	17.19	36.38	
7	15.59	1.16	10.46	22.91	
8	12.61	1.56	5.44	12.88	
9	10.30	$2 < 2.09$	4.49	$\frac{D}{H} < 10.97$	
10	8.35	2.90	7.31	16.62	
11	7.65	3.30	7.53	17.06	
12	7.21	3.62	7.75	17.50	
13	6.62	4.08	7.30	16.60	
14	6.27	4.48	7.75	17.49	
15	5.54	5.43	10.24	22.48	
16	$H = r_c$ 5.24	5.92	12.11	$\frac{D}{H} < 26.21$	

Data byla uspesne vytistena

tisk 2M

### 3. Testování výskytu jednotlivých pásem na 2. straně výpisu.exe

Při splnění kriteria  $1 < \frac{D}{H} \leq 2$  existuje pouze III. pásmo- stagnace (počátky pěchování)

Při splnění kriteria  $2 < \frac{D}{H} \leq 2[1 + \psi]$ , kde  $f \in \langle 0; 0,5 \rangle$  se vyskytuje pásmo stagnace III. a

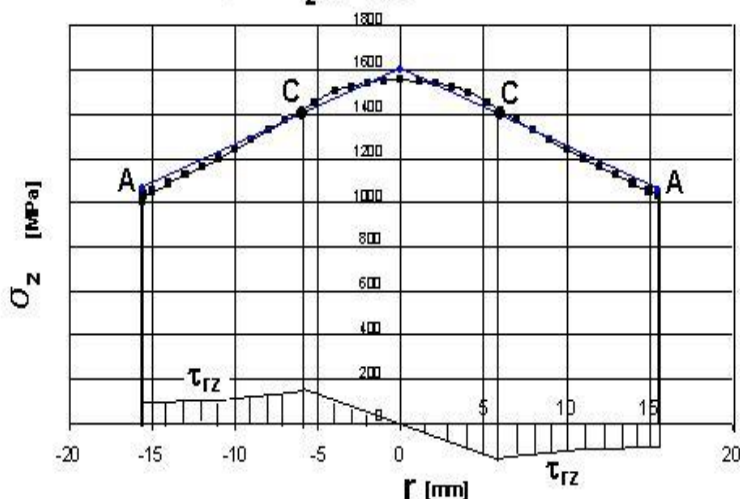
pásmo kluzu I. (rozvinuté pěchování) kde  $\psi = -\frac{\ln 2f}{2f}$  je tzv. třecí funkce

Při splnění kriteria  $\frac{D}{H} > 2[1 + \psi]$ , se vyskytují všechna tři pásma, tj. I. pásmo kluzu, II

zbrzdění a III. stagnace (spěchování na velmi malé výšky) a součinitel tření v pásmu II. dosahuje hodnoty  $f = 0,5$

Příklad srovnání

Průběh napětí  $\sigma_z$  a  $\tau_{rz}$  podle SIEBELA a UNKSOVA



## 6. cvičení

### DOPŘEDNÉ KVAZISTATICKÉ PROTLAČOVÁNÍ

#### Zadání:

Pro zadaný tvar čepu dle náčrtu, vyrobený z cementační oceli 14 220.3 dopředným protlačováním ve 4. operaci na víceoperačním automatu TPZD-25 vypočítejte deformační odpor, potřebnou protlačovací sílu a napětí zatěžující průtlačnici. Při sestavení výpočtového modelu předpokládejte kvazistatické podmínky a isotermický proces přetvoření. Přirozený přetvárný odpor a měrnou přetvárnou práci pro zadanou ocel vypočítejte z regresních funkcí viz PORADENSKÁ PŘÍRUČKA / 33 díl 1. *Křivky přetvárných odporů*, str. 127- 148 [pro zadané soubory, nebo](#) programem Tvareni\protlacovani na disku C:\.

**Úhel  $\alpha$  [°]** kuželové redukční části průtlačnice (  $2\alpha$  je úhel vrcholový):

dle tabulkového zadání. ( 3, 5, 8, 10, 12, 15, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 35, 38, 40, 44)

#### Teplota:

dle osobního zadání ( 21, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 750 °C )

- Úkoly:**
- 1) Sestavit výpočtový model ( geometrický, materiálový, matematický )
  - 2) Sestavit vývojový diagram postupu výpočtu
  - 3) Vynést závislost  $\sigma_d = f(\alpha)$  nebo  $\sigma_d = f(f)$ ,  $\sigma_d = f(T)$
  - 4) Vynést průběhy napětí na průtlačnici

ocel :

příklad zadání

$D_0 = 27$  mm

$H_0 = 108$  mm

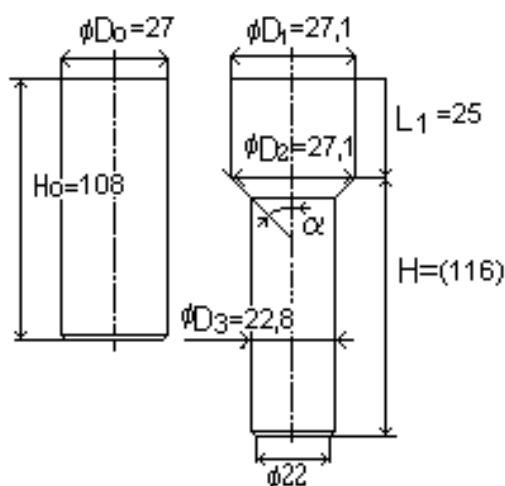
$D_1 = 27,1$  mm

$D_2 = 27,1$  mm

$D_3 = 22,8$  mm

#### Výpočtový model

**Geometrický model protlačeného čepu** - (válcový polotovár)



TEORIE TVÁŘENÍ  
Cvičení č. 6

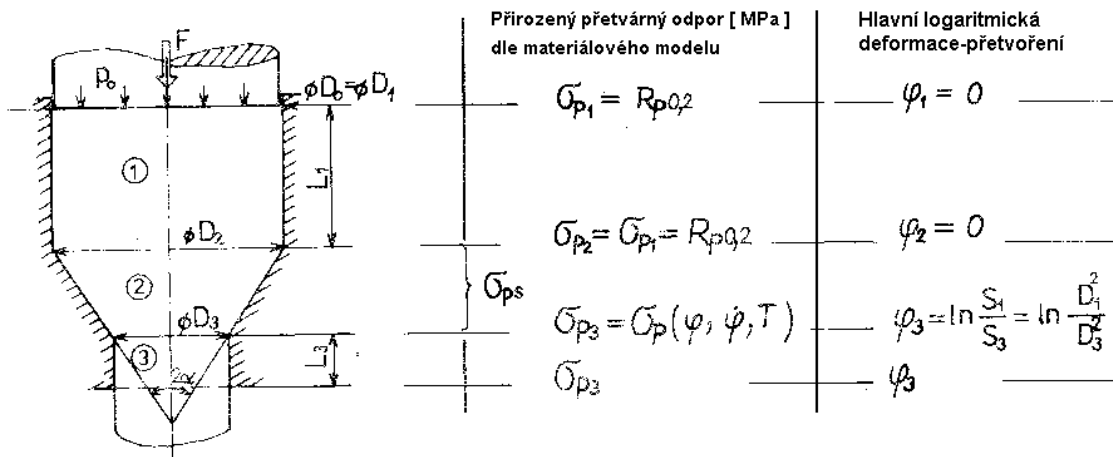
studijní skupina

DOPŘEDNÉ PROTLAČOVÁNÍ

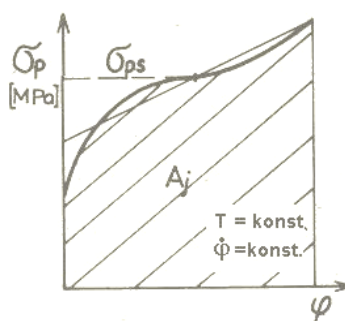
ZS akademického roku 20XX / 20XX

Ocel:						
Chemické složení:						
Pevnostní parametry: $R_m =$ $R_e =$ $R_{p0,2} =$		PORADENSKÁ PŘÍRUČKA 33/díl 1., nebo DATABAZE v programu Tvareni\protlacovani				
Regresní funkce pro $\sigma_p =$						
Interval přetvoření $\varphi \in \langle 0; \varphi_{\max} \rangle$						
Střední rychlost přetvoření $\dot{\varphi}_{stř} =$						
zadání	$T$ [°C]	$\alpha$ [°]	$f_1$	$f_2$	$f_3$	Příjmení, jméno
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						
11.						
12.						
13.						
14.						
15.						

### Geometrický model průtlačnice



**Materiálový model** (např. zadané oceli) Křivka napětí deformace pro zadanou teplotu a rychlost přetvoření. **Přirozený přetvárný odpor**  $\sigma_{p3}$  určit buď ze zvolené matematické funkce materiálového modelu z PORADENSKÉ PŘÍRUČKY/33 díl 1. (díl 2., 3. nebo 4.) "Křivky přetvárných odporů", nebo vybrat ze souborů zadání, či souboru programů **Tváření**.



**Kontrola předpokladů použití metody výpočtu** např. podle doporučení prof. Langa [1, 2], [21], [23]

$$\frac{S_0}{S_3} = 1,413 < 3,3 \quad ; \quad \frac{H_0}{D_0} = \frac{108\text{mm}}{27\text{mm}} = 4 \quad (\text{je v doporučováném rozmezí 3 až 8})$$

**Logaritmický stupeň přetvoření** v kuželové části průtlačnice:

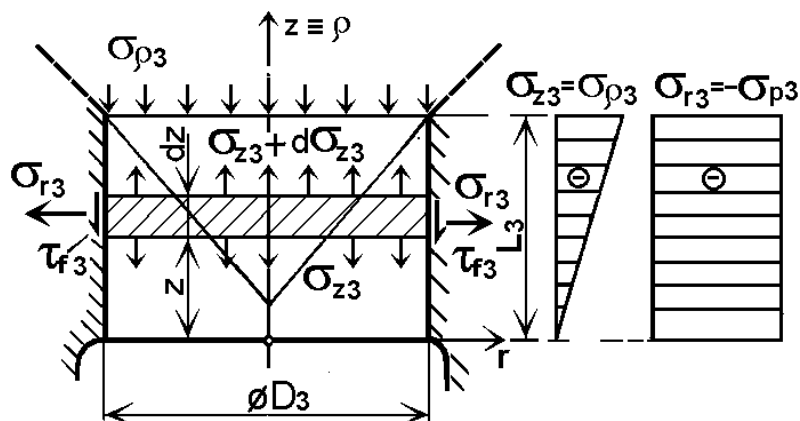
$$\varphi_3 = \ln \frac{D_2^2}{D_3^2} = \ln \frac{27,1^2}{22,8^2} = 0,3455$$

**Měrná přetvárná práce**  $A_j$  [ $\text{Jmm}^{-3}$ ] určena výpočtem z matematické funkce, která je součástí materiálového modelu obdobně jako v předchozím doporučení.

**Střední přirozený přetvárný odpor:**

$$\sigma_{ps} = \frac{1}{\varphi} \int_0^{\varphi_k} \sigma_p \cdot d\varphi = \frac{A_j \cdot 1000}{\varphi_3}$$

### Výstup z redukční části průtláčnice do válcového oka



Síla potřebná k protlačení materiálu válcovým očkem musí být větší jak třecí síla na povrchu válcové plochy oka  $F_3 > T_3$

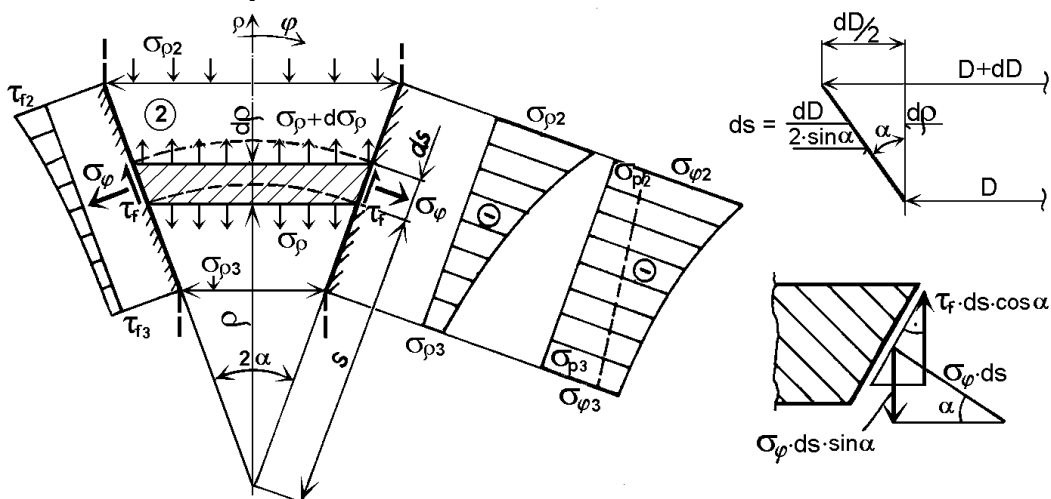
Řešením diferenciální rovnice  $\frac{d\sigma_{z3}}{dz} - \frac{4\tau_{f3}}{D_3} = 0$  obdržíme rovnici průběhu osového napětí  $\sigma_z$  v závislosti na souřadnici výšky oka ve tvaru:

$$\sigma_{z3} = -4 \cdot \frac{f_3}{D_3} \sigma_{p3} \cdot z ; \text{ a pro okrajové podmínky kdy } z = L_3 \quad \sigma_{z3} = -4 \cdot \frac{f_3}{D_3} \sigma_{p3} \cdot L_3$$

Platí předpoklad, že  $\sigma_{r3} = \sigma_{p3}$  (jinak též podmínka průchodu válcovým očkem)

Smykové napětí na povrchu válcového oka  $\tau_{rz} = \tau_{f3} = f_3 \cdot \sigma_{r3} = -f_3 \cdot \sigma_{p3}$

### Vstup do redukční části průtláčnice



Na základě předpokladu, že osové napětí  $\sigma_\rho$  je funkcí souřadnice  $\rho$  převedené na okamžitý  $\emptyset D$  a je rovnoměrně rozloženo na čele deskového (dle Perlina kulového) elementu a z podmínky rotační symetrie platí, že  $\sigma_\varphi = \sigma_\Theta$  je v [1], [2] odvozena diferenciální rovnice rovnováhy ve tvaru.

$$\frac{d\sigma_\rho}{dD} - \frac{2}{D \cdot \operatorname{tg}\alpha} \tau_f + \frac{2}{D} (\sigma_\rho - \sigma_\varphi) = 0$$

Řešením pro podmínku plasticity maximálních smykových napětí  $\sigma_\rho - \sigma_\varphi = \sigma_p$  a pro kontaktní tření dle Coulomba  $\tau_f = f_2 \cdot \sigma_\varphi = f_2 (\sigma_\rho - \sigma_p)$  metodou variací konstanty pro okrajové podmínky výstupu do očka obdržíme matem.vztah pro průběh napětí  $\sigma_\rho$  v závislosti na  $\emptyset D$

$$\sigma_\rho = -\sigma_p \left[ \left( 4 \cdot f_3 \cdot \frac{L_3}{D_3} \frac{\sigma_{p3}}{\sigma_p} + 1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2} \right) \left( \frac{D}{D_3} \right)^{\frac{2 \cdot f_2}{\operatorname{tg}\alpha}} - \frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2} - 1 \right]$$

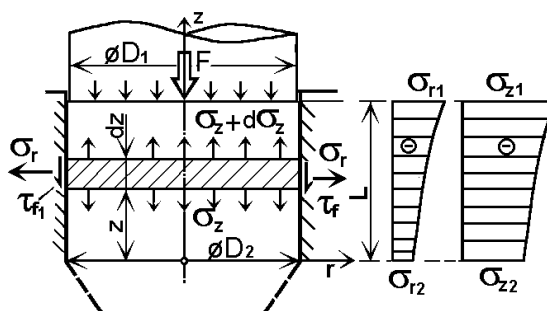
Pro okrajovou podmínku vstupu z kontejneru do redukční části  $D = D_2$  pak bude předchozí vztah upraven na tvar:

$$\sigma_{\rho 2} = -\sigma_{pstr} \left[ \left( 4 \cdot f_3 \cdot \frac{L_3}{D_3} \frac{\sigma_{p3}}{\sigma_{pstr}} + 1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2} \right) \left( \frac{D_2}{D_3} \right)^{\frac{2 \cdot f_2}{\operatorname{tg}\alpha}} - \frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2} - 1 \right]$$

Z podmínky plasticity pak určíme napětí  $\sigma_\varphi$ ;  $\sigma_{\varphi 2} = \sigma_{\rho 2} - \sigma_{pstr}$

Smykové napětí na kuželové ploše :  $\tau_{\rho\varphi} = f_2 \cdot \sigma_{\varphi 2}$

**Vstup do válcového kontejneru**  $z = L_1 = 25\text{mm}$



V kontejneru-zásobníku je materiál po dosednutí na stěny průtláčnice v pružném stavu. Vztah mezi radiálním a osovým napětí je vyjádřen fyzikální rovnicí pro poměrnou deformaci:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_\varphi + \sigma_z)] = 0$$

Vzhledem k rotační symetrii platí, že:  $\sigma_r = \sigma_\phi$  a po dosazení a úpravě obdržíme vztah mezi

normálními složkami napětí  $\sigma_r = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z$ ; pro ocel  $\mu=0,3$ , pak  $\sigma_r = 0,43\sigma_z$

Řešením diferenciální rovnice rovnováhy ve válcovém zásobníku [1], [2] ve tvaru  $\frac{d\sigma_z}{dz} - \frac{4\tau_{rz}}{D_1} = 0$

pro tření dle Coulomba  $\tau_{rz} = f_1 \cdot \sigma_r$  a vztah pro radiální napětí v pružném kontejneru

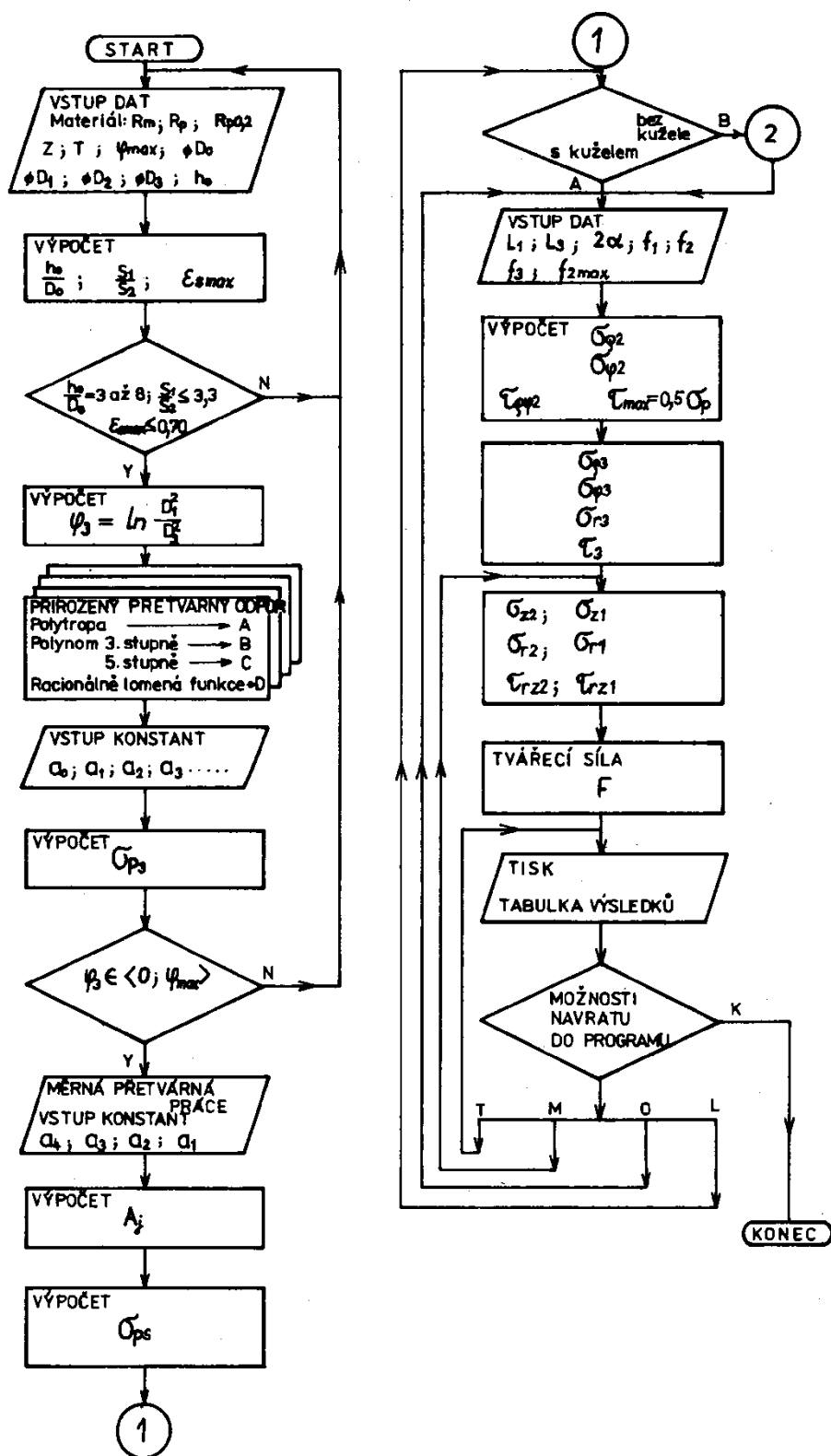
$\sigma_r = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z$ , dospějeme ke vztahu pro hlavní osové napětí:  $\sigma_z = -\sigma_{\rho 2} \exp 0,43 \frac{4 \cdot f_1}{D_1} \cdot z$  a

$\sigma_d = -\sigma_{z1} = \sigma_{\rho 2} \exp 0,43 \frac{4 \cdot f_1}{D_1} \cdot L_1$   
pro  $z=L_1$

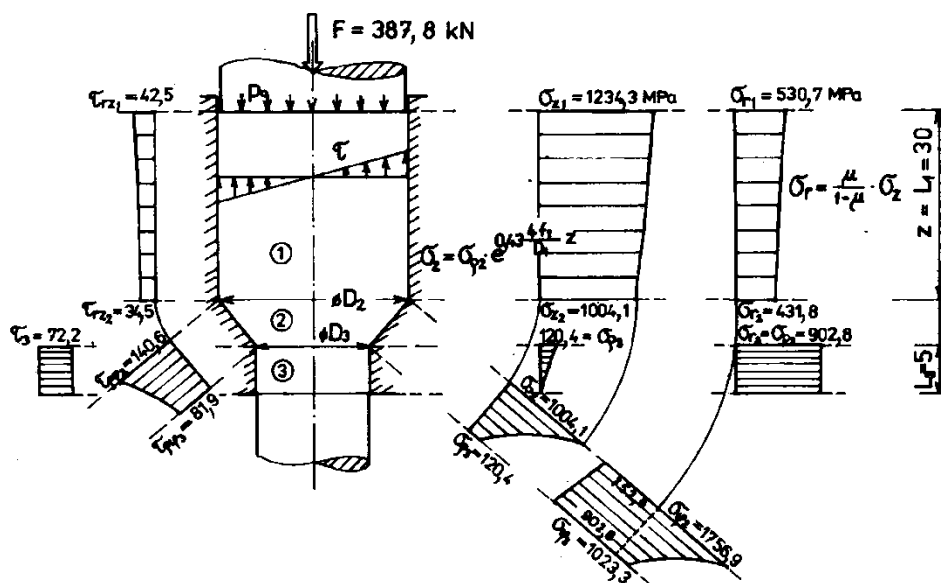
Protlačovací síla je pak určena ze vztahu:  $F_{protl} = -\sigma_{z1} \cdot S_1$



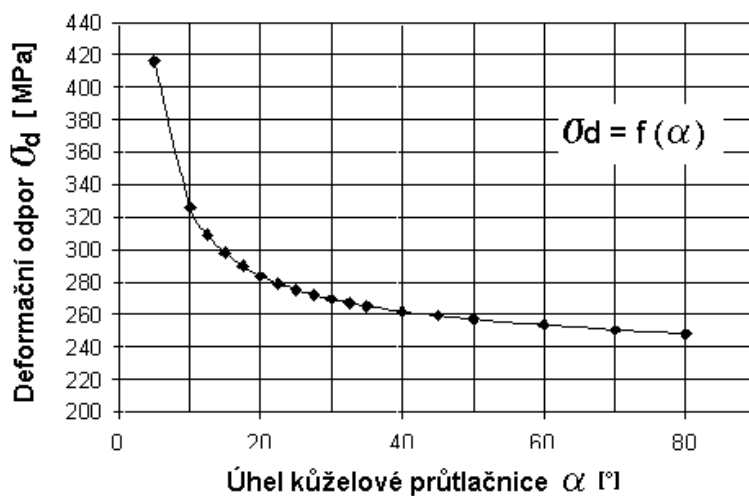
Vývojový diagram postupu výpočtu protlačovací síly a průběhů napětí při dopředném protlačování



### Průběhy napětí na průtlačnici - příklad jednoho řešení



### Příklad závislosti deformačního odporu na redukčním úhlu průtlačnice



Další matematické modely deformačního odporu pro řešení dopředného protlačování podle různých přístupů autorů [3] ověřené programem MAPLE V

Řešení podle Thomsena

$$\sigma_d = \sigma_p \left( \left( \frac{D_1}{D_3} \right)^{(2f_2 \cot(\alpha))} - 1 \right) \left( \frac{1}{f_2 \cot(\alpha)} + 1 \right) e^{\left( \frac{f_1 L_1}{D_1} \right)}$$

Řešení podle Perlina

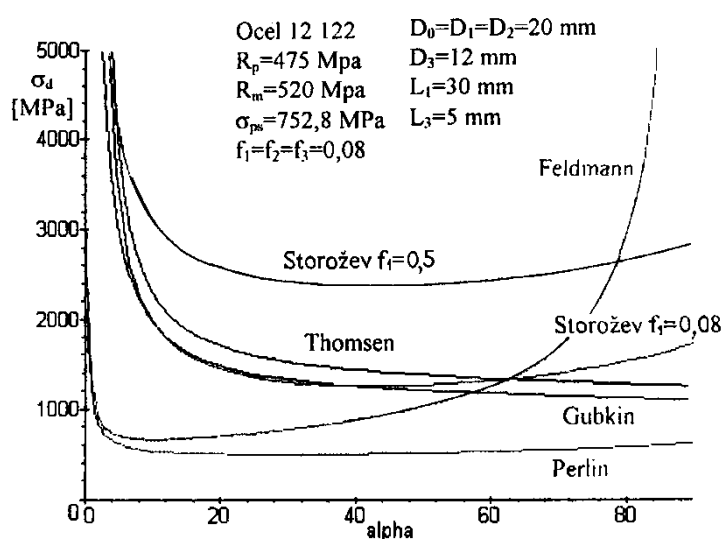
$$\sigma_d = 4 \frac{(L_1 - h) f_1 \cdot \sigma_{p1}}{D_1} + \left( \frac{1}{\cos\left(\frac{1}{2}\alpha\right)} + \frac{f_2}{\sin(\alpha)} \right) \sigma_{p2} \cdot \ln\left(\frac{D_1}{D_3}\right)^2 + 4 \frac{f_3 \cdot L_3}{D_1} \sigma_{p3}$$

Řešení podle Storoževa

$$\sigma_d = 2 \frac{L_1 \cdot \sigma_{p1}}{D_1} + \left( \frac{2}{1 + \cos(\alpha)} + \frac{f_2 + 0.5}{2 \sin(\alpha)} \right) \sigma_{p2} \cdot \ln \left( \frac{D_2}{D_3} \right)^2 + 4 \frac{f_3 \cdot L_3}{D_1} \sigma_{p3}$$

Řešení podle Feldmanna

$$\sigma_d = 4 \frac{f \cdot L_1 \cdot \sigma_{p1}}{D_1} + \left( \frac{f}{\sin(\alpha)} + \frac{2}{3} \frac{\tan(\alpha)}{\ln \left( \frac{D_1}{D_3} \right)^2} + 1 \right) \sigma_{p2} \cdot \ln \left( \frac{D_1}{D_3} \right)^2 + 4 \frac{f \cdot L_3}{D_1} \sigma_{p3}$$



Zvláště významná je možnost porovnání a posouzení dílčích řešení ve společném grafu. Na přiloženém obrázku grafickým výstupem MAPLE V zobrazení závislosti deformačního odporu na úhlu kuželové průtlačnice pro uvažované matematické modely a srovnatelnou technologii. Řešení podle Storoževa, Feldmanna a Perlina mají lokální minimum (Storožev v oblasti kolem  $40^\circ$ , Perlin v oblasti kolem  $30^\circ$  a Feldmann v oblasti kolem  $10^\circ$ ). Se vzrůstajícím součinitelem tření se posouvá lokální minimum doprava. Řešení podle upraveného Gubkina dle a dle Thomsena jsou takřka totožná a deformační odpor klesá v celém rozsahu funkčních hodnot. Vhodnost použití je dle předpokladu kolem úhlu  $30^\circ$ , kde až na Feldmannovo řešení mají křivky obdobný tvar. Z uvedených matematických modelů je zřejmé, že funkční závislosti jsou významně ovlivněny různým vyjádřením goniometrických funkcí. Ještě významnější je vliv tření.

### Použitá literatura

- [1] FOREJT, M.: Teorie tváření. FSI VUT Brno. 2. vydání. Akad. nakl.CERM, listopad 2004, ISBN 80-214-2764-7 ( FOREJT,M.: Teorie tváření. 1. vydání FS VUT Brno, duben 1992)
- [2] FOREJT, M. Teorie tváření, Návodů do cvičení. Studijní opora FSI VUT, říjen 2004 (novela 2020)
- [3] FOREJT,M.-KOSTLÁN, W.:Analýza tvářecích dějů programem MAPLE V. Maple -V program analysis of metal forming processes. In. 4<sup>th</sup> International Conference FORM'98, Brno. ISBN 80-214-1182-1. Technical University of Brno. Vol. I, edited by Forejt, M. September 15-16 1998, p 157-162. (Supported by TU grand FP 35 95 63)
- [4] MAPLE V Release 4. Czech Software First s.r.o. hudcova 72, 621 00 Brno, 1996

## Příklad protokolu výpočtu programem TVÁŘENÍ/protlačování/dopředné

## Varianty výpočtu dopředného protlačování pro dvě rychlosti deformace

<u>Dopředné dynamické protlačování</u>	<u>Dopředné kvazistatické protlačování</u>
<p>Použitý materiál: <b>Ocel: 14220.3-100 ( 100 s<sup>-1</sup>)</b>  Rm = 441 MPa Rp = 247 MPa A5 = 38 % Z = 40 %  Teplota : 23 °C</p> <p>Rozměry součásti:  D0 = 27 mm h0 = 108 mm  D1 = 27,1 mm D2 = 27,1 mm D3 = 22,8 mm  L1 = 25 mm L3 = 2 mm. Úhel 2 alfa = 60 °</p> <p>Součinitele tření: f1 = 0,06 f2 = 0,06 f3 = 0,06</p> <p>Hodnoty výpočtu: h<sub>0</sub>/D<sub>0</sub> = 4,0 s<sub>0</sub>/s<sub>3</sub> = 1,402  ε<sub>max</sub> = 0,287 φ<sub>max</sub> = 1,6 <math>\dot{\varphi}_{str} = 100 \text{ s}^{-1}</math>  Hlavní logaritmické přetvoření - φ<sub>3</sub> = 0,346  Přirozený přetvárný odpor - σ<sub>p3</sub> = 1021,85 MPa  Použitá fce pro výpočet σ<sub>p3</sub>: polynom 5 stupně  Měrná přetvárná práce - A<sub>j</sub> = 0,3243 J/mm<sup>3</sup>  Střední přirozený přetvárný odpor - σ<sub>ps</sub> = 938,61 MPa</p> <p>Průtlačnice s redukčním kuzelem:  Vstup do redukční části průtlačnice -  σ<sub>p2</sub> = 386,85 MPa  σ<sub>φ 2</sub> = 1325,46 MPa  τ<sub>pφ 2</sub> = 79,53 MPa</p> <p>Výstup do válcového očka -  σ<sub>p3</sub> = 21,51 MPa  σ<sub>φ 3</sub> = 1043,36 MPa  τ<sub>pφ 3</sub> = 62,60 MPa  σ<sub>r3</sub> = 1021,85 MPa  τ<sub>3</sub> = 61,31 MPa</p> <p>Vstup do válcového kontejneru -  σ<sub>z1</sub> = 425,49 MPa  σ<sub>r1</sub> = 182,96 MPa  τ<sub>rz1</sub> = 10,98 MPa</p> <p>Výstup z válcového kontejneru -  σ<sub>z2</sub> = 386,85 MPa  σ<sub>r2</sub> = 166,34 MPa  τ<sub>rz2</sub> = 9,98 MPa</p> <p>Potřebná protlačovací síla: F = 245,42 kN</p>	<p>Použitý materiál: <b>Ocel: 14220.3-0,1 ( 0,1 s<sup>-1</sup>)</b>  Rm = 441 MPa Rp = 247 MPa A5 = 38 % Z = 40 %  Teplota : 23 °C</p> <p>Rozměry součásti:  D0 = 27 mm h0 = 108 mm  D1 = 27,1 mm D2 = 27,1 mm D3 = 22,8 mm L1 = 25 mm L3 = 2 mm. Úhel 2 alfa = 60 °</p> <p>Součinitele tření: f1 = 0,06 f2 = 0,06 f3 = 0,06</p> <p>Hodnoty výpočtu: h<sub>0</sub>/D<sub>0</sub> = 4,0 s<sub>0</sub>/s<sub>3</sub> = 1,402  ε<sub>max</sub> = 0,287 φ<sub>max</sub> = 1,6 <math>\dot{\varphi}_{str} = 0,1 \text{ s}^{-1}</math>  Hlavní logaritmické přetvoření - φ<sub>3</sub> = 0,346  Přirozený přetvárný odpor - σ<sub>p3</sub> = 747,33 MPa  Použitá fce pro výpočet σ<sub>p3</sub>: polynom 5 stupně  Měrná přetvárná práce - A<sub>j</sub> = 0,2307 J/mm<sup>3</sup>  Střední přirozený přetvárný odpor - σ<sub>ps</sub> = 667,60 MPa</p> <p>Průtlačnice s redukčním kuzelem:  Vstup do redukční části průtlačnice -  σ<sub>p2</sub> = 275,60 MPa  σ<sub>φ 2</sub> = 943,20 MPa  τ<sub>pφ 2</sub> = 56,59 MPa</p> <p>Výstup do válcového očka -  σ<sub>p3</sub> = 15,73 MPa  σ<sub>φ 3</sub> = 763,07 MPa  τ<sub>pφ 3</sub> = 45,78 MPa  σ<sub>r3</sub> = 747,33 MPa  τ<sub>3</sub> = 44,84 MPa</p> <p>Vstup do válcového kontejneru -  σ<sub>z1</sub> = 303,12 MPa  σ<sub>r1</sub> = 130,34 MPa  τ<sub>rz1</sub> = 7,82 MPa</p> <p>Výstup z válcového kontejneru -  σ<sub>z2</sub> = 275,60 MPa  σ<sub>r2</sub> = 118,51 MPa  τ<sub>rz2</sub> = 7,11 MPa</p> <p>Potřebná protlačovací síla: F = 174,84 kN</p>

## 7. cvičení

### ZPĚTNÉ PROTLAČOVÁNÍ

Zadání:

Pro zadaný tvar pístu dle náčrtu, vyrobený z cementační oceli zpětným protlačováním ve 2.operaci na dvourázovém automatu HATEBUR vypočítejte deformační odpor, potřebnou protlačovací sílu a napětí zatěžující průtláčnici se zvážením poloohřevu na teploty dle tabulky zadání. Výsledek porovnejte s řešením pro jiné teploty v rozmezí  $T_{\text{okolí}}$  až  $750^{\circ}\text{C}$  a vynesete graf závislosti  $\sigma_d = f(T)$ ,  $F_{\text{protl.}} = f(T)$  a navrhněte optimální teplotu částečného ohřevu. Při sestavení výpočtového modelu předpokládejte kvázistatické podmínky a isothermický proces přetvoření. Model materiálu pro zadanou ocel, tj. přirozený přetvárný odpor  $\sigma_p = f(\varphi)$  a měrnou přetvárnou práci  $A_j = f(\varphi)$  pro zadanou ocel vypočítejte z regresních funkcí viz PORADENSKÁ PŘÍRUČKA / 33 díl 1. *Křivky přetvárných odporů*, str. 127- 148.

**Teplota:**

dle osobního zadání ( 21, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 750 °C )

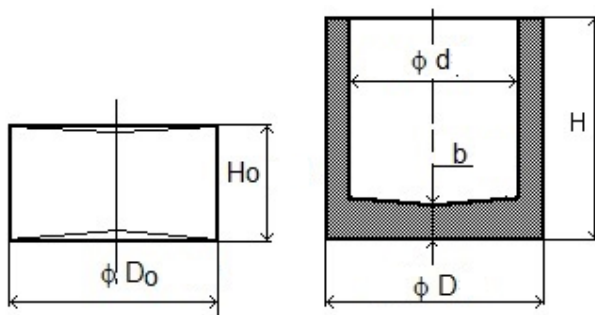
- Úkoly:**
- 1) Sestavit výpočtový model ( geometrický, materiálový, matematický )
  - 2) Sestavit vývojový diagram postupu výpočtu
  - 3) Vynést závislost  $\sigma_d = f(T)$ ,  $F_{\text{protl.}} = f(T)$ .

Ocel : dle zadání

Příklad geom. modelu:  $\phi D_o = 54,4$  mm  
 $H_o = 24$  mm  
 $\phi d = 45$  mm  
 $H = 54,3$

Výpočtový model

**Geometrický model protlačeného pístu**



TEORIE TVÁŘENÍ  
Cvičení č.7

studijní skupina

ZPĚTNÉ PROTlačOVÁNÍ

ZS akademického roku 20XX / 20XX

Ocel:					
Chemické složení:					
Pevnostní parametry: $R_m =$ $R_e =$ $R_{p0,2} =$		PORADENSKÁ PŘÍRUČKA 33/díl 1., nebo DATABÁZE, která je součástí programu Tvareni/protlacovani			
Regresní funkce pro $\sigma_p =$					
Interval přetvoření $\varphi \in < 0; \varphi_{max} >$					
Střední rychlost přetvoření $\dot{\varphi}_{stř} =$					
zadání	<b>T</b> [°C]	<b>α</b> [°]	<b>f<sub>1</sub></b> , <b>f<sub>2</sub></b> , <b>f<sub>3</sub></b>	Příjmení, jméno	
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					
11.					
12.					
13.					
14.					
15.					

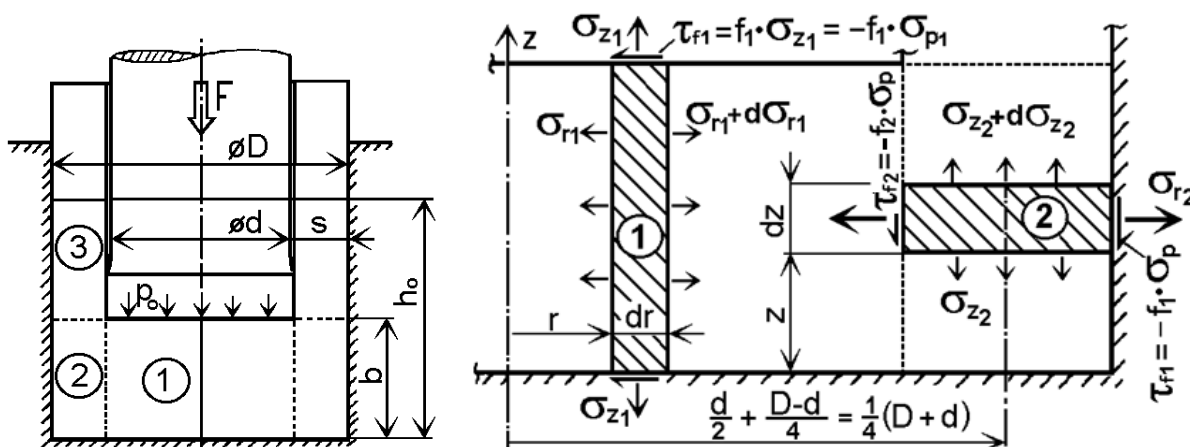
**Výpočet výšky dna pístu b:**

Konečná výška dna pístu plyne z rovnosti objemů před a po zpětném protlačení

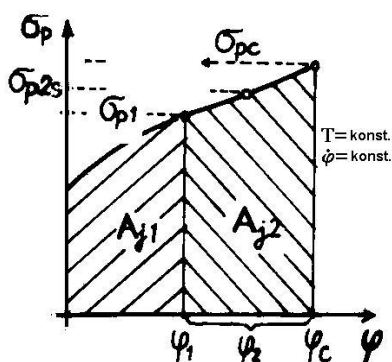
$$\frac{\pi \cdot D_o^2}{4} \cdot H_o = \frac{\pi \cdot D_o^2}{4} \cdot b + \frac{\pi(D_o^2 - d^2)}{4} (H - b)$$

odtud vyjádříme a vypočteme výšku dna "b"

### Geometrický model průtlačnice



### Materiálový model



Materiálový model představuje křivka napětí - deformace pro zadanou teplotu a rychlost přetvoření. Z pohledu tvařeče jde o závislost přirozeného přetvárného odporu na logaritmické deformaci (nebo na poměrné deformaci). Zpravidla je vyjádřen regresní funkcí, např. polytropou, polynomem 3. nebo 5. stupně, rac. lomenou funkcí a pod.

$$\sigma_p = a_3 \cdot \varphi^3 + a_2 \cdot \varphi^2 + a_1 \cdot \varphi + a_0 \quad [\text{MPa}]$$

obdobně i měrná přetvárná práce

$$A_j = a_2 \cdot \varphi^2 + a_1 \cdot \varphi + a_0 \quad [\text{Jmm}^{-3}]$$

### Kontrola předpokladů použití metody dle DIPPERA

$$\varepsilon = \frac{H_0 - b}{H_0} \geq 0,5$$

Logaritmické přetvoření v zóně 1

$$\varphi_1 = \ln \frac{b}{H_0}$$

Celkové přetvoření na výstupu ze zóny 2  $\varphi_c = \varphi_1 \cdot \left(1 + \frac{d}{4(D_o - d)}\right)$

Přetvoření v zóně 2  $\varphi_2 = \varphi_c - \varphi_1$

Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu v zóně 2:

$$\sigma_{ps} = \frac{1}{\varphi} \int_{\varphi_1}^{\varphi_k} \sigma_p \cdot d\varphi = \frac{(A_{jc} - A_{jl}) \cdot 1000}{\varphi_c - \varphi_1}$$

### Matematický model řešení

Z podmínky rovnováhy sil v úseku 2, za předpokladu že  $f_{2stř} = \frac{f_1 + f_2}{2}$  po úpravě získáme

diferenciální rovnici rovnováhy ve tvaru  $\frac{d\sigma_{z2}}{dz} - \frac{4 \cdot f_{2stř}}{D-d} \sigma_p = 0$ , jejíž řešením pro

okrajové podmínky získáme:  $\sigma_{z2} = -\sigma_p \cdot 4 \cdot \frac{f_{2stř}}{D-d} (b-z)$  a z podmínky plasticity

$$\sigma_{z2} - \sigma_{r2} = \sigma_p \quad \text{pak} \quad \sigma_{r2} = -\sigma_p \left[ 4 \cdot \frac{f_{2stř}}{D-d} (b-z) + 1 \right].$$

Obdobně z podmínky rovnováhy sil v úseku 1, za předpokladu, že  $\tau_{rz} = f_1 \cdot \sigma_{z1} = -f_1 \cdot \sigma_{p1}$

po úpravě získáme diferenciální rovnici rovnováhy ve tvaru  $\frac{d\sigma_{r1}}{dr} - \frac{2 \cdot f_1}{b} \sigma_{p1} = 0$ , jejíž

řešením pro okrajové podmínky získáme:  $\sigma_{r1} = -\sigma_{p1} \cdot \frac{2f_1}{b} \left(\frac{d}{2} - r\right) + \sigma_{r2stř}$

a z podmínky plasticity  $\sigma_{r1} - \sigma_{z1} = \sigma_{p1}$

$$\sigma_{z1} = -\sigma_{p1} \left[ 1 + \frac{2f_1}{b} \left(\frac{d}{2} - r\right) \right] + \sigma_{r2stř}.$$

Střední měrný tlak na čele průtlačníku-deformační odpor:

$$\sigma_d = -\sigma_{z1stř} = -\frac{1}{S} \int_S \sigma_{z1} \cdot ds = -\frac{4}{\pi \cdot d^2} \int_0^{D/2} \sigma_{z1} \cdot 2\pi r \cdot dr$$

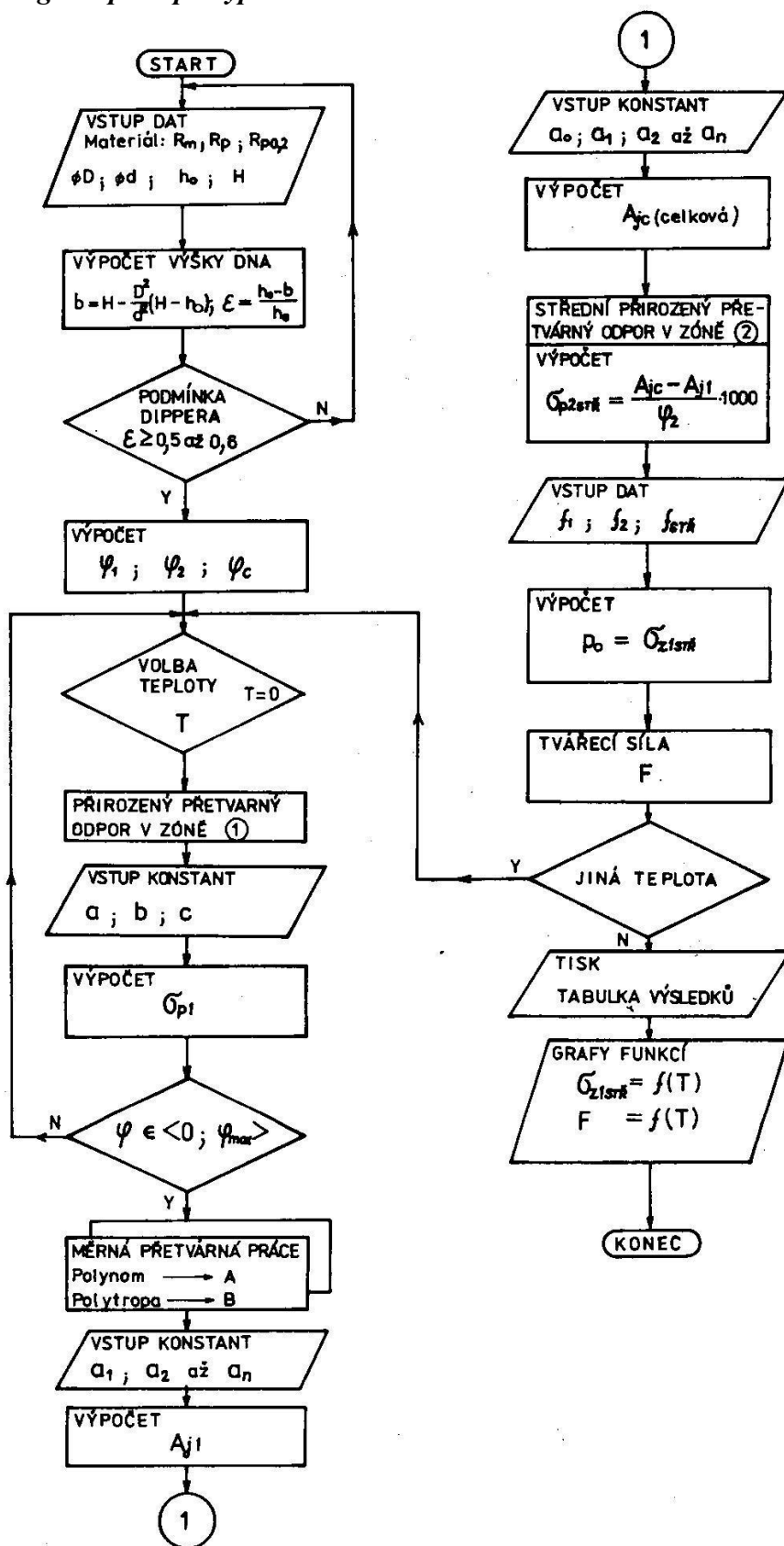
po dosazení, integraci a úpravě získáme konečnou rovnici pro deformační odpor.

$$\sigma_d = -\sigma_{z1stř} = \left(1 + \frac{1}{3} \frac{f_1 \cdot d}{b}\right) \sigma_{p1} + \left(1 + \frac{2 \cdot f_{2stř}}{D-d} b\right) \sigma_{p2stř}$$

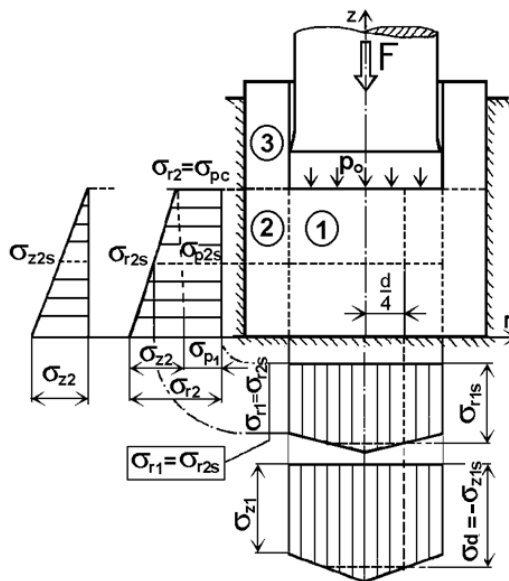
Protlačovací síla  $F_{protl.} = \sigma_d \cdot S = -\sigma_{z1stř} \frac{\pi d^2}{4}$  [N]



Vývojový diagram postupu výpočtu



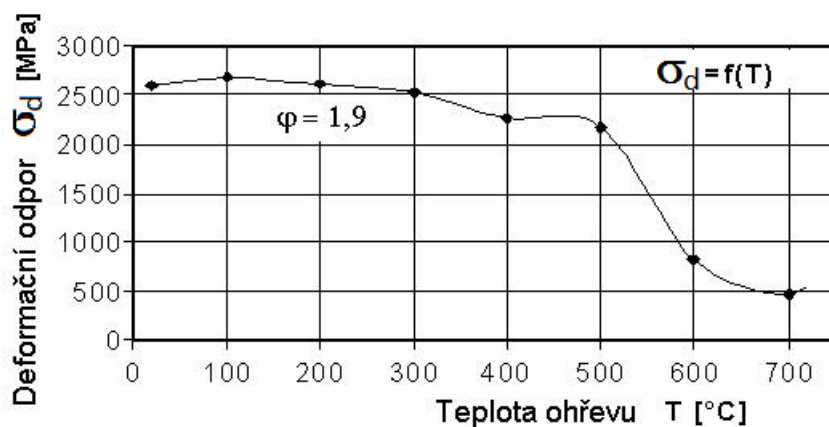
**Průběhy napětí na průtlačnici.**



**Grafické znázornění závislosti**  $\sigma_d = f(T, \varphi = \text{konst})$ ,  $\sigma_d \equiv -\sigma_{z1s}$

Příklad pro ocel 14 220.3

T [°C]	21	100	200	300	400	500	600	700
$\sigma_d$	2586,7	2678,6	2599,2	2508,6	2252,6	2155,1	821,3	475,8



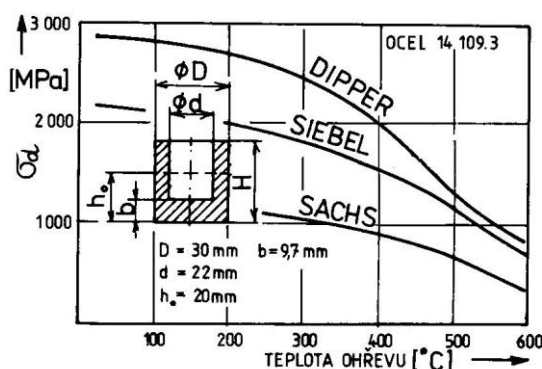
**Jiné matematické modely** [1],[2]

Řešení podle Sachse (tření v průtlačnici zanedbáno)

$$\sigma_d = -\sigma_{z \max} = 1,58 \cdot \sigma_{pc} \ln \frac{D^2}{D^2 - d^2}$$

Řešení podle Siebela (v praxi často používaný model při zpětném protlačování ocelových a mosazných kalíšků s tloušťkou stěny  $s > 0,1 \cdot d$ )

$$\sigma_d = 1,152 \cdot \sigma_{pc} \frac{D^2}{d^2} \left( \log \frac{D^2}{D^2 - d^2} + \frac{D^2}{D^2 - d^2} \cdot \log \frac{D^2}{d^2} + \log \frac{d^2}{D^2 - d^2} \right)$$



Experimentální zkoušky ukázaly, že vzrůst deformačního odporu začíná od tlouštěk dna průtlačku  $b = (0,3 \text{ až } 0,2)d$

## Příklad protokolu výpočtu programem TVÁŘENÍ/protlačování/zpětné

### **Varianty výpočtu zpětného protlačování pro dvě rychlosti deformace**

<b><u>Zpětné dynamické protlačování</u></b>	<b><u>Zpětné kvazistatické protlačování</u></b>
Použitý materiál: Ocel: 11320 5R-100 ( <b>Ocel 11 320.5R, 100 s<sup>-1</sup></b> ) R <sub>m</sub> = 614 MPa, R <sub>p</sub> = 589 MPa, A <sub>5</sub> = 15 %, Z = 70 % Teplota : 25 °C Rozměry součásti: D <sub>o</sub> = 54,5 mm, h <sub>o</sub> = 24 mm, d = 45 mm, H = 54 mm Součinitele tření: f <sub>1</sub> = 0,06 f <sub>2</sub> = 0,5 f <sub>2str</sub> = 0,280	Použitý materiál: Ocel: 11320 5R 0,1 ( <b>Ocel 11 320.5R, 0,1 s<sup>-1</sup></b> ) R <sub>m</sub> = 614 MPa, R <sub>p</sub> = 589 MPa, A <sub>5</sub> = 15 %, Z = 70 % Teplota : 25 °C Rozměry součásti: D <sub>o</sub> = 54,5 mm, h <sub>o</sub> = 24 mm, d = 45 mm, H = 54 mm Součinitele tření: f <sub>1</sub> = 0,06 f <sub>2</sub> = 0,5 f <sub>2str</sub> = 0,280
Hodnoty výpočtu: b = 9,996 ε = 0,583 φ <sub>max</sub> = 1,4 φ <sub>str</sub> = 100 Logaritmičké přetvoření v zóně 1 - φ <sub>1</sub> = 0,876 Celkové přetvoření na výstupu ze zóny 2 - φ <sub>c</sub> = 1,913 Logaritmičké přetvoření v zóně 2 - φ <sub>2</sub> = 1,037 Přirozený přetvárný odpor v zóně 1: σ <sub>p1</sub> = 989,27 MPa Celkový přirozený přetvárný odpor: σ <sub>pc</sub> = 1639,8 MPa Použitá funkce pro výpočet σ <sub>p1</sub> : Polynom 5 stupně Přirozený přetvárný odpor v zóně 2: σ <sub>p2str</sub> = 1046,9 MPa Střední měrný tlak na čele průtlačníku: σ <sub>z1str</sub> = 2677,1 MPa Měrná přetvárná práce potřebná pro přetvoření v zóně 1: A <sub>j1</sub> = 0,8141 J/mm <sup>3</sup> Celková měrná přetvárná práce potřebná na protlačení zadaného tvaru: A <sub>jc</sub> = 1,8999 J/mm <sup>3</sup> Celková přetvárná práce - A <sub>c</sub> = 106373,1 J Potřebná protlačovací síla: <b>F = 4257,7 kN</b>	Hodnoty výpočtu: b = 9,996 ε = 0,583 φ <sub>max</sub> = 1,4 φ <sub>str</sub> = 0,1 Logaritmičké přetvoření v zóně 1 - φ <sub>1</sub> = 0,876 Celkové přetvoření na výstupu ze zóny 2 - φ <sub>c</sub> = 1,913 Logaritmičké přetvoření v zóně 2 - φ <sub>2</sub> = 1,037 Přirozený přetvárný odpor v zóně 1: σ <sub>p1</sub> = 689,35 MPa Celkový přirozený přetvárný odpor: σ <sub>pc</sub> = 1141,8 MPa Použitá funkce pro výpočet σ <sub>p1</sub> : Polynom 5 stupně Přirozený přetvárný odpor v zóně 2: σ <sub>p2str</sub> = 729,7 MPa Střední měrný tlak na čele průtlačníku: σ <sub>z1str</sub> = 1865,7 MPa Měrná přetvárná práce potřebná pro přetvoření v zóně 1: A <sub>j1</sub> = 0,5674 J/mm <sup>3</sup> Celková měrná přetvárná práce potřebná na protlačení zadaného tvaru: A <sub>jc</sub> = 1,3241 J/mm <sup>3</sup> Celková přetvárná práce - A <sub>c</sub> = 74136,2 J Potřebná protlačovací síla: <b>F = 2967,2 kN</b>

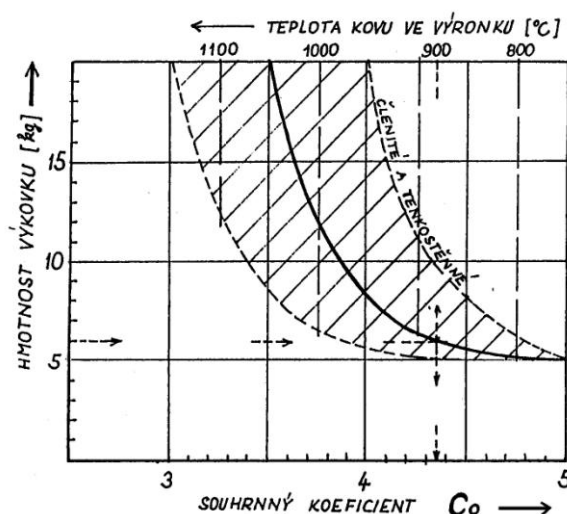
## 8. cvičení

ZÁPUSTKOVÉ KOVÁNÍ

Zadání:

Vypočtete kovací sílu potřebnou pro vykování polotovaru ozubeného kola dle zadaného náčrtu na zápustkovém kovacím lisu. K výpočtu použijte matematický model dle TOMLENOVA (ČSN 228306) a dle GELEJIHO a proveďte grafické srovnání v závislosti na výšce výronkové drážky.

Model materiálu pro zadanou ocel, tj. přirozený přetvárný odpor  $\sigma_p = f(T)$  pro zadanou ocel a kovací teplotu určíte z přiložené tabulky ocelí.

ocel :  $\sigma_p =$   MPa $\rho = 7.87 \text{ kg dm}^{-3}$  měrná hmotnost ocel $T_{\text{KOV}} =$   °C $z_1 =$   mm $\Delta r_1 =$   mm $v =$    $\text{m s}^{-1}$  $h_2 = z_2 =$   mm $f =$   součinitel tření (0,35 až 0,5) $\Delta r_2' = z_2/2 =$   mmObjem výkovku vypočítat dle geometrického modelu  $V =$    $\text{cm}^3$ Hmotnost výkovku vypočítat  $G_{\text{vyk}} = \rho \cdot V =$   kg

Souhrnný koeficient  $C_o =$   určit z diagramu pro hmotnost výkovku a teplotu ve výronku. Vyjadřuje kolikrát je přetvárný odpor ve výronku větší než uvnitř výkovku.

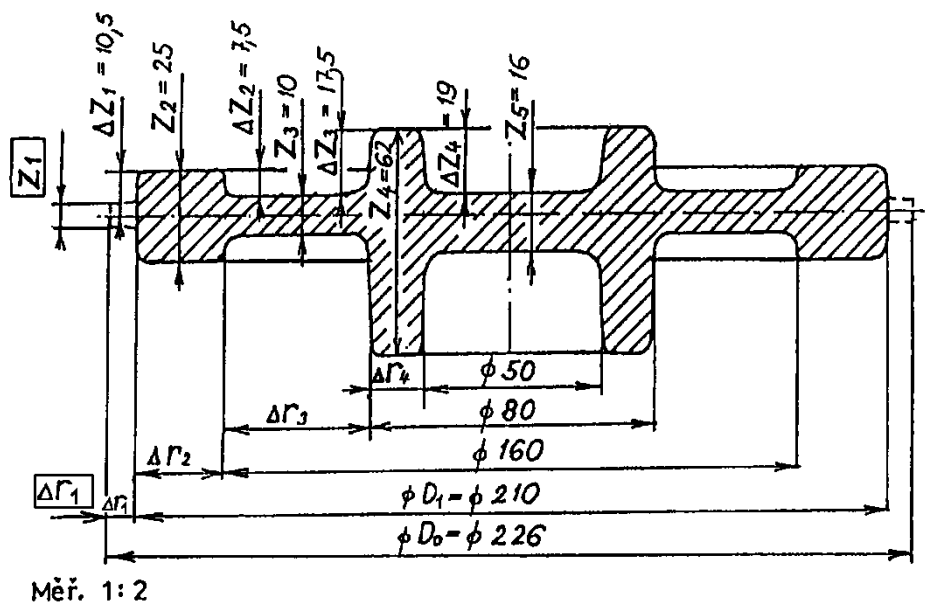
## TEORIE TVÁŘENÍ - Zápustkové kování- příklad zadání A

Ozubené kolo

Cvičení 8

Ocel: skupina 

Objem výkovku výpočtem:



Číslo	$T_{\text{kov}} [^{\circ}\text{C}]$	$\sigma_p$ [MPa]	$Z_1$ [mm]	$\Delta r_1$ [mm]	$V$ [ $\text{ms}^{-1}$ ]	$f$	Příjmení, jméno
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

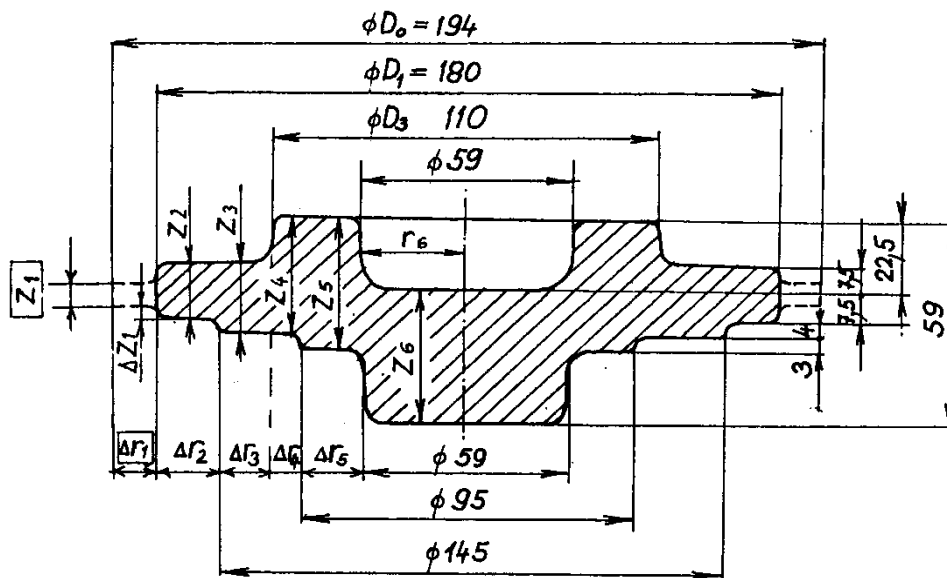
## TEORIE TVÁŘENÍ - Zápustkové kování- příklad zadání B

Ozubené kolo

Cvičení 8

Ocel: skupina 

Objem výkovku výpočtem:

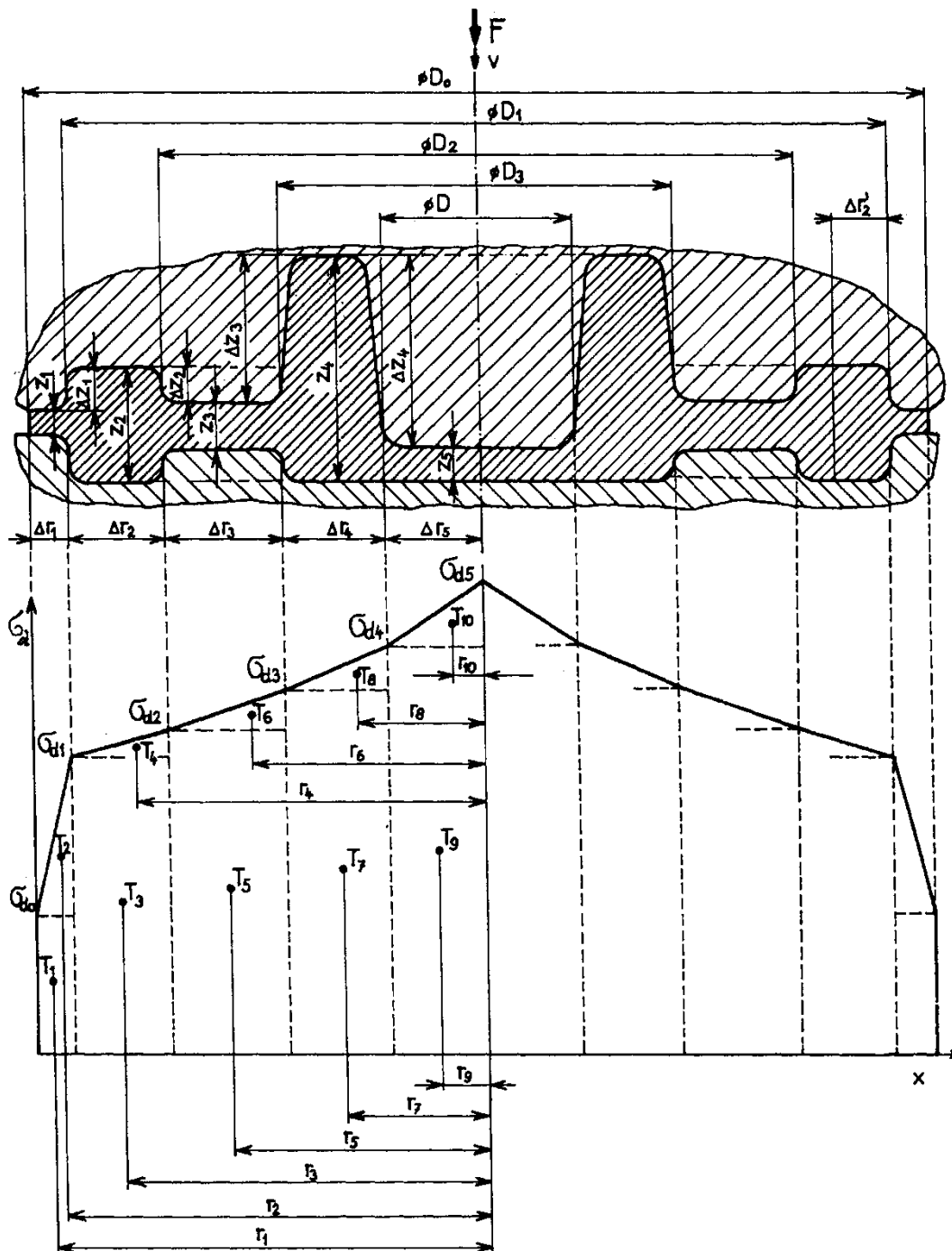


Měř. 1:2

Číslo	$T_{\text{KOV}}$ [	$\sigma_p$ [	$Z_1$ [ mm	$\Delta r_1$ [mm]	$V$ [ $\text{ms}^{-1}$ ]	$f$	Příjmení ,jméno
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

# Výpočtový model dle TOMLENOVA [1], [2]

## Geometrický model



**Materiálový model :**

Přirozený přetvárný odpor  $\sigma_p$  pro zadanou ocel a kovací teplotu určit z příložené tabulky

Přirozený přetvárný odpor $\sigma_p$ [MPa], vybraných ocelí za kovací teploty							
( rychlost přetvoření $\dot{\phi} = 2 \cdot 10^2$ [s <sup>-1</sup> ] )							
Ocel	Kovací teplota [°C ]						
	800	900	1000	1100	1200	1250	1300
<sup>30</sup> ChGSA <b>14331</b>	145	91	60	42	28	22	16,5
<b>15123</b>	107	85,5	62	42	21	21	17
<b>15235</b>	-	70	43	26,5	16	12	9
<b>15520</b>	-	107	72	50	32	24	20
<b>16220</b>	127	83	58	40	26	22	17
<sup>36</sup> NiCr6 <b>16240</b>	-	60	38	25	15	13	10
<b>16320</b>	140	90	62	42	29	24	20
<sup>14</sup> NiCr14 <b>16420</b>	125	82	58	41	28	21	17
<sup>31</sup> NiCr14 <b>16440</b>	138	89	61	41	26	20	16
EN 10027-1, X6Cr13 <b>17020</b> ferit.	-	51	32	27	7	4,4	3,4
EN 10027-1, X30Cr13 <b>17023</b> marten.	-	121	75	47	29	23	18
<b>17029</b>	-	128	76	44	26	20	15
EN 10027-1, X6Cr17 <b>17041</b> ferit.	-	51	37	24	11,5	7,9	4,8
<b>17047</b>	-	40	23,5	13,8	8,0	6,2	4,6
<b>17061</b>	-	35	22	13,5	8,4	6,7	5
EN 10027-1, X6CrAl13 <b>17125</b> ferit.	-	38	26	18	9,2	6,3	4,2
<b>17134</b>	-	101	62	38	23	14	-
<b>17241</b>	-	108	63	37	22	17	12
EN 10027-1, X10CrNiTi18-10 <b>17246</b> austenit	-	130	76	45	26	20	15
<b>17252</b>	-	200	120	70	41	20	-
<b>17253</b>	-	136	88	59	38	31	-
EN 10027-1, X12CrNi25-21 <b>17255</b>	-	121	76	48	30	24	-
<b>17347</b>	-	180	106	61	34	26	19
<b>17455</b>	-	91	62	42	28	23	13
<b>17536</b>	-	101	66	43	28	22	18



**Matematický model Tomlenova**

$\sigma_p^* = \sigma_p \cdot C_o$  přirozený přetvárný odpor s vlivem poklesu teploty ve výronku  
Deformační odpory ve sledovaných řezech s výraznou změnou průřezu.

$$\sigma_{d0} = (1 + 0,73 \cdot f) \sigma_p^*$$

$$\sigma_{d1} = \sigma_{d0} + \sigma_p^* \frac{\Delta r_1}{z_1}$$

$$\sigma_{d2} = \sigma_{d1} + \sigma_p \frac{\Delta r_2}{z_2}$$

$$\sigma_{d3} = \sigma_{d2} + \sigma_p \frac{\Delta r_3}{z_3}$$

$$\sigma_{d4} = \sigma_{d3} + \sigma_p \frac{\Delta r_4}{z_4}$$

Vypočtené hodnoty deformačních odporů vyneseme do grafu pod geometrický model

Kovací síla působící ve směru pohybu zápustky

$$F_N = \int_S \sigma_d \cdot ds = 2\pi \int_0^{\frac{D}{2}} \sigma_d \cdot r \cdot dr = 2\pi \sum_{j=1}^n S_j \cdot r_j;$$

kde  $S_j = \frac{1}{2}(\sigma_{j-1} + \sigma_j) \cdot \Delta r_j$  jsou dílčí plochy v úsecích  $\Delta r_j$  pod čarou deformačních odporů.

Složka kovací síly vznikající od smykových napětí  $\tau_f = f \cdot \sigma_p$

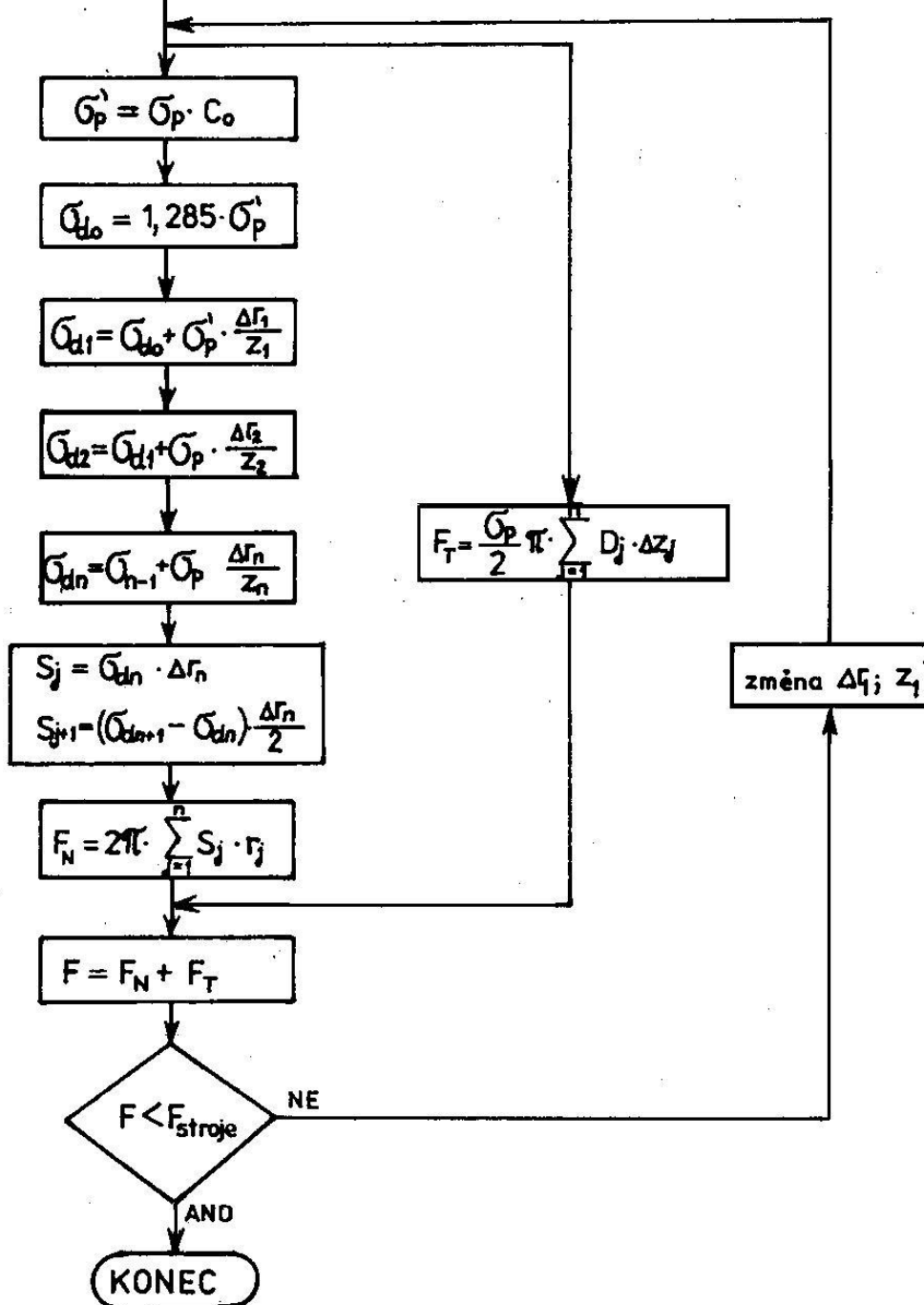
$$F_T = \sum_{j=1}^n \tau_{fj} \cdot \pi \cdot D_j \cdot \Delta z_j = \pi \cdot f \cdot \sigma_p \sum_{j=1}^n D_j \cdot \Delta z_j$$

Celková kovací síla

$$F_C = F_N + F_T \quad [N \cdot 10^{-3} = kN]$$

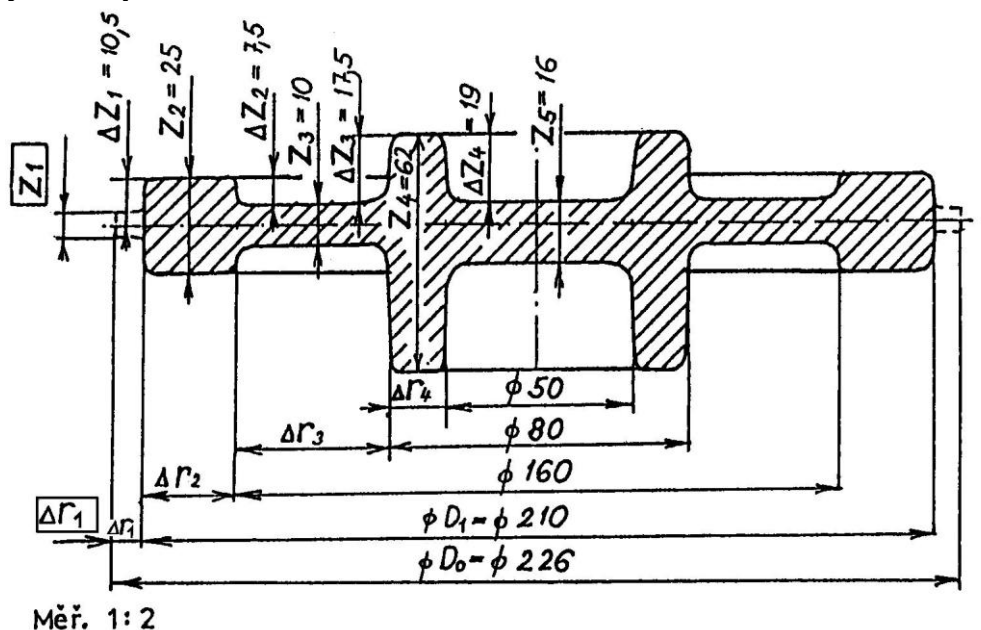
Zadání

Rozměry výronkové drážky	$\Delta r_1 ; z_1$
Rozměry výkovku	$\phi D ; z_1 \text{ až } z_n ; \Delta r_1 \text{ až } \Delta r_n$
Koeficient	$C_o$
Přirozený přetvárný odpor	$\sigma_p$

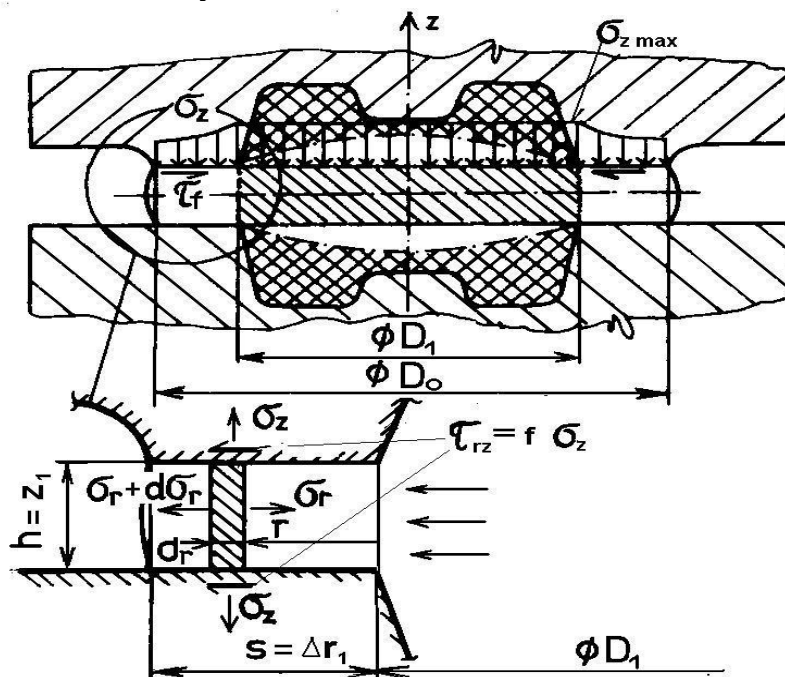
Výpočtový model  
dle TOMLENOVA

Výpočtový model dle GELEJIHO [1], [2]

*Geometrický model-příklad*



*Detailní geometrický model oblasti výronku*



**Materiálový model** : Přirozený přetvárný odpor  $\sigma_p$  pro zadanou ocel a kovací teplotu určit rovněž z příložené tabulky.

### Matematický model dle Gelejiho

Z podmínky rovnováhy sil ve vodorovném směru  $r$  na deskovém elementu ve výronkové drážce, po úpravě získáme diferenciální rovnici rovnováhy ve tvaru

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2 \cdot \tau_{rz}}{h} \sigma_p = 0, \text{ kterou upravíme pro } \tau_{rz} = f \cdot \sigma_z \text{ a podmínku plasticity}$$

$$\sigma_r - \sigma_z = \sigma_p \text{ do tvaru } \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2 \cdot f}{h} \sigma_r - \frac{2 \cdot f}{h} \sigma_p = 0.$$

Tuto nehomogenní diferenciální rovnici řešíme metodou variace konstant, přičemž vzhledem k původnímu geometrickému modelu kola dosadíme:

$$h = z_1 \text{ a } s = \Delta r_1$$

Řešením dostáváme vztah pro exponenciální průběh radiálního napětí ve výronkové drážce

$$\sigma_r = -\sigma_p \left[ e^{\frac{2f}{z_1}(\Delta r_1 - r)} - 1 \right] \text{ a z podmínky plasticity vyjádříme normální napětí ve}$$

směru kovací síly:

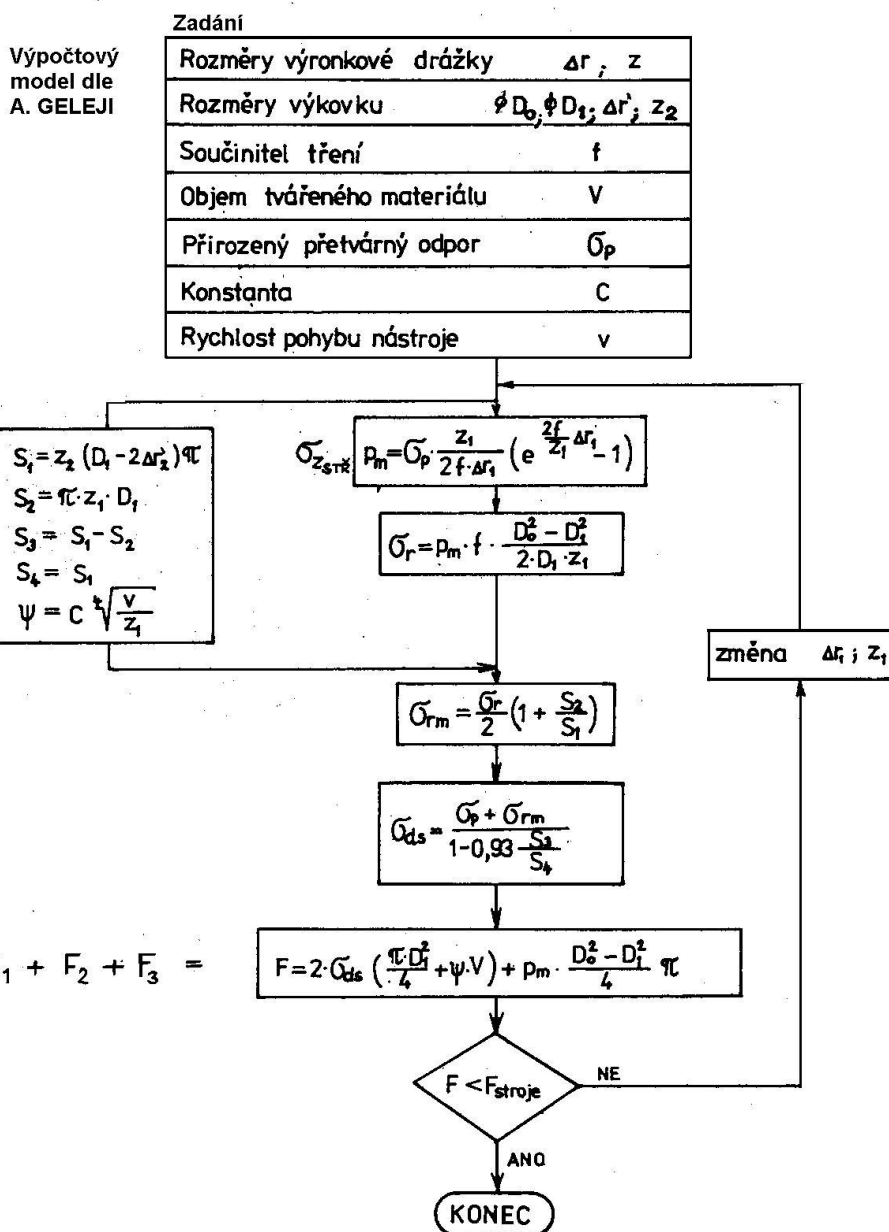
$$\sigma_z = -\sigma_p \cdot e^{\frac{2f}{z_1}(\Delta r_1 - r)}$$

Deformační odpor ve výronkové drážce je vyjádřen středním napětím ve směru osy  $z$ .

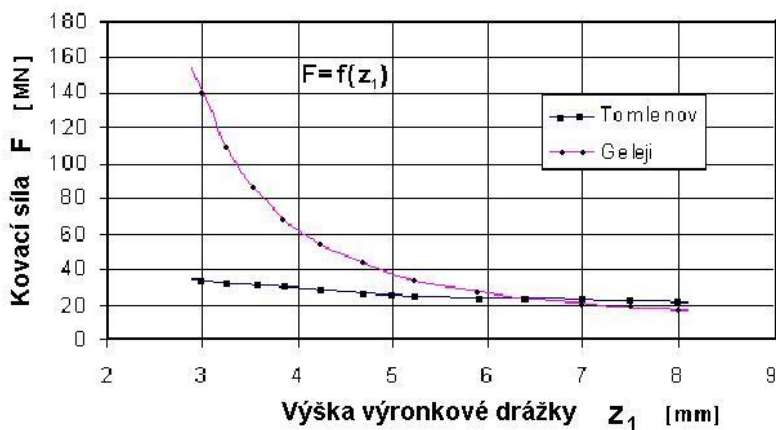
$$\sigma_d = -\sigma_{z \text{ stř}} = -\frac{1}{S} \int \sigma_z \cdot dr = \sigma_p \frac{z_1}{2f \cdot \Delta r_1} \left[ e^{\frac{2f}{z_1} \cdot \Delta r_1} + 1 \right]$$

Kovací síla je potom složena ze dvou částí

$$F_{\text{KOVACÍ}} = \sigma_{z \text{ stř}} \cdot S_{\text{výronku}} + \sigma_{z \text{ max}} \cdot S_{\text{výkovku}} \quad [N]$$



Grafické srovnání průběhu kovací síly na výšce výronkové drážky



## 9. cvičení

### PARAMETRY OHÝBÁNÍ

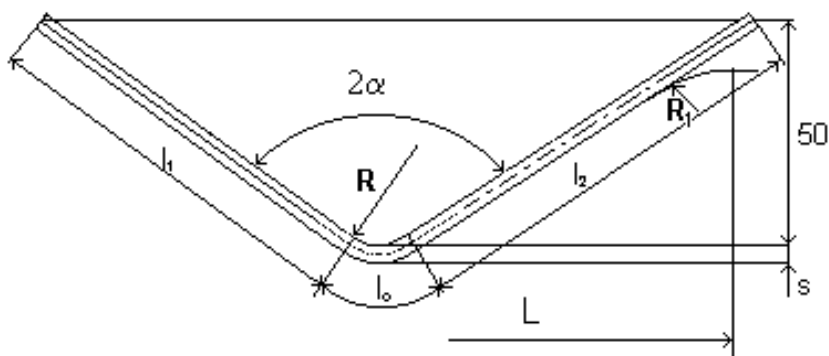
#### Stanovení ohýbacích sil a odpružení po ohybu

Zadání:

Pro navržený tvar výlisku z ocelového plechu dle náčrtu stanovte délku výchozího polotovaru, provedte kontrolu minimálního poloměru ohybu, stanovte polohu neutrální vrstvy  $\rho_n$ ,  $\rho_o$  a odpružení  $\beta$ . Dále provedte výpočet potřebného ohybového momentu a ohýbací síly pro alternativní výpočtové vztahy dle studijní literatury [1], [2]

Příklad zadání		ocel 14 331.3	ocel 11 523.1		
$R_m$	MPa	716,5	510		
$R_{p0,2}$	MPa	521,4	353		
$A_5$	%	21,8	23		
$E$	MPa	$2,06 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$		
$R_1$	mm	9	9		Poloměr hrany ohybnice
$s_0$	mm				Tloušťka plechu
$R$	mm				Poloměr ohybu
$b$	mm				Šířka pásu plechu
$\alpha$	°				Úhel ohybu
$L$	mm				
$f$	-				Sočinitel tření

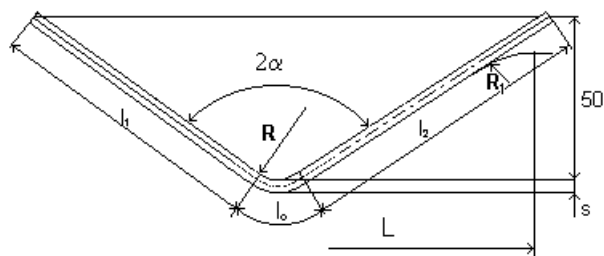
#### Geometrický model ohýbaného pásu



## TEORIE TVÁŘENÍ- Parametry ohýbání

Stanovení ohýbacích sil a odpružení po ohybu

Ocel:		
R <sub>m</sub>		MPa
Re Rp0,2		MPa
E		MPa
f		-



**akademický rok:**

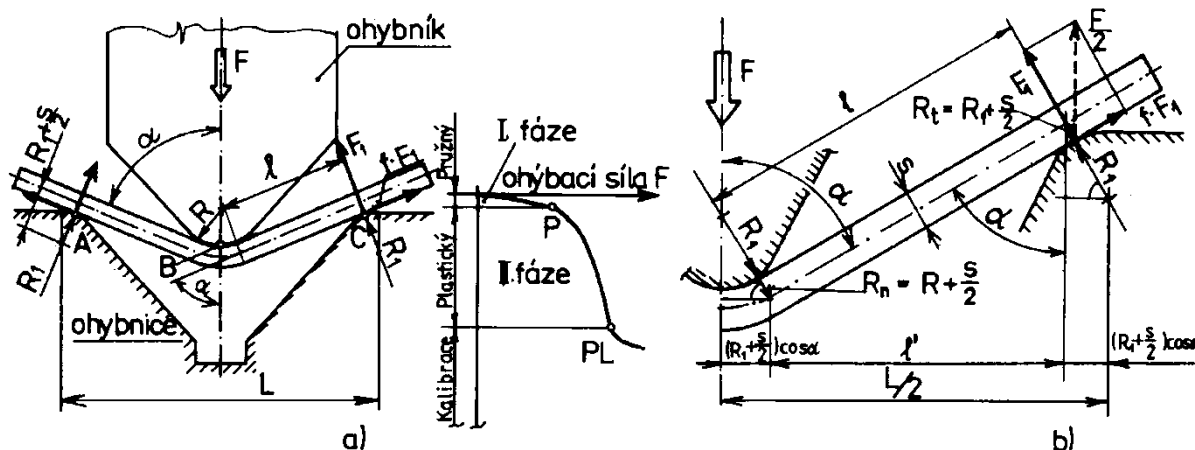
**semestr:**

**studijní skupina:**

Čís.zad ání	<b>b</b> mm	<b>L</b> mm	$\alpha_0$ [ ° ]	<b>R</b> mm	<b>s<sub>0</sub></b> mm	Příjmení, jméno
<b>1</b>						
<b>2</b>						
<b>3</b>						
<b>4</b>						
<b>5</b>						
<b>6</b>						
<b>7</b>						
<b>8</b>						
<b>9</b>						
<b>10</b>						
<b>11</b>						
<b>12</b>						
<b>13</b>						
<b>14</b>						
<b>15</b>						

Výpočtový model [1], [2]

### Geometrický model výpočtu ohybu do V



**Materiálový model:** dle zadání  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$

### Matematický model

Z geometrického modelu je zřejmé že, jde o volný ohyb širokých pásů osamělou silou. Ze složkové rovnováhy plyne vztah pro ohýbací sílu  $F = 2(F_1 \cdot \sin \alpha + f \cdot F_1 \cdot \cos \alpha)$ . Na konci ideálního plastického ohybu (bez kalibrace) pro ohybový moment platí:

$M = F_1 \cdot l = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{b \cdot s^2}{4} \sigma_k$ . Po dosazení do předchozí rovnice pro ohýbací sílu po úpravě obdržíme:

$$F = \frac{b \cdot s^2}{1 \cdot \sqrt{3}} \sigma_k (\sin \alpha + f \cdot \cos \alpha)$$

Pro rameno "l" z geometrie ohybu plyne:  $l = \left[ \frac{L}{2} - (R + R_1 + s) \cos \alpha \right] \frac{1}{\sin \alpha}$ ; Pak výsledný vztah pro výpočet ideální ohýbací síly širokých pásů do V bude mít tvar;

$$F = \frac{b \cdot s^2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_k (\sin \alpha + f \cdot \cos \alpha) \sin \alpha}{\left[ \frac{L}{2} - (R + R_1 + s) \cos \alpha \right]}$$

Alternativní vztah dle ČSN 22 7340 kde  $\alpha$  je vrcholový úhel.

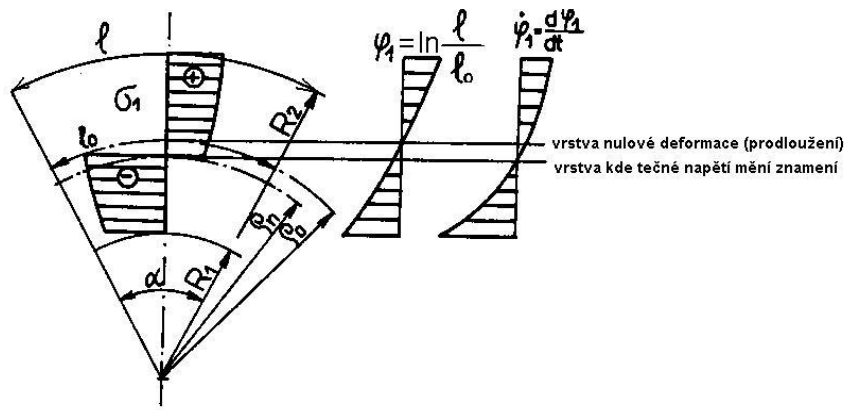
$$F_v = \frac{b \cdot s^2 \cdot R_e}{2R} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

Ohýbací síla na mezi plastické deformace:

$$F_p = \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{b \cdot s^2}{L} \sigma_k; \text{ kde } \sigma_k = R_e \text{ (} R_{p0,2} \text{)}$$



## Neutrální vrstvy



Poloměr neutrální vrstvy ve které se mění znamení tečného napětí  $\sigma_l = \sigma_t$

$$\rho_n = \sqrt{(R_1 \cdot R_2)}$$

Poloměr vrstvy nulové deformace (nulového prodloužení)

$$\rho_0 = \frac{R_2^2 - R_1^2}{2 \cdot s_0} = \rho_{str} \frac{s}{s_0}$$

**Minimální poloměr ohybu** ( pro maximální poměrnou deformaci krajního vlákna  $R_2$  na mezi pevnosti)

$$R_{1min} = \frac{s}{2} \left( \frac{1}{\varepsilon_{1max}} - 1 \right) = C \cdot s$$

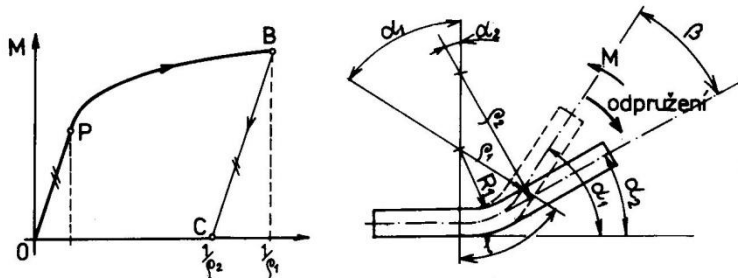
Koeficient  $C = 0,5$  až  $0,6$  pro měkkou ocel dle doporučení technologů

## Maximální poloměr ohybu

( z podmínky dosažení meze pružnosti v krajních tahových vláknech  $\varepsilon_{1min} = \frac{\sigma_k}{E}$  )

$$R_{1max} = \frac{s}{2} \left( \frac{E}{\sigma_k} - 1 \right)$$

## Odpružení při ohybu (širokých pásů)



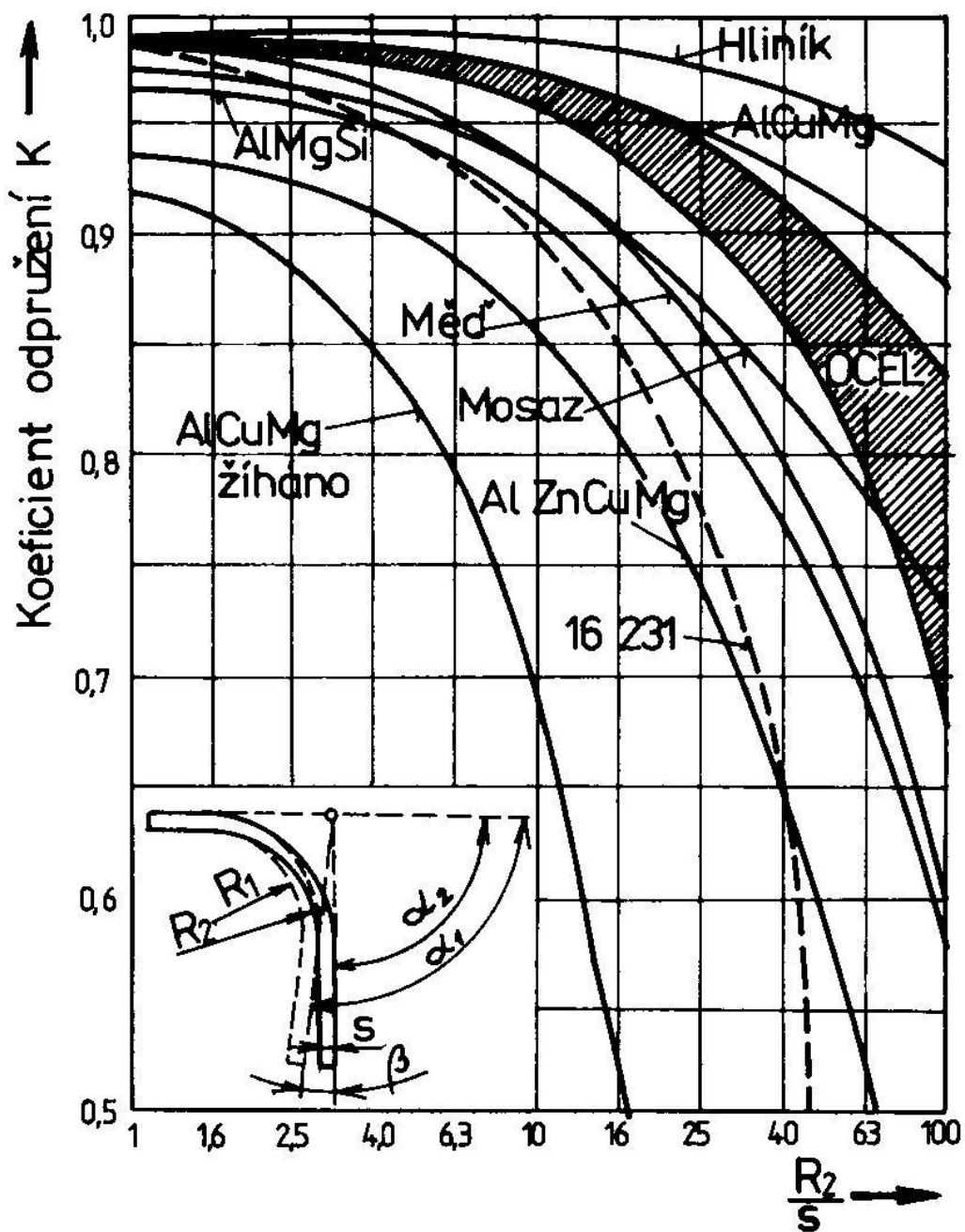
$$\beta = \alpha_1 - \alpha_2 = \frac{M}{EI} I_o (1 - \mu^2) = \frac{2 \cdot I_o}{s \cdot E} \sigma_{1p} \quad \text{kde} \quad \sigma_{1p} = \frac{M}{W}$$

V technické praxi je odpružení např. stanoveno koeficientem " $k = \alpha_2 / \alpha_1$ " pomocí empirických vztahů. Pro ohyb do tvaru V a U např.:

$$\operatorname{tg} \beta_v = 0,375 \frac{L}{k \cdot s} \frac{R_e}{E}$$

$$\operatorname{tg} \beta_u = 0,75 \frac{lm}{k \cdot s} \frac{R_e}{E}$$

kde koeficient odpružení je pro různé materiály v následujícím diagramu.



## 10. cvičení

### HLUBOKÉ TAŽENÍ

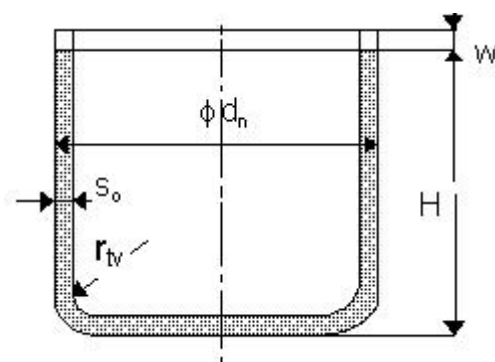
Zadání:

Pro výtazek dle náčrtu, vyrobený hlubokým tažením z ocelového plechu určete rozměry výchozího polotovaru přístřihu - rondelu, počet tažných operací a jejich odstupňování a potřebu použití přidržovače. Dále určete tažnou a přidržovací sílu pro jednotlivé operace, tažnou vůli a poloměr zaoblení tažnice  $r_{tc}$ .

Příklad zadaných parametrů:

	Ocel 11 523-3	Ocel 11 301_21
$R_m$ MPa		310
$E$ MPa		$2,06 \cdot 10^5$
$\Psi_{krč} = Z_k$		0,21
$s_o =$ mm		0,8
$\phi d_n =$ mm		46
$r_{tv} =$ mm		3,2
$H =$ mm		68
$\alpha_{taž} = 30^\circ$		30
$f$		0,12

*Geometrický model zadaného kališku*



TEORIE TVÁŘENÍ **Hluboké tažení**

skupina

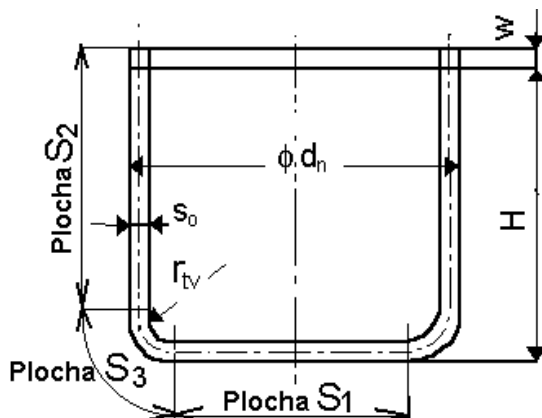
ocel:

<b>R<sub>m</sub></b>		MPa
<b>E</b>		MPa
<b>α<sub>TAŽ</sub></b>		°
<b>Z = Ψ<sub>krč</sub></b>		

	<b>Ψ<sub>krč</sub></b>	<b>s<sub>0</sub></b>	<b>d<sub>n</sub></b>	<b>r<sub>tv</sub></b>	<b>H</b>	<b>f</b>	Jméno, příjmení
	-	mm	mm	mm	mm	-	
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							

## Výpočtový model hlubokého tažení

### Geometrický model pro výpočet rozvinutého tvaru přístřihu (rondelu)



**Materiálový model:** dle zadání materiálu ,

- mez pevnosti v tahu  $R_m$ , [MPa]
- modul pružnosti  $E$  [MPa]
- zúžení- kontrakce  $Z = \Psi_{krč}$  [- ] při začátku tvorby krčku dle Šofmana

**Matematický model postupu výpočtu:**

Stanovení dílčích ploch rozvinutého tvaru

1) plocha dna :

$$S_1 = \frac{\pi \cdot (\phi d_n - 2s_o - 2r_{tv})^2}{4}$$

2) plocha válcového pláště:  $S_2 = \pi \cdot \phi d_n [H - (r_{tv} + s_o) + w]$

-kde „w“ je přídavek na ostřížení (nepravidelnost tvaru – tzv. cípatost), který stanovíme z následující technologické tabulky

Přidávky na ostřížení válcových výtažků bez příruby				
Výška výlisku	Velikost přídavku w mm při poměrné výšce výlisku $\frac{d}{h}$			
h [mm]	0,5 - 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,5	2,5 - 4
10	1,0	1,2	1,5	2,0
20	1,2	1,6	2,0	2,5
50	2	2,5	3,3	4,0
100	3	3,8	5,0	6,0
150	4	5,0	6,5	8,0
200	5	6,3	8,0	10,0
250	6	7,5	9,0	11,0
300	7	8,5	10,0	12,0

3) plocha přechodu dna do pláště:  $S_3 = \pi^2 \cdot (r_{tv} + s_o) \frac{\phi d_n}{2}$

Průměr přístřihu- rondelu je stanoven s celkové plochy  $S = S_1 + S_2 + S_3$

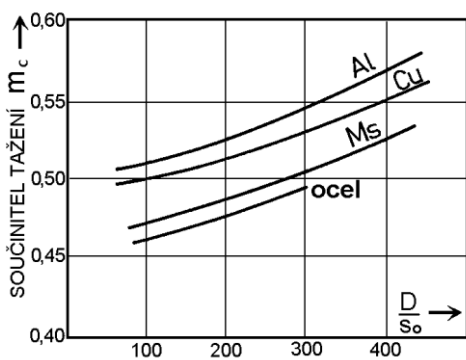
Výsledný vnější průměr přístřihu.

$$\phi D_o = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$$

Celkový součinitel tažení

$$M_c = m_c = \frac{\phi d_n}{\phi D_o} = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \dots m_n$$

Mezní hodnotu součinitele tažení můžeme stanovit z následujícího diagramu pro poměr  $D/s_o$  přístřihu.



Je-li vypočtená hodnota  $m_c$  menší, je nutno táhnout ve více operacích. Pro víceoperační tažení je v [1], [2] odvozen vztah pro potřebný počet operací ve tvaru:

$$n = 1 + \frac{\ln \cdot d_n - \ln(m_1 \cdot D_o)}{\ln \cdot m^*}$$

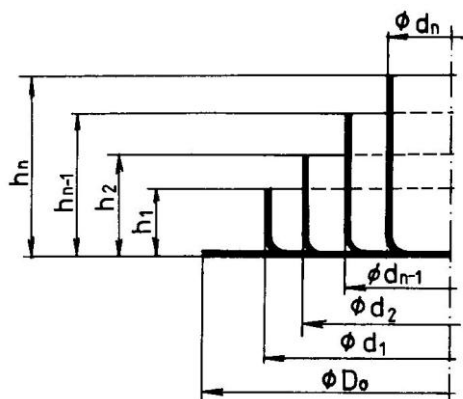
Střední hodnotu součinitele tažení doporučuje volit např. norma ČSN 22 7301 v rozmezí:

$$m^* \approx 0,75 \div 0,85$$

Poznámka: Technologové ke stanovení součinitelů tažení používají různých tabulek, viz např. níže

Vliv poměrné síly rondelu na koeficient tažení na první tah						
	Poměrná síla rondelu $\frac{s}{D} \cdot 100$					
	2,0 -1,5	1,5 -1,0	1,0 -0,6	0,6 -0,3	0,3 -0,15	0,15-0,08
$m_1$	0,48-0,50	0,50-0,53	0,53-0,55	0,55-0,58	0,58-0,60*	0,60-0,63
$m_2$	0,73-0,75	0,75-0,76	0,76-0,78	0,78-0,79	0,79-0,80	0,80-0,82
$m_3$	0,76-0,78	0,78-0,79	0,79-0,80	0,80-0,81	0,81-0,82	0,82-0,84
$m_4$	0,78-0,80	0,80-0,81	0,81-0,82	0,82-0,83	0,83-0,85	0,85-0,86
$m_5$	0,80-0,82	0,82-0,84	0,84-0,85	0,85-0,86	0,86-0,87	0,87-0,88
Operace	Největší poměrná hloubka tažení $\frac{h}{d}$					
	1	0,94-0,77	0,84-0,65	0,70-0,57	0,62-0,5	0,52-0,45
2	1,88-1,54	1,60-1,33	1,36-1,1	1,13-0,94	0,96-0,83	0,9 - 0,7
3	3,5 - 2,7	2,8 - 2,2	2,3 - 1,8	1,9 - 1,5	1,6 - 1,3	1,3 - 1,1
4	5,6 - 4,3	4,3 - 3,5	3,6 - 2,9	2,9 - 2,4	2,9 - 2,0	2,0 - 1,5
5	8,9 - 6,6	6,6 - 5,1	5,2 - 4,1	4,1 - 3,3	3,3 - 2,7	2,7 - 2,0

### Rozměry výtažku po jednotlivých tažných operacích:



$$d_1 = m_1 \cdot D_o$$

$$d_2 = m_2 \cdot d_1$$

$$d_3 = m_3 \cdot d_2$$

až

$$d_n = m_n \cdot d_{n-1}$$

Poslední požadovaný průměr výtažku dává skutečný součinitel tažení  $m_n$  a je potřeba posoudit, zda je tento tah potřebný nebo zda-li je možno dokončit tah na konečný průměr kalíšku v předchozím tahu aniž by došlo k překročení mezních hodnot přetvoření.

Obdobně vypočteme výšky kalíšku v jednotlivých tazích nebo je určíme pro poměr  $\frac{S_o}{D_o} \cdot 100$

z výše uvedené tabulky pro odečtené  $\frac{h}{d}$

### Použití přídržovače dle kritéria

Dle ČSN 227301 zjistíme potřebu použití přídržovače pro 1. operaci:

$$U = 50 \left( z - \frac{\sqrt{S_o}}{\sqrt[3]{D_o}} \right)$$

kde materiálová konstanta pro ocelový hlubokotažný plech je  $z = 1,9$

Pro 1. Operaci platí: když  $U \geq \frac{d_1}{D_o} \cdot 100$  musíme použít přídržovač,

je-li  $U < \frac{d_1}{D_o} \cdot 100$  nemusíme použít přídržovač.

Pro další operace:

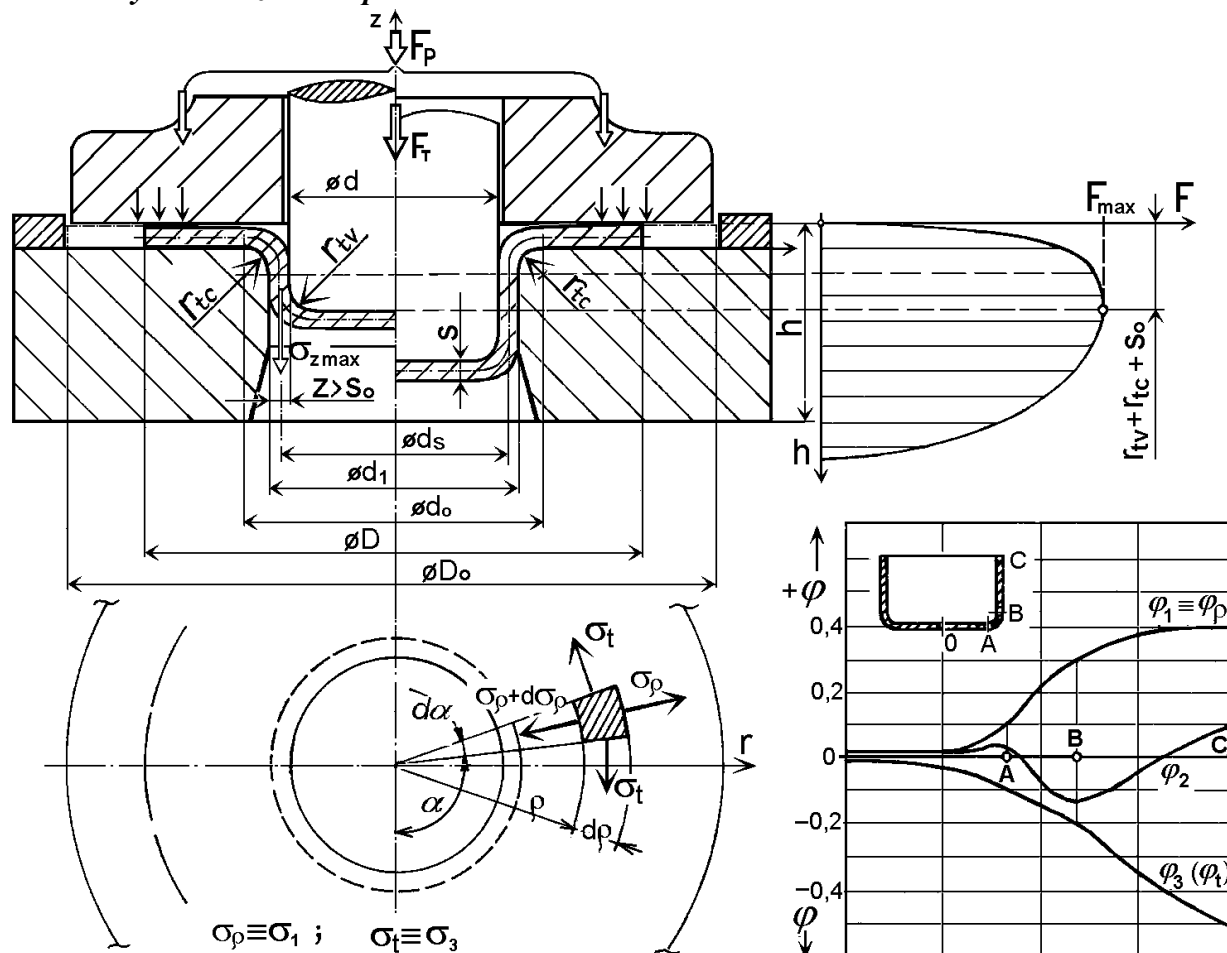
když  $\frac{d_i}{d_{i-1}} < 0,9$  musíme použít přídržovač.

Stanovení síly přídržovače z měrného tlaku dle ČSN 22 73 01  $p_p = (2 \text{ až } 3) \text{ MPa}$

$$F_p = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - d^2) \cdot p_p$$

## Výpočet tažné síly

### Geometrický model tažení v 1. operaci



Pro osové napětí  $\sigma_z$  v průřezu vtažky 1. operace je z rovnice rovnováhy sil a podmínky plasticity HMH  $\sigma_p - \sigma_t = \beta \cdot \sigma_p$  pro rovinný stav deformace odvozena rovnice :

$$\sigma_z = \sigma_d = (\sigma_p + \sigma_{pTRENÍ} + 2\sigma_{pOHYB}) \cdot e^{f \cdot \alpha}$$

která zahrnuje složku membránového napětí bez vlivu přidržovače, složku napětí od vlivu tření na přírubě mezi přidržovačem a tažnicí a složku od dvojnásobného prostorového ohybu.

To vše s vlivem tření opásáním  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  na tažné hraně tažnice dle Eulera. Po dosazení za

jednotlivé složky napětí  $\sigma_p$  obdržíme upravenou rovnici pro napětí  $\sigma_z$ , které je v absolutní hodnotě rovno deformačnímu odporu  $|\sigma_z| \equiv \sigma_d$ .

$$\sigma_z = \sigma_{pstr} \left[ \beta \cdot \ln \frac{R}{\rho} + \frac{f \cdot F_p}{\pi \cdot \sigma_{pstr} \cdot R \cdot s_o} + \frac{s_o}{2 \cdot r_{tc} + s_o} \right] (1 + 1,6 \cdot f)$$

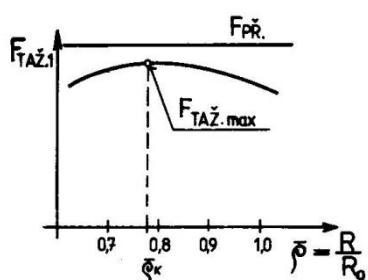
Největší hodnotu napětí  $\sigma_{zmax}$  dosáhneme pro  $\rho = \frac{d_s}{2}$



Šofman pro parabolickou aproximaci křivky zpevnění odvodil vztah pro výpočet střední hodnoty přirozeného přetvárného odporu  $\sigma_{pstr}$ .

$$\sigma_{pstr} = \frac{R_m}{1-Z} \left( \frac{\epsilon_{tstř}}{Z} \right)^{\frac{Z}{1-Z}} = \frac{R_m}{1-Z} \left[ \frac{1 - 0,5 \left( \bar{\rho} + \frac{m_1}{\sqrt{1 - \bar{\rho}^2 + m_1^2}} \right)}{Z} \right]^{\frac{Z}{1-Z}}$$

Po zavedení a úpravě do předchozího vztahu pak dostáváme výsledný vztah pro deformační odpor  $|\sigma_z| \equiv \sigma_d$ . a konečně i pro tažnou sílu v 1. operaci, která musí být menší než síla potřebná na přetržení dna.



$$F_{TAŽ1} = \pi \cdot d_s \cdot s_o \cdot \sigma_d < F_{přetržení}$$

Maximum tažené síly je zpravidla pro  $\bar{\rho} = \frac{D}{D_o} \in (0,60 \text{ až } 0,99)$

Určení poloměru zaoblení tažnice

- pro první tah  $r_{tc1} = 0,8 \cdot \sqrt{(D_o - d_1) \cdot s_o}$
- pro druhý a další tahy  $r_{tc2} = \frac{d_1 - d_2}{2} \cdot s_o$  do 60 mm
- $r_{tc2} = (6 \div 10) \cdot s_o$  nad 60 mm

Určení tažné vůle, která závisí na tloušťce taženého plechu a druhu materiálu :

$$z = s_o + k\sqrt{10 \cdot s_o}$$

### Výpočet tažné síly v dalších operacích

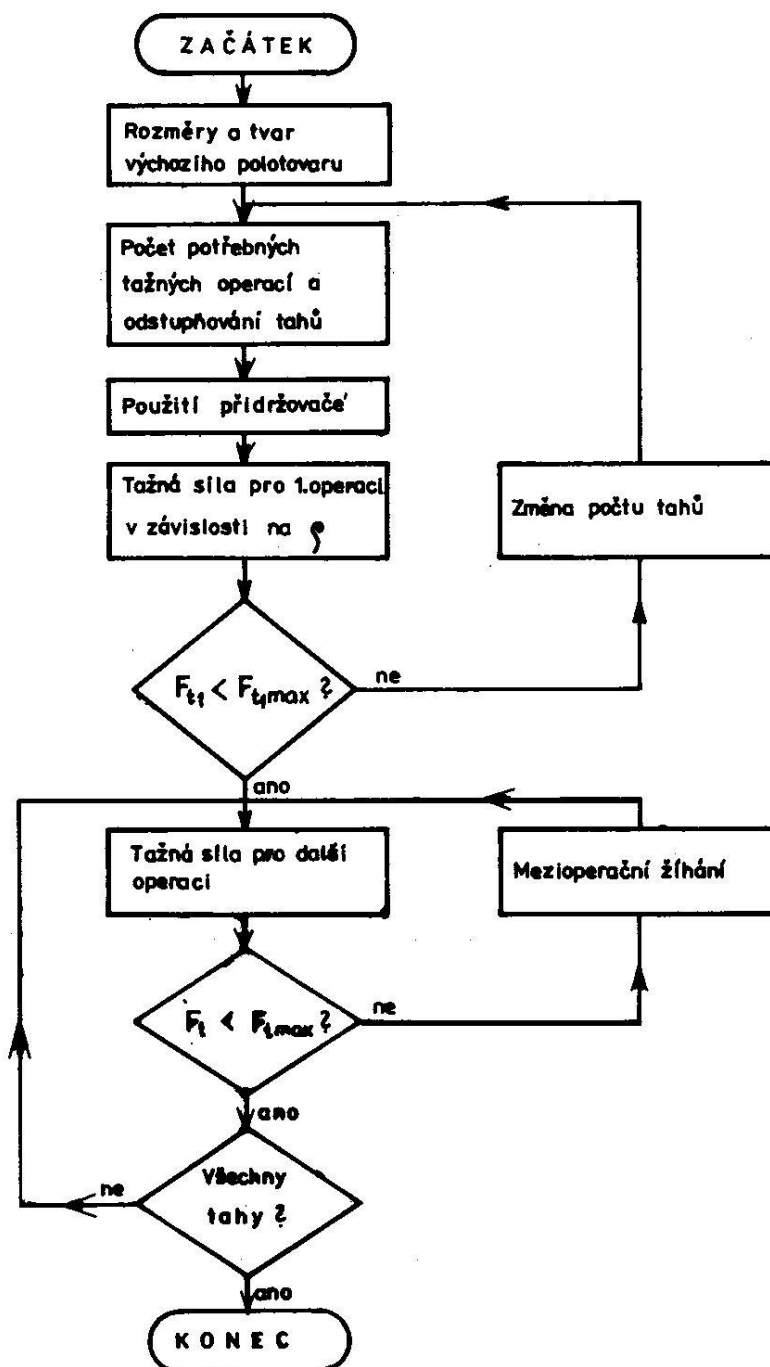
Výpočtový model je obdobně sestaven podle [1] nebo [2]. Matematický model je především určen výsledným vztahem pro výpočet tažného (deformačního) odporu ve 2. a dalších operacích.

$$\sigma_{\rho III} = 1,1\sigma_{pstr} \left( \left( 1 + \frac{tg\alpha}{f} \right) \left[ 1 - \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{\frac{f}{tg\alpha}} \right] + \left( \ln \frac{r_1}{R_1} + \frac{s_o}{2 \cdot R_p} \right) \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{\frac{f}{tg\alpha}} + \frac{s_o}{2 \cdot r_{tc} + s_o} \right) (1 + f \cdot \bar{\alpha})$$

Tažná síla musí být menší než síla potřebná k utržení dna

$$F_{TAŽ2} = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot s_o \cdot \sigma_{\rho III} < F_{přetržení2} = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot s_o \cdot R_m$$

Vývojový diagram postupu výpočtu tažných sil



## 11. cvičení

### METODA PŘETVÁRNÉHO ODPORU

Experimentálně-analytické stanovení průběhu napětí a přetvoření na válcovém výtažku

Zadání:

Pro výtažek dle náčrtu, vyrobený v první operaci hlubokým tažením z přístřihu-rondelu ocelového plechu o  $\phi D_o = 96 \text{ mm}$  a tloušťky  $S_o = 0,7 \text{ mm}$  s nanesenou kruhovou sítí, vypočtete a graficky znázorníte průběhy logaritmického přetvoření  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_{ef}$  a průběhy hlavních napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_3$  v jednotlivých úsecích rozvinuté povrchy výtažku.

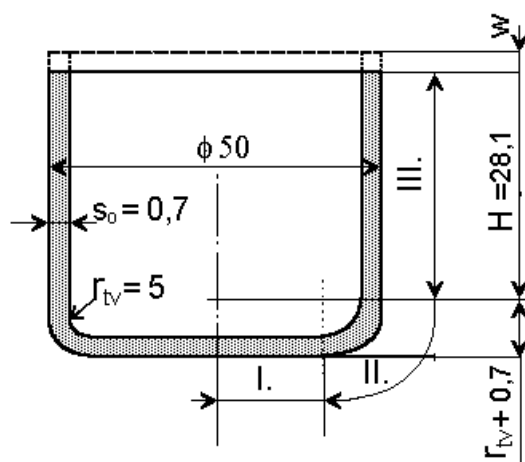
Řešení proved'te pro změřené hodnoty rozměrů **2a** a **2b** deformované sítě a materiálový model pro ocel 11 305 (uklidněná hlubokotažná ocel odolná proti stárnutí)

Ocel 11 305	( 0,05% C, 0,32% Mn, 0,09 % P, 0,016 % S )	
	$R_m$ [ MPa ]	320
	$R_e$ [ MPa ]	194
	$E$ [ MPa ]	$2,06 \cdot 10^5$
	$A_{10}$ [%]	47,3

2a = mm dle tabulky zadání

2b = mm dle tabulky zadání

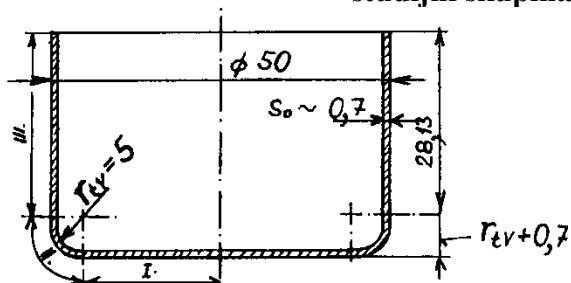
*Geometrický model výtažku*



## TEORIE TVÁŘENÍ - Metoda přetvárného odporu

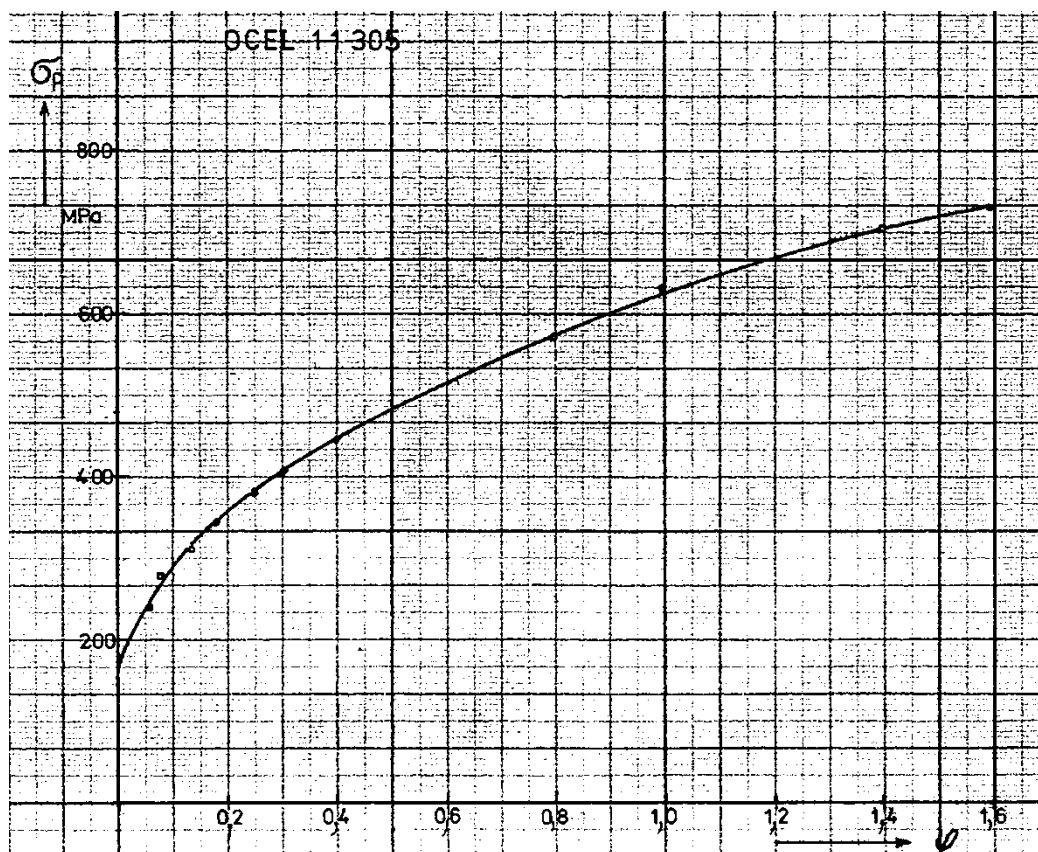
akademický rok.  
semestr:  
studijní skupina

Ocel:	
R <sub>m</sub> =	MPa
R <sub>e</sub> =	MPa
A <sub>10</sub> =	%



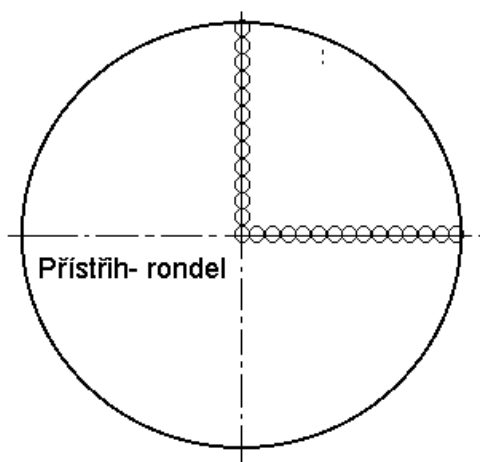
Bod mereni	Poloha [mm]	Úsek	2a [mm]	2b [mm]		Příjmení
1	1	I.	2,0	2,0		
3	5		2,0	2,0		
5	9		2,0	2,0		
7	13		2,0	2,0		
9	17		2,0	2,0		
10	19	II.	2,03	1,99		
11	21		2,06	1,98		
12	23		2,09	1,97		
13	25		2,17	1,94		
14	27		2,24	1,85		
15	29	III.	2,44	1,69		
16	31		2,73	1,56		
17	33		2,79	1,48		
18	35		2,93	1,38		
19	37		3,00	1,35		
20	39		3,13	1,30		
21	41		3,21	1,20		
22	43		3,27	1,17		
23	45		3,31	1,14		
24	47	3,36	1,11			

### Materiálový model:

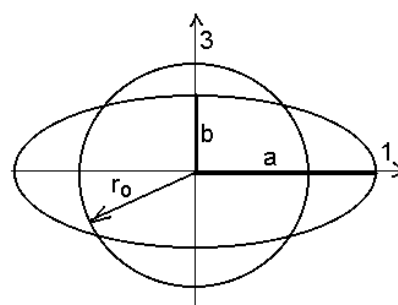


### Geometrické schéma sítě

Rozmístění sítě na přístřihu-rondelu



Deformační schéma prvku sítě



**Matematický model**

Hlavní přetvoření na jednotlivých elementech:  $\varphi_1 = \ln \frac{a}{r_o}$  je vždy kladné

$$\varphi_3 = \ln \frac{b}{r_o} \quad \text{je vždy záporné}$$

$$\varphi_2 = -\varphi_1 - \varphi_3 \quad \text{ze zákona } V_o = V = \text{konst}$$

Efektivní přetvoření: 
$$\varphi_{ef} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot I_{2D}^\varphi} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{[(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2]}$$

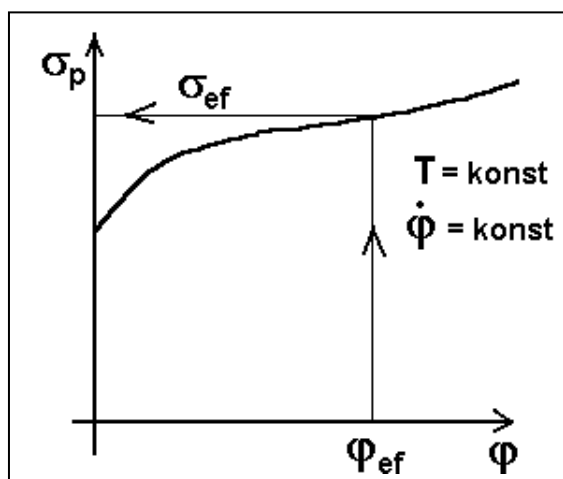
Lodeho parametr přetvoření: 
$$v_\varphi = \frac{2\varphi_2 - \varphi_1 - \varphi_3}{\varphi_1 - \varphi_3} = v_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \in \langle -1; 1 \rangle$$

Lodeho součinitel: 
$$\beta = \frac{2}{\sqrt{3 + v_\sigma^2}}$$

Upřesnění podmínky plasticity HMH pro rovinný stav přetvoření:  $\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \cdot \sigma_p$

Z procesu přetvoření po malých etapách, kdy  $d\varepsilon = d\varphi = \frac{dL}{L}$  použijeme LÉVY-MISES rovnice ve tvaru:

$$\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{\varphi_3 - \varphi_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \frac{3}{2} \frac{\varphi_{ef}}{\sigma_{ef}}$$



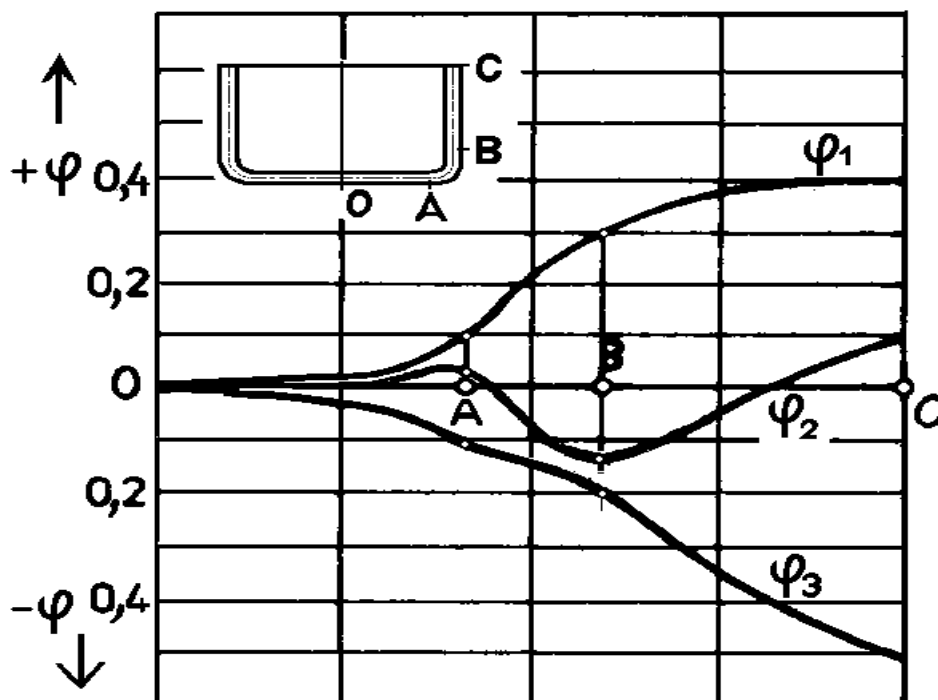
Pro výpočet stanovenou hodnotu efektivního přetvoření, odečteme z křivky  $\sigma_p - \varphi$  materiálového modelu efektivní napětí a dosadíme do Lévy-Mises rovnice.

Za předpokladu že, střední napětí  $\sigma_2 \approx 0$ , lze ze dvou rovnic o dvou neznámých vypočítat složky hlavních napětí:

$$\sigma_1 = \frac{\beta \cdot \sigma_p}{\left[ 1 + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{\varphi_1 - \varphi_2} \right]};$$

$$-\sigma_3 = \sigma_1 \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{\varphi_1 - \varphi_2}$$

Příklad znázornění průběhů složek hlavních přetvoření po rozvinutém povrchu



Poznámka: Vzhledem k zákonitosti průběhů složek deviatoru napětí na Lodeho parametru napjatosti  $v_\sigma \in \langle -1; 1 \rangle$  ( $D\sigma_1$  je vždy kladné,  $D\sigma_3$  je vždy záporné a pouze  $D\sigma_2$  může měnit znamení) mají hlavní složky přetvoření stejný průběh. Tato zákonitost plyne z podmínky že první invariant deviatoru napjatosti i první invariant deviatoru - tenzoru přetvoření jsou rovny nule

$$I_{1D}^\sigma = (\sigma_1 - \sigma_s) + (\sigma_2 - \sigma_s) + (\sigma_3 - \sigma_s) = 0$$

$$I_{1D}^\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$$

## cvičení 12.

### BĚŽNÉ A PŘESNÉ VYSTŘIHOVÁNÍ

Zadání:

Porovnejte stav napjatosti při běžném a přesném vystřihování součásti typu páky dle náčrtu a vypočtete potřebné síly pro vystřihování. Bližší zadání parametrů dle tabulky.

Zadané parametry:

Pevnost ve stříhu ( střížný odpor) [1], [2], [18] atd.

$$\tau_{stř} \approx (0,75 \text{ až } 0,90) R_m - \text{ocel, měkký Al}$$

$$\tau_{stř} \approx (0,65 \text{ až } 0,75) R_m - \text{Ms, měkký dural}$$

$$\tau_{stř} \approx (0,60 \text{ až } 0,65) R_m - \text{tvrdý dural}$$

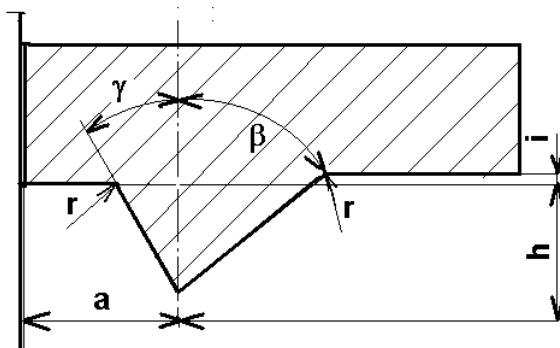
$$\tau_{stř} \approx (0,68 \text{ až } 0,72) R_m - \text{nerez oceli a slitiny Ti}$$

Podle [18] a dalších pramenů.

<u>Materiál-označení</u>	<b>Mez pevnosti</b> <b>R<sub>m</sub></b> [MPa]	<b>Střížné napětí</b> (střížný odpor) <b><math>\tau_{stř}</math></b> [MPa]	<b>Tloušťka plechu</b> <b>S<sub>o</sub></b> [mm]	<b>Geometrie</b> <b>nátlačné hrany</b> (dle firmy)
Ocel 11 301.20	280 - 380	240 - 330		
11373.1	360 - 440	270 - 390		
11 523.1	510 - 630	380 - 560		
12 010.1	min 340	min 300		
12 020.20	380 - 500	330 - 440		
12 050.1	min. 560	min 480		
14 220.3	max.650	560		
42 44 12.1 (Al Mg2)	150 - 180	110 - 120		
42 42 01.1 (AlCu4Mg1) D1 .3 tvrdý -vytvrzený	230 - 250 430 - 470	110 - 130		
42 42 03.1 (AlCu4Mg2) D16 .3 tvrdý -vytvrzený	260 - 280 460 - 500	120 - 130		
Měď 42 30 01.1	200	180		
42 30 01.3	300	260		
Mosaz 42 32 12.1	300	260		
42 32 22.1	350	300		
Bronz 42 30 35.3	550	480		



## Doporučené geometrie nátláčné hrany

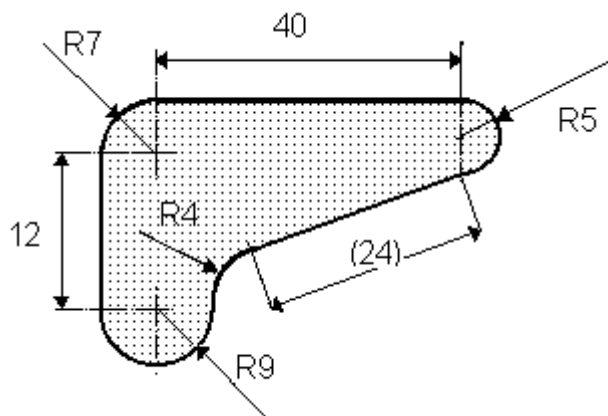


Firma	$s_0$ [mm]	$a$ [mm]	$h$ [mm]	$i$ [mm]	$\gamma$ [°]	$\beta$ [°]
FEINTOOL	1 - 4*	(1,0-1,5) $s_0$	(0,33-0,5) $s_0$	0,05	30 - 40	40 - 45
MAYPRES	1 - 4*	0,7 $s_0$	0,2 $s_0$	0,05	40	40
E.A.POPOV		(0,6-0,7) $s_0$	(0,1-0,2) $s_0$	0,05-0,1	30	45
HEINDRICH-SCHMID	3 - 5 od 4 mm obě hrany	(0,5-2,0) $s_0$ $c = (0,3 - 1,0) s_0$		0,0	40	40
SCHMÖCKEA		(0,6-1,2) $s_0$	(1/6- 1/3) $s_0$			

Poznámka: \* od tloušťky plechu 5 mm se doporučuje horní i dolní nátláčná hrana

## TEORIE TVÁŘENÍ - Běžné a přesné vystřihování

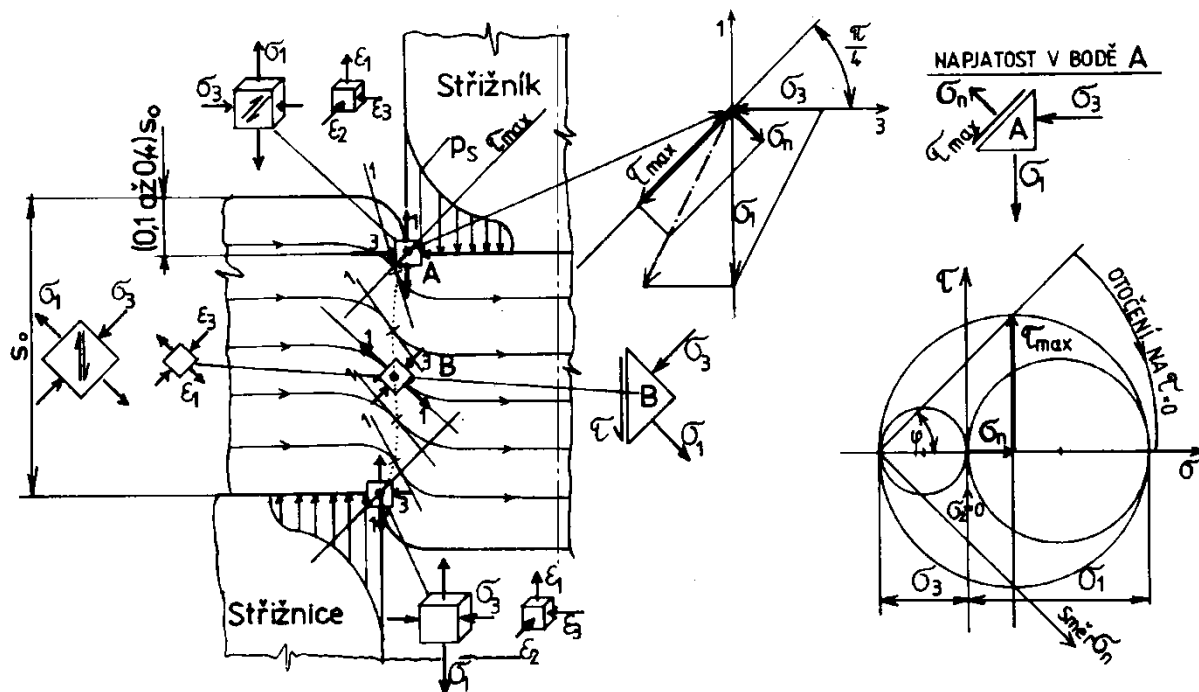
### Příklad zadání



Číslo zadání	Materiál	$\tau_s$	$s_o$	a	h	$\gamma$	$\beta$	podpis
		MPa	mm	mm	mm	°	°	
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								

## Výpočtový model – běžné vystřihování

### Geometrický model běžného vystřihování



**Materiálový model:** hodnoty meze pevnosti v tahu  $R_m$  a střížného napětí  $\tau_{stř}$  [MPa], dle zadání materiálu

### Matematický model

Střížná síla :

$$F = n \cdot L \cdot s_o \cdot \tau_{stř} \quad [N]$$

kde  $n = 1,0$  až  $1,5$  součinitel vlivu otupení ( zpravidla max.  $1,3$ , jinak přebroušení střížníku)

$L$  - délka stříhu (obvod střížné hrany), [mm]

$s_o$  - tloušťka prostřihovaného plechu, [mm]

$\tau_{stř}$  - pevnost ve stříhu ( střížný odpor), [ MPa ]

Hlavní tahové a tlakové napětí v krajních vláknech pod střížnou hranou- pod břitem v bodě A

$$\sigma_1 = \tau_{stř}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_1}{2}$$

$$\sigma_2 \cong 0$$

Střední napětí  $\sigma_s = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$

Ukazatel napjatosti - Lodeho parametr napjatosti:

$$v_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

Lodeho součinitel: 
$$\beta = \frac{2}{\sqrt{3 + \nu_\sigma^2}}$$

ke zpřesnění podmínky plasticity HMM:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \cdot \sigma_p \text{ ze které plyne } \sigma_p$$

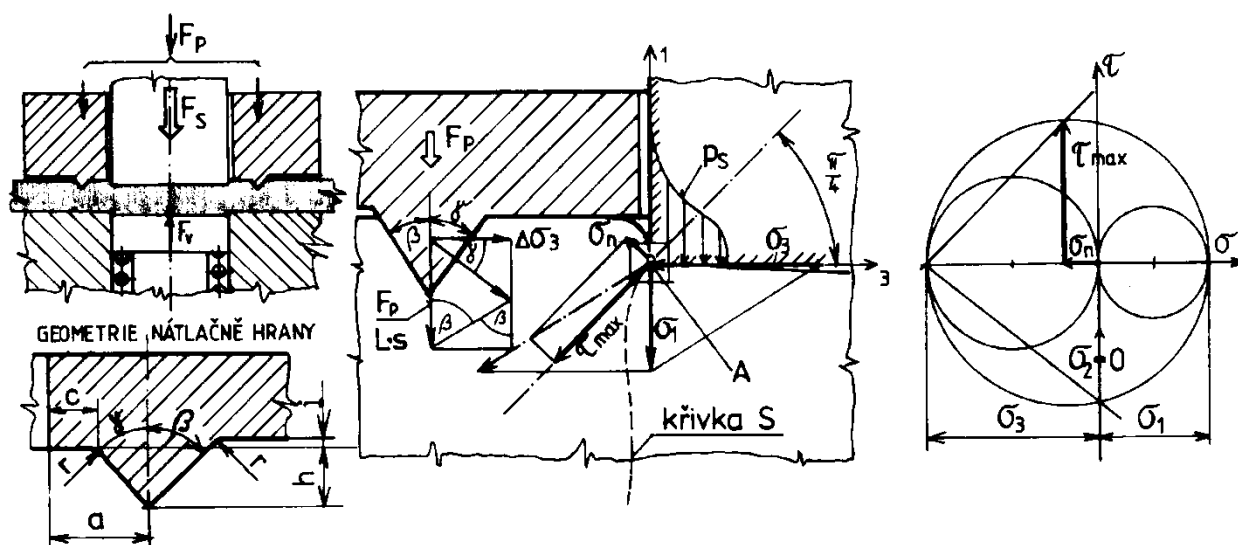
Velikost normálové složky napětí, která je kolmá k rovině maximálních smykových napětí a rozevívá mikrotrhliny a rozvíjí konečný lom se zhoršenou kvalitou střížné plochy:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

Úkol: Určete polohu bodu A v „Z diagramu napjatosti“ pro  $\frac{\sigma_s}{\sigma_p}$  a Lodeho parametr  $\nu_\sigma$

### Výpočtový model – přesné vystřihování

*Geometrický model přesného vystřihování*



Průmět funkční plochy přidržovače s nátláčnou hranou o délce L:

$$S_p = L \cdot h(\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg} \beta) \quad [\text{mm}^2]$$

Síla přidržovače potřebná na zatlačení hrany do plechu

$$F_p = S_p \cdot R_e = L \cdot h(\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg} \beta) R_e \quad [\text{N}]$$

Z geometrického schématu rozložení přídavné síly lze odvodit přídavnou složku síly ve směru

kolmém na směr stříhu 
$$\frac{\Delta F_3}{L} = \frac{F_p}{L} \frac{1}{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \gamma}.$$

Přírůstek tlakového napětí v bodě A střížné plochy.

$$\Delta\sigma_3 = \frac{F_3}{L \cdot s_0}$$

Výsledné tlakové napětí v bodě A střížné plochy.

$$\sigma_{3C} = \sigma_3 + \Delta\sigma_3$$

Z podmínky plasticity určíme tahovou složku hlavního napětí v prvním přiblížení:

$$\sigma_{1C} = \beta \cdot \sigma_p + \sigma_{3C} \quad \text{kde } \sigma_p = Rm, \text{ a } \beta = z \text{ předchozího řešení volného uzavřeného stříhání.}$$

Vypočítáme Lodeho parametr napjatosti:

Dále stanovíme novou-upřesněnou hodnotu Lodeho součinitele

$$\beta_C = \frac{2}{\sqrt{3 + v_{\sigma C}^2}}$$

Z podmínky plasticity určíme upřesněnou tahovou složku hlavního napětí, která je menší než při běžném uzavřeném stříhání:

$$\sigma_{1C} = \beta_C \cdot \sigma_p + \sigma_{3C}$$

Velikost normálové složky napětí, která je kolmá k rovině maximálních smykových napětí a svírá vznikající mikrotrhliny.

$$\sigma_{nC} = \frac{\sigma_{1C} + \sigma_{3C}}{2}$$

Prostřížený polotovar je držen plovoucím vyhazovačem až do konečného lomu - oddělení a střížná plocha má vyšší kvalitu:

Výsledná střížná síla je dána vztahem:

$$F_s = n \cdot L \cdot s_0 \cdot \sigma_{1C}$$

Síla plovoucího vyhazovače, kterou musí přemáhat střížník (brání předčasnému dolomení výstřížku před koncem zdvihu (volíme  $p_v = (20 \text{ až } 70) \text{ MPa}$ , půdorysná plocha výstřížku ( $S_{\text{prostřížku}}$ ) ohraničená obvodovou délkou střížné hrany - obvodem prostřížku

$$F_v = S_{\text{prostřížost}} \cdot p_v$$

Celková síla potřebná pro přesné vystřihování :

$$F_{\text{celk}} = F_s + F_p + F_v$$

Úkol: Určete polohu bodu A v „Z diagramu napjatosti“ pro přesné prostřihování ( pro  $\frac{\sigma_{sC}}{\sigma_p}$  a

Lodeho parametr  $v_{\sigma C}$  )

Znázornění změny normálního napětí  $\sigma_n$  v Mohrových kružnicích

