

Benešová S. – Bernášek V.

## TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

TATO SKRIPTA VZNIKLA V RÁMCI PROJEKTU CZ.1.07/2.2.00/15.0399

ISBN 978-80-261-0449-0

Vydala Západočeská univerzita v Plzni, 2014

© **Ing. Soňa Benešová, Ph.D. a Doc. Ing. Vladimír Bernášek, CSc.**

## **1. FYZIKÁLNÍ POVAHA A MECHANISMUS PLASTICKÉ DEFORMACE**

Při zpracování kovových materiálů tvářením využíváme jejich plasticitu – tj. schopnost přetváření, aniž dojde k porušení. Lze tedy tvářením definovat následovně:

Tváření je výrobní operace, při které dochází k trvalé změně tvaru výchozího polotovaru v důsledku působení vnějších sil (materiál je deformován pod křivkou solidu).

Výsledkem tvářením: a) změna tvaru a rozměrů

b) fyzikální změny materiálu, které se projevují strukturálními změnami a tím i změnami fyzikálních a mechanických vlastností

### **Tváření – plastická deformace**

V tvářeném tělese je třeba účinkem vnější síly vyvolat takový stav napjatosti, aby byla překročena mez kluzu daného materiálu a vznikla tak trvalá deformace požadovaného směru a velikosti, aniž by došlo k porušení soudržnosti.

Proti vnějším silám, které působí na těleso, působí síly vnitřní. Těmito silami se brání materiál svému přetvoření. Výsledný efekt tvářením závisí proto nejen na charakteru vnějších sil, ale také na faktorech ovlivňujících vnitřní síly (např. stavba tvářeného materiálu, teplota). Na rozdíl od pružné deformace dochází při trvalé deformaci k posunu atomů o vzdálenost větší než činí mřížková konstanta.

Plastickou deformaci kovů nemůže způsobit normálové napětí  $\sigma$ , ale pouze smykové napětí  $\tau$ . Při plastické deformaci dochází k trvalému posuvu atomů z jejich rovnovážných poloh, který zůstává zachován i po skončení účinku působení vnějších deformačních sil. Trvalý posuv atomů nastává až po překročení hodnoty tzv. kritického smykového napětí  $\tau_{kr}$ , a to pouze v některých činných krystalografických rovinách a směrech, kde se pohyb atomů setkává s nejmenším počtem překážek.

### **1.2. Mechanismus plastické deformace**

#### **Prostý skluz- translace**

Nejčastějším mechanismem plastické deformace je prostý skluz – translace. Plastická deformace se neuskutečňuje současným přesunem všech atomů v aktivní kluzné rovině, což by vyžadovalo velmi vysoké hodnoty smykových napětí na úrovni teoretické pevnosti ve smyku ( $21 \cdot 10^3$  MPa pro čisté Fe, skutečně zjištěná hodnota pro monokrystaly Fe je 29MPa). Struktura reálných kovů obsahuje již ve výchozím stavu velké množství mřížkových poruch, zejména dislokací, z nichž část se účinkem působícího  $\tau_{kr}$  uvede do pohybu kluzem po kluzné rovině. Kluzu se zúčastňují postupně pouze některé z možných kluzných rovin. Mezi těmito činnými kluznými rovinami je krystal nedeformován až do okamžiku, kdy se vlivem rostoucího napětí uvedou do činnosti další kluzné systémy.

### Fyzikální zákony kluzu

- Kluz obvykle nastává v rovinách nejhustěji obsazených atomy.
- Směr kluzu je vždy totožný se směrem nejhustěji obsazeným atomy.
- Z dané skupiny možných kluzných rovin a směrů je činný ten kluzný systém, v němž smykové napětí  $\tau$  dosahuje hodnoty rovné  $\tau_{kr}$ . Toto napětí je pro daný kov, krystalovou mřížku, teplotu a rychlost deformace definován konstantou plasticity.
- Smyková napětí dosahují maximálních hodnot v rovinách skloněných pod úhlem  $45^\circ$  k tzv. hlavním rovinám (tj. v těch rovinách, kde působí pouze normálová napětí), jejichž směr je u mnoha tvářecích postupů totožný se směrem vnější deformační (přetvárné) síly.

Hodnota kritického smykového napětí  $\tau_{kr}$  závisí na:

- rychlosti deformace
- teplotě
- stavu materiálu před deformací (chemické složení, struktura: způsob předchozího zpracování)

Hodnota  $\tau_{krit.}$  je tedy závislá na teplotě, rychlosti deformace a na tom, jestli byl krystal již dříve deformován. Kluz vzniká nejdříve v těch rovinách, kde tangenciální smykové napětí, vyvolané vnější silou, dosáhne  $\tau_{krit.}$

Vztah pro výpočet smykového napětí v rovině skluzu pro příklad tahové zkoušky je následující (obr.1-1) :

$$\sigma_K = \frac{F}{S_K} = \frac{F}{S} \cdot \cos\phi ,$$

Kde  $\sigma_k$  je mez kluzu a  $\phi$  je úhel, který svírá rovina skluzu s osou válcovitého vzorku . V této rovině působí smykové napětí  $\tau$ , které svírá s osou vzorku a tedy i normálovým napětím  $\sigma_k$  úhel  $\lambda$ . Mezi normálovým a smykovým napětím platí závislost

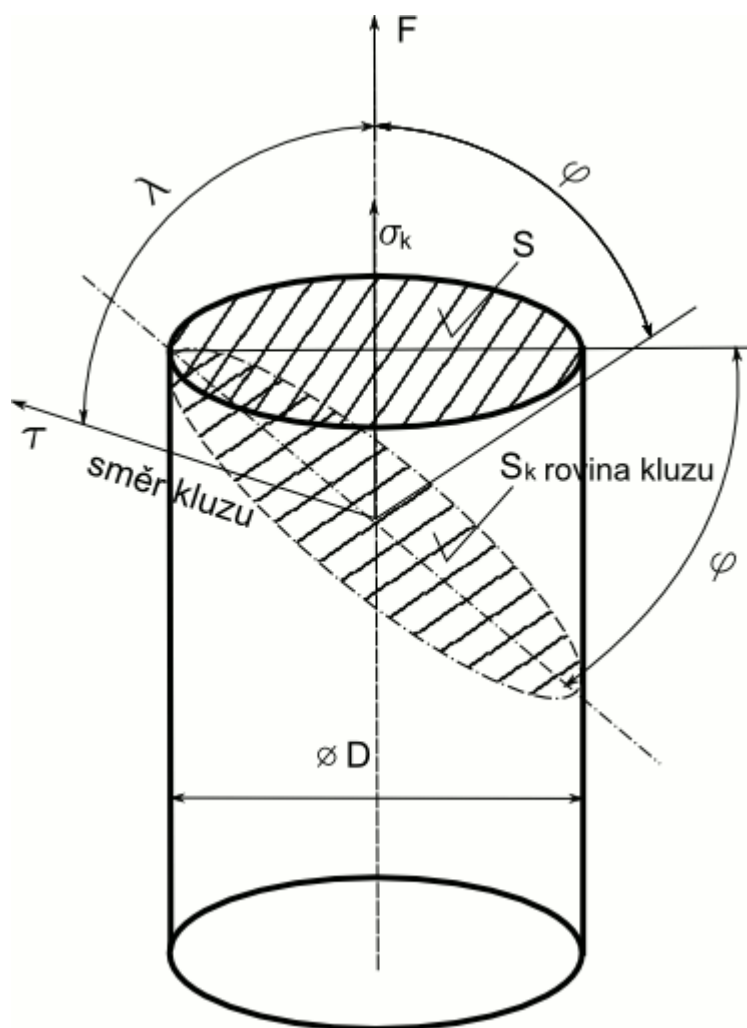
$$\frac{\tau}{\sigma_K} = \cos\lambda$$

Po úpravě získáme vztah:

$$\tau = \frac{F}{S} \cdot \cos\phi \cdot \cos\lambda = \tau_{kr}$$

Pokud toto napětí  $\tau$  dosáhne hodnoty kritického smykového napětí  $\tau_{krit.}$  dochází k dislokačnímu skluzu, a to ve kluzných rovinách, nejhustěji obsazených atomy.

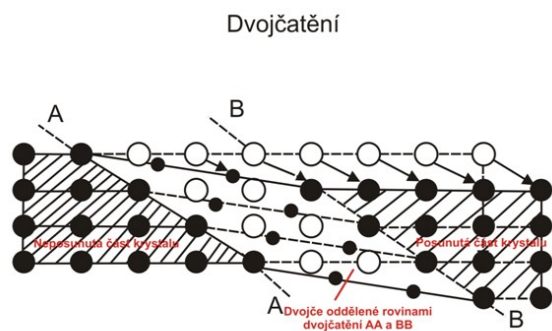
Této hodnoty je nejdříve dosaženo v rovinách, svírajících úhel  $45^\circ$  s osou válcového vzorku tahové zkoušky (později vzniká trojsosý stav napjatosti, kdy se v tzv. krčku aktivují jiné skluzové systémy v různých rovinách).



Obrázek 1-1 Vztah mezi normálovým a smykovým napětím při jednoosém tahovém namáhání zkušební vzorku

### Dvojčatění

Při velmi nízkých teplotách a velkých deformačních rychlostech dochází k plastické deformaci ještě mechanismem tzv. dvojčatění. Při tomto mechanismu se přesunou atomy v části krystalu pouze o část meziatomární vzdálenosti tak, že pokluzem vznikne oblast mřížky zrcadlově souměrná s neposunutou mřížkou podle roviny dvojčatění – tzv. dvojče (obr. 1-2). Mechanismem dvojčatění se nedosahuje velkých plastických deformací. Při tváření se deformační dvojčata vyskytují jen v omezené míře, a to hlavně u slitin mědi a u feritické základní struktury, tvářené velkou deformační rychlostí při nízkých teplotách.



Obrázek 1-2 Dvojčatění podle roviny A-A

### 1.3. Plasticita a tvařitelnost

**Plasticita** je schopnost materiálu plasticky (nevratně) se deformovat účinkem vnějších sil bez makroskopického porušení. U kovových materiálů jsou tyto změny provázány změnami struktury.

**Tvařitelnost** - vlastnost materiálu plasticky (nevratně) se deformovat bez makroskopického porušení v konkrétním tvářecím procesu nebo vázaná na konkrétní zkoušku tvařitelnosti.

Pozn.: Pojmy *tvařitelnost (tvářitelnost)*, jinak *tvárnost*, *plastičnost* (plastičnost, plasticity, ductility, plasticität) a *technologická tvařitelnost* (ductility, workability, formability, formbarkeit, umformbarkeit) nejsou v literatuře ustáleny.

**Tvařitelnost** je funkcí:

a) materiálu:

- chemického složení

- struktury

b) teploty a rychlosti deformace

c) napěťového stavu

d) historie napětí a deformace ( způsob předchozího zpracování tvářením)

e) geometrického faktoru

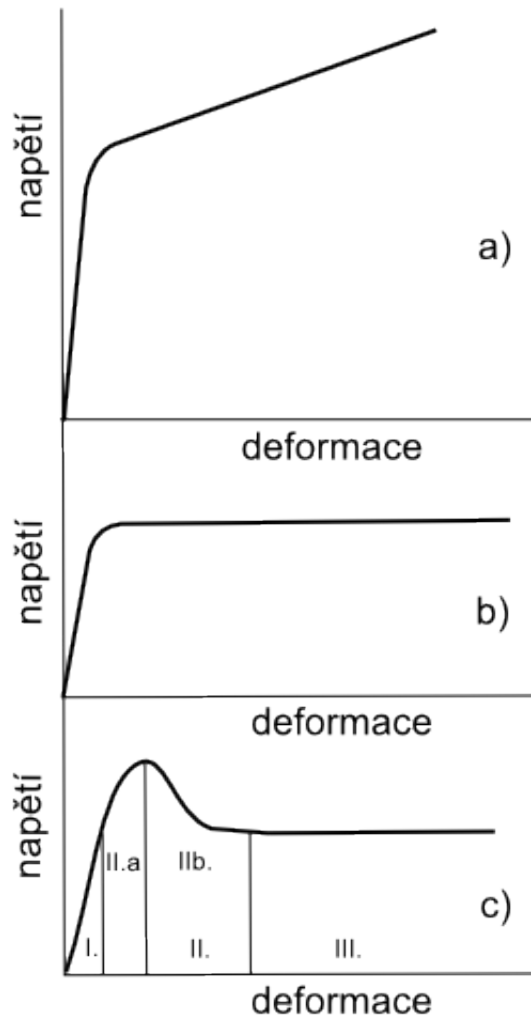
f) vnějšího prostředí

Všechny uvedené proměnné „tvařitelnosti“ se ve tvářecích procesech neuplatňují stejnou měrou.

Při tvářením za tepla se uplatňují dominantně faktory a) a b), tj. materiál s jeho chemickým složením a strukturou a vliv teploty a rychlosti deformace. Potom hovoříme o tzv. „vnitřní“ (metalurgické nebo strukturní) tvařitelnosti.

Při tváření za studena se dominantně uplaňují faktory c) až f), tj. rozhodující vliv má velikost napětí a tvar deformační zóny a dále způsob, jakým bylo dosaženo finální deformace (deformační historie). Jedná se potom o tzv. napěťovou (SOS - state of stress) tvařitelnost.

Chování materiálu a jeho reakce na proces tváření jsou tedy proměnlivé v závislosti na konkrétním technologickém postupu. Pro účely výpočtu sil, deformací a způsobu namáhání při tváření popisujeme materiál pomocí křivky závislosti deformačního napětí na velikosti deformace ( $\sigma - \epsilon$ ), které mají odlišný průběh při tváření za studena a za tepla (obr.1-3).



Obrázek 1- 3 Schéma závislosti napětí na velikosti deformace plasticky tvářených kovů

## 2.VLIV TVÁŘENÍ NA VLASTNOSTI A STRUKTURU KOVŮ

Z hlediska teplot tváření a průběhu fyzikálně-metalurgických procesů rozeznáváme:

a) tváření za studena

b) tváření za tepla

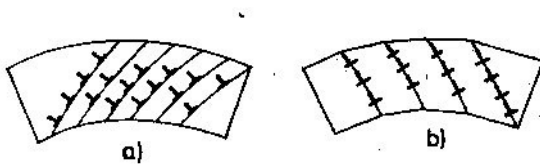
Kritériem mezi tvářením za studena a za tepla je průběh uzdravovacích (odpevňovacích) procesů, tj. zotavení a rekrytalizace. Zvláštní význam mají odpevňovací pochody, které probíhají souběžně s deformačním zpevňováním, označované jako dynamické odpevňovací pochody.

### 2.1.Zotavení

Při zotavení se snižuje uložená deformační energie zrn částečnou anihilací bodových poruch a dislokací, kdy „nadbytečná“ koncentrace bodových poruch (intersticiálních atomů a vakancí) a dislokací se snižuje na rovnovážnou hodnotu. Tím se částečně sníží jejich hustota i napětí, nutné pro plastickou deformaci. Další dislokace zaujmou energeticky výhodnější polohy, dochází k tzv. polygonizaci (obr. 2-1). Ke zotavení dochází při teplotách nižších než je teplota počátku rekrytalizace. Zotavení dislokací se projeví výrazným snížením vnitřních pnutí v kovu a mírným poklesem tvrdosti, pevnosti, meze kluzu a zvýšením plastických vlastností .

Průběh zotavení je přímo závislý na:

- a) stupni deformace
- b) teplotě a době ohřevu



Obrázek 2-1 Schéma hranových dislokací v ohnutém krystalu

Dynamické zotavení je převládajícím změkčovacím mechanismem při tváření kovů s kubickou prostorově centrovanou mřížkou (feritické oceli, Al a jeho slitiny) nebo u kovů s hexagonální mřížkou.



Dynamickým zotavením vznikají v protažených zrnech rovnoosá subzrna. Snížení hustoty dislokací je při dynamickém zotavení nižší než při rekrystalizaci, proto je také úměrně nižší stupeň změkčení.

## 2.2.Rekrystalizace

Při rekrystalizaci dochází k nahrazení původních zrn zrnými novými (nedochází ovšem ke změně krystalické soustavy!), kdy se množství mřížkových poruch zmenší na úroveň vyžíhaného nedeformovaného stavu.

Výsledkem rekrystalizace je nová struktura bez znaků deformace a bez deformačního zpevnění, hovoříme o tzv.primární rekrystalizaci. Kov nabývá vlastností podobných vyžíhanému stavu. Pokud dále roste teplota ohřevu nebo se doba ohřevu prodlužuje, naváže na rekrystalizaci fáze růstu zrna rekrystalizované mřížky. Jde o tzv. sekundární rekrystalizaci. V některých případech může dojít k rychlému růstu některých zrn s určitou krystalografickou orientací na úkor sousedních zrn. Výsledkem je kov s lokálně velmi hrubým zrnem.

Rekrystalizaci lze dělit do těchto fází:

- a) vznik zárodků nových krystalů
- b) jejich růst, až rekrystalizovaná zrna nahradí předchozí deformovanou strukturu
- c) hrubnutí rekrystalizovaného zrna
- d) dodatečný růst některých zrn

Rekrystalizační teplota pro čisté kovy činí 35-45% teploty tavení, tj.  $T_{\text{rekr.}} = (0,35 \text{ až } 0,45) T_{\text{tav.}}$  (v Kelvinech !). Rekrystalizační teplotou  $T_{\text{rekr.}}$  obvykle rozumíme teplotu izotermického ohřevu, při které dojde k úplné rekrystalizaci kovu za 1 hodinu.

*Pozn.: Pro čisté Fe je teplota počátku rekrystalizace cca 300° C.*

Zárodky nových zrn jsou především místa s poměrně pravidelnou mřížkou (koherentní zárodky), k nimž se přidávají (přiřazují) sousední atomy a z nichž začínají růst nová zrna (přibližně rovnoosá).

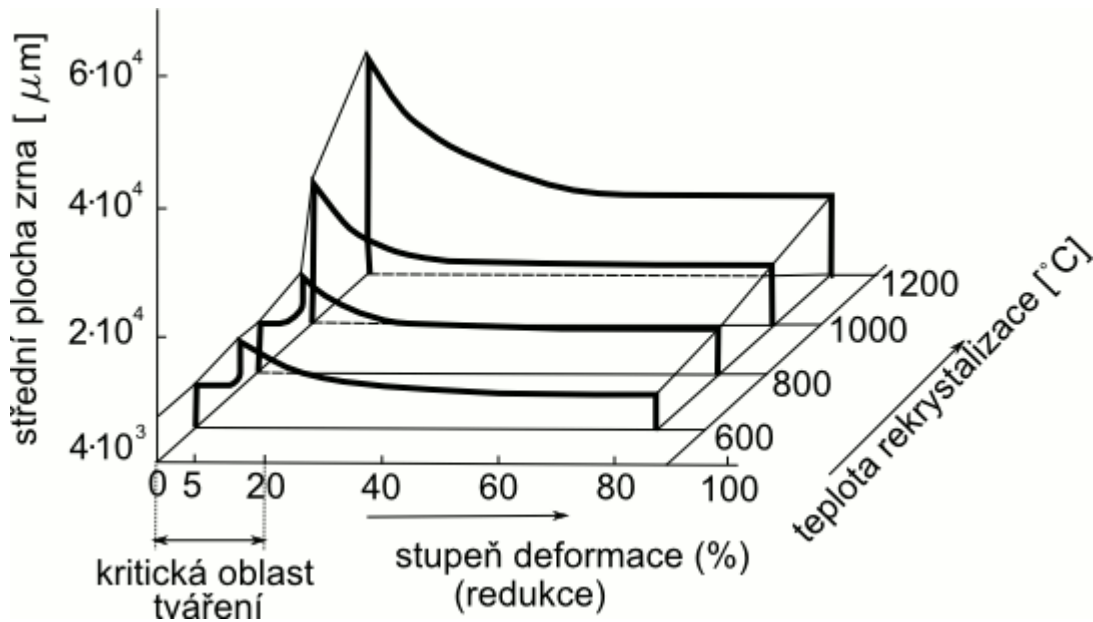
Rekrystalizace probíhá určitou rychlostí, která závisí na:

- a) stupni deformace
- b) teplotě

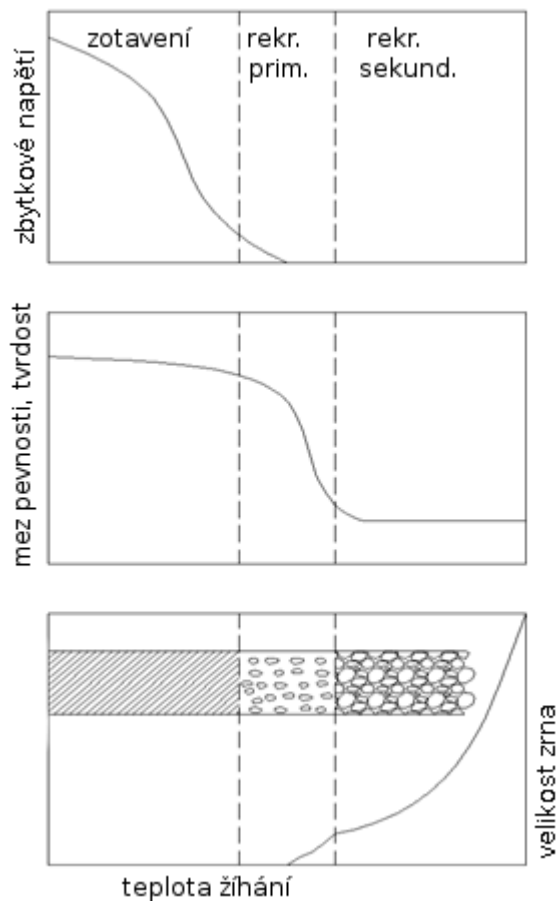
Rekrystalizace, podobně jako zotavení, je tepelně aktivovaným dějem (aktivační energii pro jejich uskutečnění dodáváme ohřevem), proto její průběh závisí nejen na teplotě, ale i na čase.

Hnací silou rekrystalizace je uložená deformační energie. Je-li velká, proběhne rekrystalizace téhož kovu snadněji, tj. při nižší teplotě nebo rychleji.

Důležitou charakteristikou rekrystalizovaného kovu je i velikost zrna. Pro určitou rekrystalizační teplotu je závislá na stupni deformace tvářeného kovu. V kovu, který byl intenzívně tvářen, vzniká při žhání mnoho rekrystalizačních zárodků a výsledkem je jemnozrná struktura. Po malé deformaci rostou naopak nová zrna jen z malého počtu zárodků a zrno katastrofálně hrubne. Deformaci za studena, která vyvolá při rekrystalizaci toto zhrubnutí, označujeme jako kritickou (bývá okolo 5 až 10%). U výrobků, které budou rekrystalizačně žhány, je nutné se jí vyhnout. Závislost mezi deformací, teplotou rekrystalizačního žhání a velikostí výsledného zrna kovu popisuje tzv. rekrystalizační diagram (obr. 2-2). Mechanické vlastnosti se rekrystalizací navracejí na svoji původní úroveň. (obr.2-3)



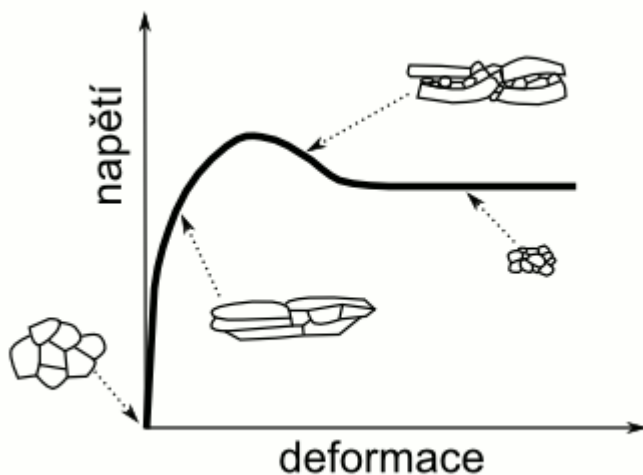
Obrázek 2-2 Rekrystalizační diagram



Obrázek 2-3 Vliv zotavení, primární a sekundární rekrytalizace

Při tváření za tepla dochází k dynamické rekrytalizaci, tj. k rekrytalizaci, která probíhá během procesu tváření. Po dosažení určité kritické hodnoty vnitřní energie, odpovídající kritickému stupni deformace, se vytvoří příznivý stav pro tvorbu zárodků a jejich růst během plastické deformace. Dynamickou rekrytalizací vznikají nová zrna, odstraní se zpevnění a zvyšují se plastické vlastnosti. Tvorba zárodků – nukleace - probíhá přednostně po hranicích původních zrn a u hrubých intermetalických fází. Dynamicky rekrytalizovaná zrna rostou do určité velikosti, odpovídající především velikosti deformace. Tím se liší od průběhu růstu zrn při statické rekrytalizaci, při níž zrna rostou až do vzájemného styku.

Vývoj struktury při tváření za tepla je na obr 2-4. V případě výskytu karbidů ve struktuře tyto ovšem nerekrystalizují, pouze se vlivem tváření lámou a přemísťují ve směru probíhající deformace. Po tváření lze potom pozorovat řádkovitou strukturu, kdy z rozložení karbidů je patrný tok materiálu během tváření.



Obrázek 2-4 Průběh strukturních změn na křivce napětí-deformace

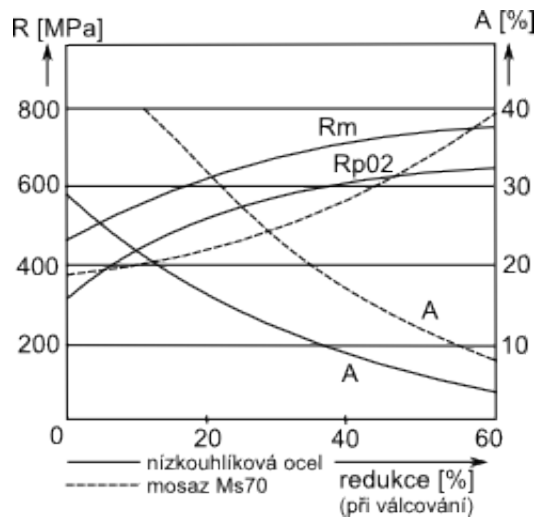
### 2.3. Tváření za studena

Pro procesy tváření za studena je charakteristické zpevňování. U ocelí se děje zpravidla za teplot nižších než  $0,2$  až  $0,3 T_{\text{tav.}}$ , tj. pod teplotami uzdravovacích procesů. Při tváření za studena, kdy základním mechanismem plastické deformace je dislokační skluz, dochází při pohybu dislokací ve skluzových rovinách k jejich interakci s překážkami v mřížce, zejména se substitučními atomy, vakancemi a jinými dislokacemi. Také přítomnost jiných fází ovlivňuje zásadním způsobem dislokační skluz, přičemž závisí na velikosti, tvaru a rozložení těchto fází. Ze začátku zatěžování (tváření) probíhá deformace skluzem jen v zrnech s nejpříznivější orientací vzhledem ke směru zatížení. Během interakcí dislokací s překážkami dochází ke vzniku dislokačních zdrojů, z nichž vznikají další dislokace. Hustota dislokací (celková délka dislokací v jednotce objemu -  $\text{mm}/\text{mm}^3$ ) roste, přičemž smykové napětí, potřebné pro pohyb dislokací v mřížce s takto zvýšenou hustotou dislokací, je nutno zvyšovat. Vlivem rostoucího napětí se i v zrnech s méně příznivou orientací začnou aktivovat další skluzové systémy, takže každé zrno se deformuje do tvaru určovaného deformací jeho sousedů. Dislokační skluz se postupně stává obtížným, odpor proti skluzu roste, až do doby, kdy žádné další dislokace nejsou schopny mřížkou projít a začnou se hromadit před překážkami, nejčastěji na hranicích zrna nebo u hrubých fází. Takto vzniká zárodek trhliny a materiál se jeví jako křehký. Existuje řada modelů, které popisují chování dislokací v reálné krystalické mřížce (viz. fyzikální metalurgie). Výsledkem těchto procesů je zpevňování materiálu, které se projevuje:

- a) zvýšením meze kluzu a meze pevnosti v tahu, přičemž mez kluzu roste rychleji než mez pevnosti
- b) snížením tažnosti
- c) změnou fyzikálních, elektrických a magnetických vlastností

Úplné vyčerpání plastických vlastností je charakterizováno tím, že mez kluzu a mez pevnosti jsou totožné při nulové tažnosti. Mez pevnosti (a tedy i kluzu) jsou i několikanásobně vyšší

než před tvářením( až o cca 300% ), oblast pružných deformací je značně široká. Další tváření není možné, pro obnovení plastických vlastnosti je nutné žhání ( rekrytalizační).  
Tváření za studena je často závěrečnou tvářecí technologií, kdy získáváme přesné výrobky s dobrou úrovní mechanických vlastností ( pevnost, pružnost, houževnatost, odolnost proti únavě a korozi) . Příklad změny mechanických vlastností nízkouhlíkové oceli a mosazi po tváření za studena je na obr. 2-5.



Obrázek 2-5 Změna mechanických vlastností po válcování za studena

## 2.4. Tváření za tepla

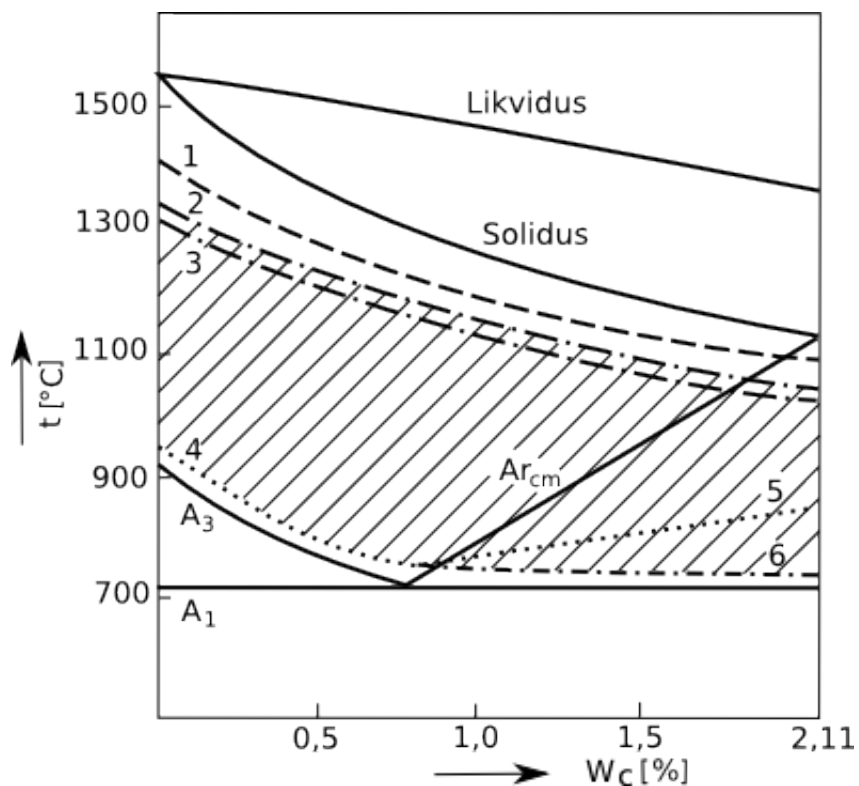
Podle klasické teorie se tváření za tepla děje nad teplotou rekrytalizace ( $0,4 T_{tav}$ ). V praxi jsou ovšem teploty tváření nad  $0,6$  až  $0,7 T_{tav}$ . (obr.2-6).

Při tváření za tepla probíhají dva základní procesy, a to zpevňování a uzdravování. Preference těchto dějů závisí pro daný materiál (chemické složení a strukturní stav) na termomechanických parametrech (teplota, rychlost deformace, velikost deformace). Zpevnění může být odstraněno dynamickými uzdravovacími procesy ihned, tj. ještě během tváření za tepla, nebo častěji je odstraněno pouze částečně a další uzdravení se děje statickými uzdravovacími procesy po tváření. V tomto případě se významně uplatňuje vliv deformační rychlosti a doby mezi jednotlivými deformacemi. Obecně platí, že se stoupající rychlostí deformace se tvařitelnost zmenšuje a odpor proti deformaci stoupá. Při vysoké deformační rychlosti nestačí rekrytalizace zcela zrušit nepříznivé účinky zpevňování, a proto deformační odpor roste.

Vliv deformační (tvářecí) rychlosti je větší při tváření za tepla než za studena.

Kov si během tváření za tepla zachovává plastické vlastnosti, čímž je možno dosáhnout velkých stupňů deformace. V podstatě nedochází ani ke změnám mechanických nebo fyzikálních vlastností.

Pouze v případě tváření lité struktury (u ingotů) se dosažením stejnorodosti struktury a zhutněním kovu mechanické vlastnosti zlepšují.



Obrázek 2-6 Tvářecí teploty ocelí – ve zjednodušeném diagramu Fe – Fe<sub>3</sub>C. Horní tvářecí teploty: 1-rychlostní ohřev, 2-polotovary s lité strukturou, 3 – polotovary s tvářenou strukturou. Dolní tvářecí teploty: 4 – podeutektoidní oceli, 5 - nadeutektoidní oceli s nižší tvařitelností, 6 – nadeutektoidní oceli s vyšší tvařitelností

## 2.5.Vliv struktury na plastické vlastnosti materiálů

Struktura tvářeného kovu ovlivňuje plastické vlastnosti a průběh deformace jednak velikostí svých zrn, dále pak jejich stejnorodostí a mezikrystalickou hmotou.

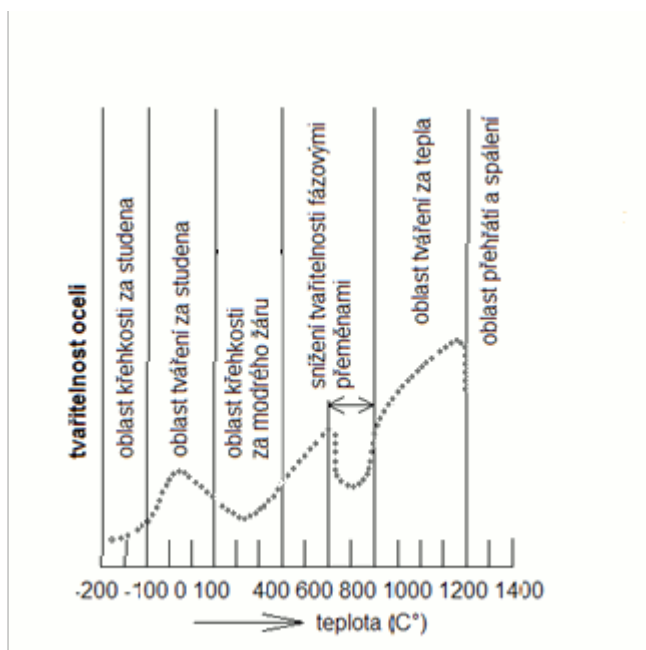
Velikost zrna: s klesající velikostí zrna se nejen zvyšuje deformační odpor, ale často se zhoršuje též tvařitelnost materiálu.

Vliv mezikrystalové hmoty na snížení pevnosti a tvažitelnosti je ovlivněn přítomností snadno tavitelných příměsí a oslabením vazby zrn následkem nerovnoměrně rozdělené mezikrystalické hmoty.

## 2.6. Vliv teploty na plastické vlastnosti materiálu

Plastické vlastnosti (též deformační odpor) se s teplotou podstatně mění.

Je-li struktura tvořena jednou fází, zpravidla se plastické vlastnosti se stoupající teplotou zlepšují. Pokles deformačního odporu je zdůvodněn snadnějším pohybem dislokací v mřížce díky zvýšenému počtu kmitů atomů v mřížce. Rovněž dochází ke zrychlené difuzi atomů, což umožňuje šplh dislokací, takže se dislokace mohou pohybovat také po hranicích zrn nebo přecházet do jiných skluzových rovin. V některých oblastech teplot dochází k poklesu tvařitelnosti vlivem fyzikálně- metalurgických dějů (obr.2-7).



Obrázek 2-7 Změna tvařitelnosti oceli v závislosti na teplotě

Příčiny snížené tvařitelnosti ocelí :

- Oblast křehkosti za studena souvisí s tzv. přechodem houževnatý křehký stav. Za dostatečně vysokých teplot dislokace reagují s překážkami, vznikají nebo se aktivují dislokační zdroje, dislokace jsou schopny dalšího skluzu. Materiál se jeví jako houževnatý. Při nízkých teplotách se dislokace hromadí před překážkami, které nejsou schopny překonat, vznikají zárodky trhlin a materiál se jeví jako křehký. Přechod houževnatý – křehký stav se projevuje zejména u kovů s KSC (kubickou prostorově centrovanou) mřížkou.
- Oblast křehkosti za modrého žáru souvisí s vyloučením síry po hranicích původního austenitického zrna.
- Snížení tvařitelnosti vlivem fázových transformací spočívá v přítomnosti vnitřního pnutí z důvodu rozdílného rozložení atomů a rozdílného mřížkového parametru v odlišných krystalických mřížkách.

- d) Oblast tváření za tepla – při vysokých teplotách se zvyšuje náchylnost k růstu zrna, při dalším zvyšování teploty dochází k přehřátí a spálení oceli. Při přehřátí oceli dochází k silnému zhrubnutí zrna a následnému vyloučení síry v podobě sulfidů (FeS) po hranicích zrn. Přehřátí oceli lze odstranit normalizačním žiháním (zjemnění zrna), případně dlouhodobým žiháním, tzv. homogenizačním žiháním (odstranění chemické heterogenity). Při spálení oceli dochází ještě k vyloučení fosforu po hranicích zrn a následně k natavení vyloučených sulfidů a fosfidů. Dochází k úplnému znehodnocení oceli, někdy se ocel téměř rozpadne na jednotlivá zrna.

### **3.MECHANICKÁ PODSTATA TVÁŘENÍ A ZÁKLADNÍ ZÁKONY PLASTICKÉ DEFORMACE**

Účinkem vnějších sil vznikají v tvářeném tělese napětí, která po dosažení určité mezní velikosti (zjednodušeně meze kluzu za konkrétních podmínek tváření) vyvolávají plastickou deformaci, přičemž nesmí dojít k porušení soudržnosti tělesa.

#### **3.1.Napětí v tvářeném tělese**

Napětí  $\sigma$  se definuje jako síla  $F$  působící na jednotku plochy  $S$ , tedy  $\sigma = F / S$ . Vzhledem k vesměs nerovnoměrnému rozdělení síly na ploše je vhodné vyjádřit napětí v diferenciální podobě,  $\sigma = dF / dS$ .

V nejčastěji používaném pravoúhlém souřadnicovém systému na hmotný bod v tělese působí obecně tři normálová napětí, označovaná  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ , která jsou kolmá ke stěnám krychlového elementu, reprezentujícího hmotný bod, a šest smykových napětí, působících na stěnách elementu a označovaných  $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{xz}, \tau_{zx}$  (obr. 3-1). První index označuje rovinu, v níž tangenciální napětí působí, tj. osu souřadnicového systému, která je na tuto rovinu kolmá, druhý index označuje směr tangenciálního napětí. Stav napjatosti je tedy dán devíti složkami a lze ho zapsat pomocí matice:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

Pro smyková napětí platí zákon sdružených smykových napětí, takže  $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{xz} = \tau_{zx}$ .

Při výpočtu napětí a sil při tváření studované těleso umísťujeme do souřadnicového systému, který si můžeme libovolně zvolit. Zvolený souřadnicový systém můžeme otočit tak, abychom získali tzv. hlavní souřadnicový systém, tzn. že ve stěnách prostorového elementu budou působit pouze normálová napětí  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , smyková napětí budou nulová. Souřadnicový systém volíme tak, aby směr alespoň



jednoho hlavního napětí byl totožný se směrem vnější tvářecí síly. Stav napjatosti je invariantní veličinou, tzn. že nezávisí na prostorové orientaci souřadnicového systému. Je popsán pomocí tří tzv. invariantů:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

je lineární invariant, který svým fyzikálním významem odpovídá hydrostatickému tlaku (tahu), při němž nemůže dojít k plastické deformaci. Určuje tedy pružnou deformaci.

$$I_2 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_1 \cdot \sigma_3 + \sigma_2 \cdot \sigma_3$$

Je kvadratický invariant a určuje tzv. intenzitu napětí (efektivní napětí, redukované napětí), která vyjadřuje souhrnný účinek všech napětí :

$$\sigma_{ef} = \sqrt{1/2[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Pokud se toto napětí rovná konstantě plasticity, dochází k plastické deformaci (energetická podmínka plasticity viz. dále). Podobně intenzita smykových napětí

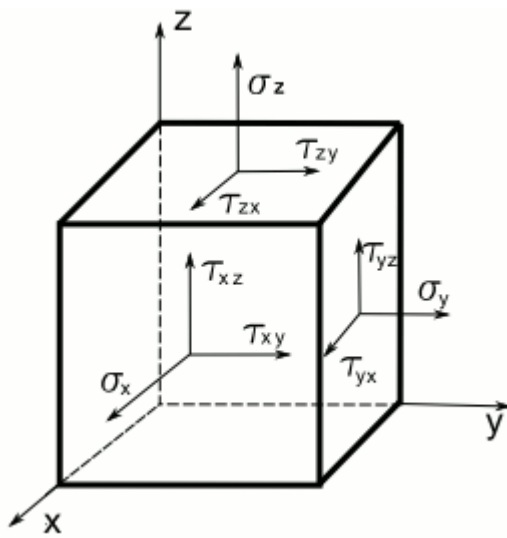
$$\sigma_\tau = \sqrt{1/6[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

vyjadřuje velikost deformačního odporu částice materiálu proti změně tvaru.

Třetí invariant

$$I_3 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3$$

se nazývá kubický a má vztah k typu plastické deformace. Jeho praktický význam je omezený.



Obrázek 3-1 Napětí, působící na prostorový element – hmotný bod.

### 3.2. Mechanické schéma – schémata napětí a deformací (MSD)

Při plastické deformaci mají pro analýzu tvářecích pochodů velký význam mechanická schémata deformace. Dávají grafickou představu o přítomnosti a směru hlavních napětí a deformací.

Mechanické schéma je dáno kombinací schématu napjatosti a deformace a pro konkrétní případ tváření je toto schéma typické.

#### Schématu napjatosti:

Stav napjatosti má významný vliv na tvařitelnost a deformační odpor kovu. Obecně platí, že přítomnost tahových napětí snižuje tvařitelnost materiálu, neboť vlivem tahového napětí dochází k rozšiřování dutin a zárodků trhlin. Naopak, vlivem tlakových napětí dochází k uzavírání dutin a trhlin, a proto je materiál schopen snést vyšší plastickou deformaci než pod vlivem tahových napětí. Deformační odpor naopak s přítomností tlakových napětí roste a je největší, pokud jsou všechna tři hlavní napětí tlaková.

Stav napjatosti se v tvářeném tělese znázorňuje pomocí schemat hlavních napětí (neuvažují se smyková napětí). Napětí mají kladnou (= tahová), zápornou (= tlaková) nebo nulovou hodnotu. Teoreticky jsou možné všechny kombinace hlavních napětí, tj. 9 možných schémat:

1) Jednoosý stav napjatosti  $(+,0,0)$  – jedno tahové napětí, ostatní nulová,

$(-,0,0)$  – jedno tlakové napětí, ostatní nulová,

2) Rovinný stav napjatosti  $(+,0,-)$   $(+,+,0)$   $(-,-,0)$

3) Prostorový stav napjatosti  $(+,+,+)$   $(-,-,-)$   $(+,+,-)$   $(+,-,-)$

Pro tváření nemají všechna schémata stejný význam.

Jednoosý stav napjatosti se vyskytuje pouze v laboratorních podmínkách u zkoušky tahem před vznikem krčku nebo jednoosým tlakem (bez tření).

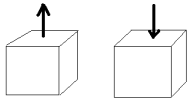
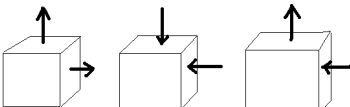
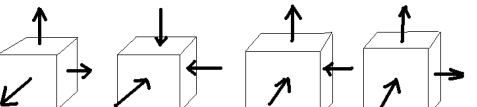
Rovinný stav napjatosti je typický pro plošné tváření – tváření plechu, tj. :

- při příčném ohýbání plechů a pásů
- při zkružování svařovaných trubek
- při hlubokém tažení plechu

Prostorový stav napjatosti se uplatňuje při objemovém tváření s tím, že

- a) Nelze využít schématu s všestranným tahem
- b) Třísosý tlak existuje při protlačování
- c) Ostatní schémata jsou běžná při kování, válcování, tažení., atd

*Pozn.: Označení (+,+,+) nebo (-,-,-) neznamená, že napětí jsou stejně velká – to by nebyla možná plastická deformace, pouze pružná deformace. Při protlačování jsou všechna tři hlavní napětí tlaková, nikoliv ovšem stejně velká.*

		
$(+,0,0)$ $(-,0,0)$	$(+,+,0)$ $(-,-,0)$ $(+,-,0)$	$(+,+,+)$ $(-,-,-)$ $(+,-,-)$ $(+,-,-)$
Jednosý stav napjatosti	Rovinný stav napjatosti	Prostorový stav napjatosti

Obrázek 3-2 Schémata hlavních napětí

### Schématu hlavních deformací

Problematika tváření vyžaduje zkoumání vzájemné souvislosti stavu napjatosti a stavu deformace.

Proto se přiřazují k schématům hlavních napětí vyjadřujícím kvalitativně napjatost v bodě tělesa, schémata hlavních deformací, která vyjadřují průběh deformace v uvedeném bodě. Schémata deformace určují změnu rozměrů tvářeného tělesa (+ rozměr se zvětšuje, tj. prodlužuje se, - rozměr se zmenšuje, tj. stlačuje)

Za předpokladu konstantního objemu tvářeného tělesa existují 3 reálné kombinace těchto deformací (z celkového počtu 9):

- 1) Prostorová deformace (+ + -) (nejběžnější : kovářské operace, válcování předvalků)
  - (- - +) (tváření v průvzlaku, protlačování, tažení)

- 2) Rovinná deformace (0,-,+ (válcování plechů a širokých pásů)

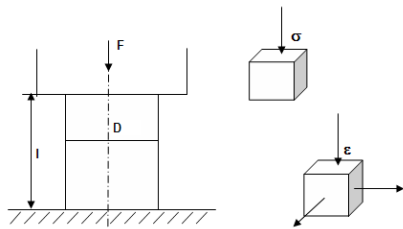
Pozn.: Jsou možné různé kombinace napěťového a deformačního schématu, ne ovšem libovolné. Neexistují např. tyto kombinace:

Deformace, napjatost

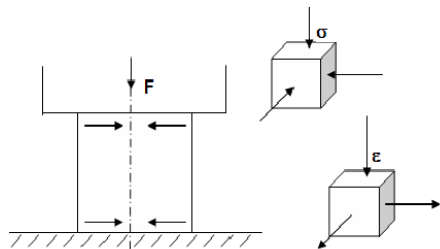
- 1) (0 - +) (+ 0 0)
- 2) (0 - +) (- 0 0)
- 3) (+ + -) (+ 0 0) = jednoosý tah + prostorová deformace (+ + -)
- 4) (- - +) (0 0 -) = jednoosý tlak + prostorová deformace (- - +)

Mechanické schéma je dáno kombinací schématu napjatosti a deformace a pro konkrétní případ tváření je toto schéma typické.

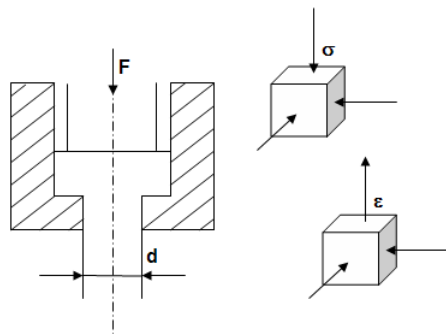
Mechanická schémata pro některé tvářecí operace



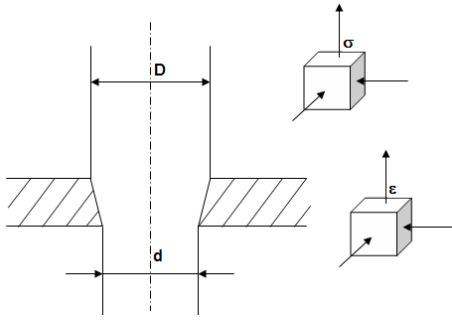
Obrázek 3-3 Pěchování bez tření



Obrázek 3-4 Pěchování s třením



Obrázek 3-5 Protlačování



Obrázek 3-6 Tažení v průvlaku

### 3.3. Deformace v tvářeném tělese

Těleso pod vlivem vnější síly mění svůj tvar, tváří se. Pokud těleso po odlehčení získá opět původní tvar, jde o pružnou (vratnou) deformaci. Nestane-li se tak, je to plastická (trvalá) deformace.

Deformaci, ať pružnou nebo plastickou, můžeme vyjádřit těmito způsoby:

Absolutní deformace je rozdíl rozměrů po deformaci a před ní. Pěchujeme –li hranol o výchozích rozměrech  $h_0$ ,  $b_0$  a  $l_0$  (obr. 3-7) na konečné rozměry  $h_1$ ,  $b_1$  a  $l_1$ , potom absolutní deformace je

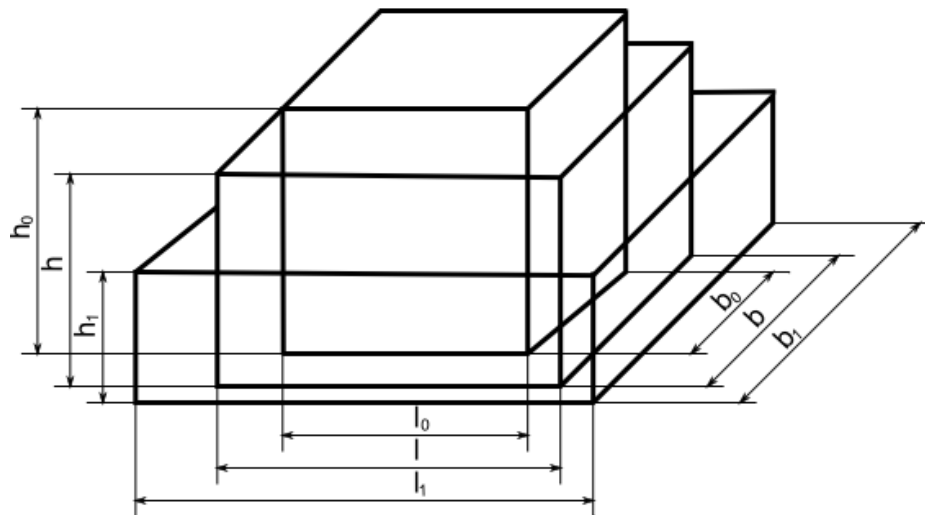
$$\Delta h = h_0 - h_1$$

$$\Delta b = b_1 - b_0$$

$$\Delta l = l_1 - l_0$$

Z praktického hlediska počítáme absolutní deformaci tak, aby byla vyjádřená kladným číslem.

V praxi se takto vyjadřuje např. úběr při válcování , tj. rozdíl mezi vstupní a výstupní tloušťkou válcovaného polotovaru, vyjádřený v mm.



Obrázek 3-7 Schéma tvarové a rozměrové změny hranolu při pěchování

Poměrná lineární deformace je definována jako podíl změny rozměru k původnímu rozměru:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \quad \text{stlačování}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta b}{b_0} \quad \text{šíření}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{prodlužování}$$

Výhodou vyjádření velikosti poměrné deformace je její názornost. Vhodná je ovšem pouze pro popis malých deformací ( do cca  $\varepsilon = 0,1$  ), především v pružné oblasti, při tváření, kde dochází k velkým deformacím je její použití nevhodné.

Skutečná neboli logaritmická deformace je odvozená na základě matematických zákonitostí, kdy se uvažuje nekonečně malá změna rozměru :

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta l}{l} = \frac{dl}{l} = d\varphi$$

takže:

$$\varphi_1 = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = [\ln h]_{h_0}^{h_1} = \ln \frac{h_1}{h_0}$$

$$\varphi_2 = \int_{b_0}^{b_1} \frac{db}{b} = [\ln b]_{b_0}^{b_1} = \ln \frac{b_1}{b_0}$$

$$\varphi_3 = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = [\ln l]_{l_0}^{l_1} = \ln \frac{l_1}{l_0}$$

Skutečná neboli logaritmická deformace má obecnou platnost a je vhodná pro malé i velké deformace.

*Příklad:*

*Natáhneme-li tyč o délce 1000 mm o 10mm, potom  $\varepsilon = 10:1000 = 0,01$  a  $\varphi = \ln(1010:1000) = 0,00995$ . Chyba je tedy zanedbatelná, takže můžeme počítat s poměrnou lineární deformací. Pokud ovšem tyč o délce 1000 mm prodloužíme např. válcováním nebo tažením na délku 10000, potom  $\varepsilon = (10000-1000):1000 = 9$ , ale  $\varphi = \ln(10000:1000) = 2,3$ . Dostáváme tedy zcela odlišné číselné hodnoty. Využití poměrné lineární deformace nemá matematické opodstatnění a je tedy nesprávné. V praxi se v těchto případech využívá plošného úběru, vyjádřeného v %.*

V technické praxi se také vžil vyjádření deformace prostřednictvím součinitelů deformace

$$\gamma = \frac{h_1}{h_0} \text{ - součinitel stlačení}$$

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} \text{ - součinitel šíření}$$

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} \text{ - součinitel prodloužení}$$

Ze zákona stálosti objemu ( viz. kap. 3.4 ) vyplývá:

$$V = h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1$$

$$\frac{h_1}{h_0} \cdot \frac{b_1}{b_0} \cdot \frac{l_1}{l_0} = 1$$

$$\ln \frac{h_1}{h_0} + \ln \frac{b_1}{b_0} + \ln \frac{l_1}{l_0} = 0$$

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

Vztah mezi skutečnou deformací a poměrnou lineární deformací lze také vyjádřit také takto:

$$\varphi = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon)$$

## Nerovnoměrná deformace

Schéma hlavních deformací poskytuje o průběhu deformačních dějů poněkud idealizovanou představu, podle níž probíhá deformace v tvářeném tělese rovnoměrně. V technologických tvářecích pochodech jde vždy o nerovnoměrnou deformaci, kdy rozložení deformace po průřezu je různé.

### **3.4.Základní zákony plastické deformace**

#### 1) Zákon stálosti objemu:

Při velkých plastických deformacích je změna objemu zanedbatelná, k malé změně objemu může dojít pouze z důvodu uzavírání dutin, obzvláště při tváření lité struktury. Dochází tedy ke zvýšení hustoty (měrné hmotnosti) materiálu.

*Pozn: látky mohou mít trojí skupenství: pevné, kapalné a plynné. Obecně platí, že pevné skupenství za dané teploty a tlaku nemění tvar ani objem, kapalné skupenství mění tvar, ale nemění objem a plynné skupenství mění tvar i objem*

Matematicky lze tento zákon vyjádřit vztahem:

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0$$

kde  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  jsou skutečné hlavní logaritmické deformace. Platí tedy, že součet logaritmických stupňů deformace ve třech hlavních směrech deformace je roven 0.

Shora uvedené matematické vyjádření značí, že součet skutečných - logaritmických deformací ve všech hlavních směrech, kde existují pouze lineární deformace, je roven 0.

#### 2) Zákon podobnosti

Tento zákon je nutno respektovat při fyzikálním modelování, např. testujeme-li konkrétní technologii tváření v laboratorních podmínkách. Aby experiment, prováděný v laboratoři, byl podobný skutečnému procesu, je třeba splnit podmínky podobnosti: musí být dodržena geometrická, mechanická a fyzikální podobnost.

Geometrická podobnost: tj. poměr odpovídajících si deformovaných ploch na podobných tělesech je konstantní a rovná se součiniteli podobnosti.

*Pozn: přechujeme-li válcové těleso v procesu výroby, potom v laboratorních podmínkách opět volíme váleček. Zkoumáme-li způsob tváření hranolovitého tělesa, modelem je opět hranolovité těleso se stejným poměrem stran*

Mechanická podobnost vyžaduje, aby:

- a) příslušné specifické tlaky byly stejně veliké
- b) součinitele tření na styčných plochách byly stejné
- c) hlavní napětí musí být stejně velká, musí mít stejné znaménko (směr), a to ve stejně zvoleném souřadnicovém systému



Fyzikální podobnost předpokládá, že:

- a) obě tělesa měla stejné chemické a strukturní složení a fázový stav
- b) byla stejná deformační rychlost a teplota při deformaci
- c) napětí u obou těles byla rozložena obdobně

Všechny uvedené podmínky v praxi nelze zcela dodržet, je nutno analyzovat, jakou chybu můžeme očekávat při nedodržení některého z požadavků.

**Definice:**

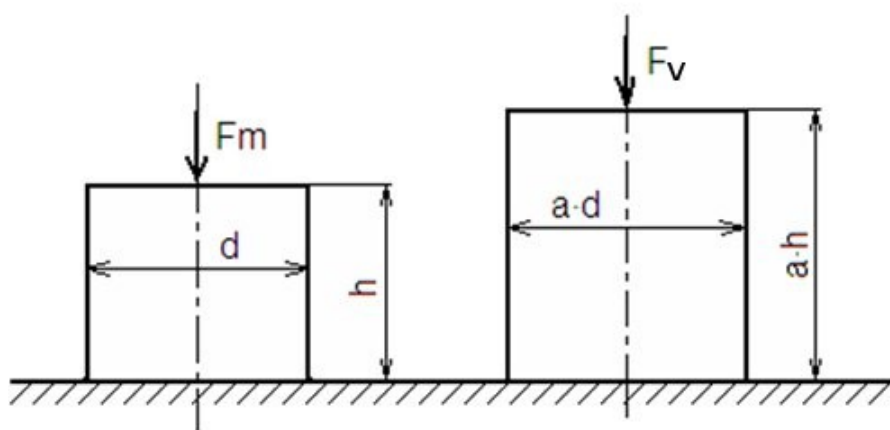
Tváříme-li dvě geometricky podobná tělesa, lze stanovit poměr sil a prací za předpokladu pomalého stlačování a zanedbání tření, známe-li sílu  $F_m$  ke stlačení jednoho tělesa (obr.3-8).

$$\frac{F_v}{F_m} = a^2 ; \frac{A_v}{A_m} = a^3$$

$a$  ... lineární součinitel zvětšení rozměrů

$F_v, F_m, A_v, A_m$ ... síla a práce na deformaci velkého a malého tělesa

Skutečné poměry jsou však složitější a zkoušky prokazují, že síly  $k$  (lisování) tváření většího tělesa bývají poměrně nižší (menší ochlazovací efekt), poněvadž odpor proti přetvoření vzrůstá se zmenšováním rozměrů tělesa.

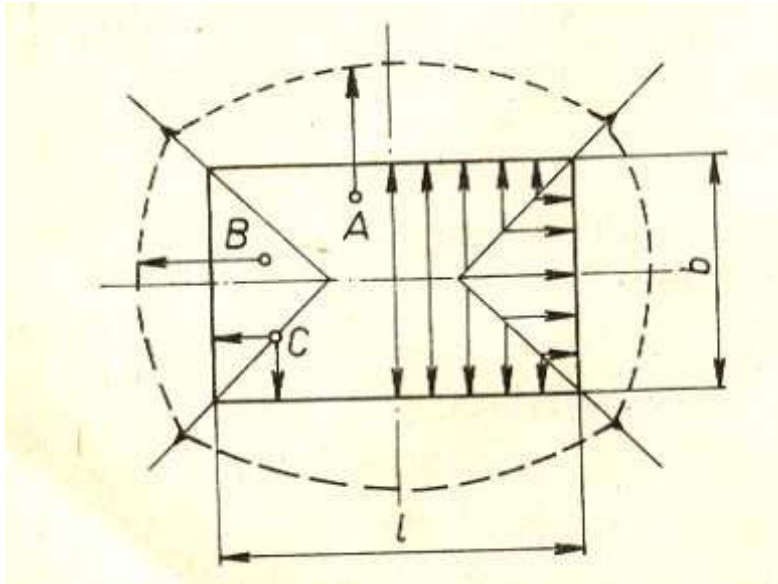


Obrázek 3-8 Geometrická podobnost těles

3) Zákon nejmenšího odporu

Částice materiálu se při plastické deformaci přemisťují ve směru nejmenšího odporu, neboť je to energeticky nejvýhodnější.

Příkladem platnosti tohoto zákona může být sledování změny tvaru pěchovaného hranolu při uvažování tření na styčných plochách nástroje a tělesa. Původně obdélníková základna hranolu (Obr. 3-9) se mění na tvar, zakreslený čárkovaně. Při dalším pěchování obrys příčného průřezu tělesa nabývá postupně tvaru, který se vyznačuje nejmenším obvodem, a tím je kruh.



Obrázek 3-9 Zákon nejmenšího odporu

#### 4) Zákon nezávislosti polohové (potenciální) deformační energie na mechanických schématech deformace.

Zákon je dán z teorie plasticity užitím hypotézy energetické podmínky plasticity. Během deformace akumuluje těleso potenciální deformační energii. Tato energie, připadající na jednotku objemu, je při daných podmínkách deformace (teplota, rychlost deformace) veličinou stálou, nezávislou na schématu deformace (tj. na tvarové změně tělesa).

#### 5) Zákon pružného odlehčení plasticky deformovaného tělesa.

Je-li plastická deformace přerušována odlehčením a opětovným zatížením, aniž se mění charakter a způsob zatížení, diagram závislosti deformace na napětí si zachovává svůj původní tvar.

V praxi to znamená, že po plastické deformaci tělesa a jeho odlehčení dochází k pružné deformaci. Proto rozměry např.: výkovku se přesně neshodují s rozměry dutin zápustky.

## 6) Zákon smykového napětí.

Plastická (tvárná) deformace může nastat jen v tom případě, když smykové napětí v tělese dosáhne určité hodnoty, závislé na povaze tělesa a podmínkách deformace ( teplota, rychlost deformace, velikost deformace, schéma hlavních napětí)

## 7) Zákon přídavných napětí

Při plastické deformaci (zejména tlakem) nedochází obvykle k rovnoměrné deformaci, jednotlivé oblasti tvářeného tělesa procházejí během tváření rozdílnými změnami rozměrů. Změna rozměrů v jedné oblasti vyvolává změnu rozměrů v jiné oblasti. Toto vzájemné působení jednotlivých oblastí se projevuje vznikem přídavných napětí.

### **Definice:**

Při libovolné plastické změně tvaru materiálu ve vrstvách a částicích tělesa, které směřují k zvětšení rozměrů tělesa, vznikají přídavná napětí, která se snaží o zmenšení jeho rozměrů, tj. vznikají přídavná napětí tlaková.

Ve vrstvách a částicích tělesa směřujících k zmenšení jeho rozměrů vznikají naopak přídavná napětí, která způsobují zvětšování jeho rozměrů, tj. napětí tahová.

Přídavná napětí mohou:

- a) zůstat v tvářeném tělese po odlehčení vnější síly v podobě zbytkových pnutí (snížení únavových a korozních vlastností, příp. problémy při obrábění)
- b) uvolnit se v podobě nežádoucí plastické deformace
- c) uvolnit se v podobě porušení tvářeného tělesa (trhliny, lomy)

## **3.5.Vnější tření**

Tváření kovů je založeno na působení nástroje na tvářený polotovár. Silovým účinkem nástroje kloužou přemísťované částice kovu po pracovní ploše nástroje, což vyvolává vznik třecích sil, které tento klouzavý pohyb brzdí a tím ovlivňují průběh deformace v celém tvářeném tělese. Vnější tření se při tváření projevuje jednak jako pasívní činitel, který nepříznivě ovlivňuje deformační odpor, sílu,

práci a životnost tvářecích nástrojů, jednak jako aktivní činitel, který umožňuje uskutečnění tvářecího pochodu (záběr kovu při válcování). Pro posouzení velikosti vnějšího tření se zavádí součinitel vnějšího tření  $\mu$ , který závisí na těchto činitelích:

- a) povrchová jakost pracovní plochy nástroje
- b) povrchová jakost tvářeného kovu
- c) chemické složení tvářeného kovu
- d) tvářecí teplota (souvisí především s tvorbou okují, kdy v určitém rozmězi teplot součinitel tření roste)
- e) pracovní rychlost nástroje (s rostoucí rychlostí klesá)
- f) mazivo

#### **4. DEFORMAČNÍ ODPOR, SÍLY A PRÁCE, POTŘEBNÉ KE TVÁŘENÍ**

Deformačním odporem nazýváme napětí na stykové ploše mezi tvářeným tělesem a nástrojem, nutné pro vznik plastické deformace.

Deformační odpor  $\sigma_d$  je určen součinem:

$$\sigma_d = \sigma_p \cdot Q_\sigma$$

kde  $\sigma_p$  je přirozený (základní def.odpor, přetvárná pevnost) deformační odpor (MPa) a  $Q_\sigma$  je tzv. tvářecí faktor. Přirozený deformační odpor  $\sigma_p$  charakterizuje odpor vlastního kovu proti deformaci při jednoosém stavu napjatosti za určitých termomechanických podmínek

$$\sigma_p = f(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon})$$

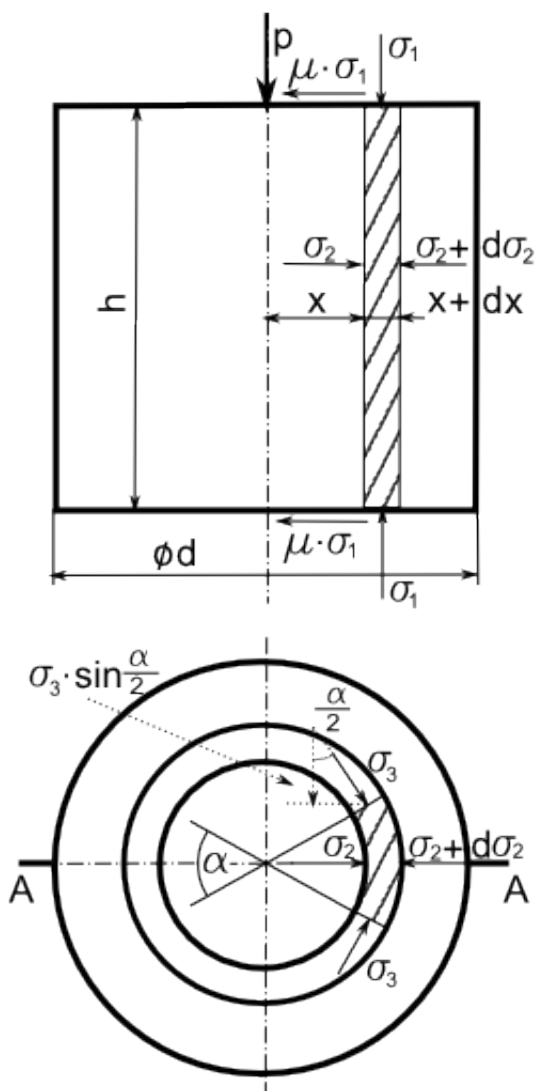
kde T je teplota tvářenání,  $\varepsilon$  je velikost deformace a  $\dot{\varepsilon}$  je rychlost deformace. Odpovídá hodnotě intenzity napětí (efektivního napětí - viz. energetická podmínka plasticity). Tvářecí faktor  $Q_\sigma$  vyjadřuje souhrnně vliv všech činitelů při technologickém zpracování (napěťový stav, vnější tření, nerovnoměrná deformace atd.)

##### **4.1. Stanovení deformačního odporu pro případ pěchování kruhové desky**

Vhodným příkladem pro pochopení vzájemných vztahů a souvislostí mezi deformačním odporem a silami, potřebnými pro plastickou deformaci, je příklad pěchování tělesa válcového tvaru mezi rovnými kovadly. V praxi se technologie pěchování využívá jako základní tvářecí operace volného kování při výrobě kruhů a pouzder a jako mezioperační pěchování pro zvýšení prokovaní nebo zmenšení anizotropie mechanických hodnot.

Při výpočtu se využívá přibližných rovnic rovnováhy a podmínky plasticity. Vnější síly od tvářecího nástroje – kovadel - dáváme do rovnováhy se silami vnitřními. Vzhledem k nerovnoměrnému

rozložení napětí a deformace v tělese je nutno těleso charakterizovat pomocí vytknutého prostorového elementu o nekonečně malé tloušťce. V našem případě válcové těleso reprezentuje element ve tvaru dutého válce o tloušťce  $dx$  a šířce vymezené středovým úhlem  $\alpha$  (obr.4-1).



Obrázek 4-1 Pěchování kruhové desky

Na element o tloušťce  $dx$ , vnitřním poloměru  $x$  a výšce  $h$  působí napětí  $\sigma_1$ , vyvolané tvářecím nástrojem. V radiálním směru působí na element napětí  $\sigma_2$ . Toto napětí je dáno odporem materiálu, který „se brání“ plastické deformaci, směřující ke zvětšení průměru tělesa. V tangenciálním směru

působí napětí  $\sigma_3$ . Vzhledem k osové symetrii válce dále platí, že radiální a tangenciální napětí jsou co do velikosti shodná:

$$\sigma_2 = \sigma_3$$

Rovnice rovnováhy sil je obecně dána součtem všech sil, působících v jednom směru na vytknutý element. V našem případě budeme řešit rovnici rovnováhy ve směru x, tj. ve směru kolmém k ose válce (rovina A-A). Potom platí:

$$\sigma_2 \cdot \alpha \cdot x \cdot h - (\sigma_2 + d\sigma_2) \cdot \alpha \cdot (x + dx) \cdot h + 2\sigma_3 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot dx \cdot h - 2\tau \cdot \alpha \cdot x \cdot dx = 0,$$

kde  $\tau$  je třecí napětí mezi kovadlem a tvářeným tělesem. Toto napětí můžeme určit jako součin koeficientu tření a tlakového napětí (Coulombův zákon):

$$\tau = \mu \cdot \sigma_1$$

Pro další úpravu rovnic využijeme následujících matematických pravidel:

a) pro velmi malé úhly platí, že  $\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{\alpha}{2}$  (jednotka: rad)

b) součin diferenciálů (nekonečně malých veličin) je roven nule:  $d\sigma_2 \cdot dx \approx 0$

Po úpravě:

$$- \sigma_2 \cdot dx \cdot \alpha \cdot h - d\sigma_2 \cdot x \cdot \alpha \cdot h + 2\sigma_2 \cdot \frac{\alpha}{2} \cdot dx \cdot h - 2\sigma_1 \cdot \mu \cdot \alpha \cdot x \cdot dx = 0$$

$$- d\sigma_2 \cdot x \cdot \alpha \cdot h = 2\sigma_1 \cdot \mu \cdot \alpha \cdot x \cdot dx$$

$$- d\sigma_2 = 2\sigma_1 \cdot \mu \cdot \frac{dx}{h}$$

Z podmínky plasticity platí:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_p$$

Kde  $\sigma_p$  je konstanta plasticity (která pro malé deformační rychlosti -  $\dot{\epsilon}$  do  $1 \text{ s}^{-1}$  - odpovídá hodnotě meze kluzu za daných pomínek tváření s ohledem na teplotu a rychlost deformace, resp. přetvárná pevnost  $p$ )

Další řešení analytickou metodou předpokládá zjednodušující úvahu, že jednotlivá stlačení jsou velmi malá, proto  $\sigma_2$  je velmi malé ( $\sigma_2 \approx 0$ ) a zanedbává se. Autorem této úvahy je Siebel, podle něhož tedy

$$\sigma_1 = \sigma_p$$

$$d\sigma_2 = -2\sigma_p \cdot \mu \cdot \frac{dx}{h}$$

A po integraci:

$$\sigma_2 = -2\sigma_p \cdot \mu \cdot \frac{x}{h} + c$$

Integrační konstantu určíme z podmínky, že radiální napětí  $\sigma_2$  na vnějším povrchu válce je nulové.

Pro  $x = \frac{d}{2}$  platí

$$\sigma_2 = 0 \quad (\sigma_3 = 0)$$

takže

$$\sigma_2 = -2 \frac{\mu \cdot p}{h} \cdot \frac{d}{2} + C = 0 \Rightarrow C = \frac{\mu \cdot p \cdot d}{h}$$

Po dosazení

$$\sigma_2 = -2\sigma_p \cdot \mu \cdot \frac{x}{h} + 2\sigma_p \cdot \mu \cdot \frac{d}{2h} = \frac{2\sigma_p \cdot \mu}{h} \left( \frac{d}{2} - x \right)$$

Odpor v jednotlivých místech pěchovaného špalíku je lineárně závislý na souřadnici  $x$  (na kolmé vzdálenosti od osy válce).

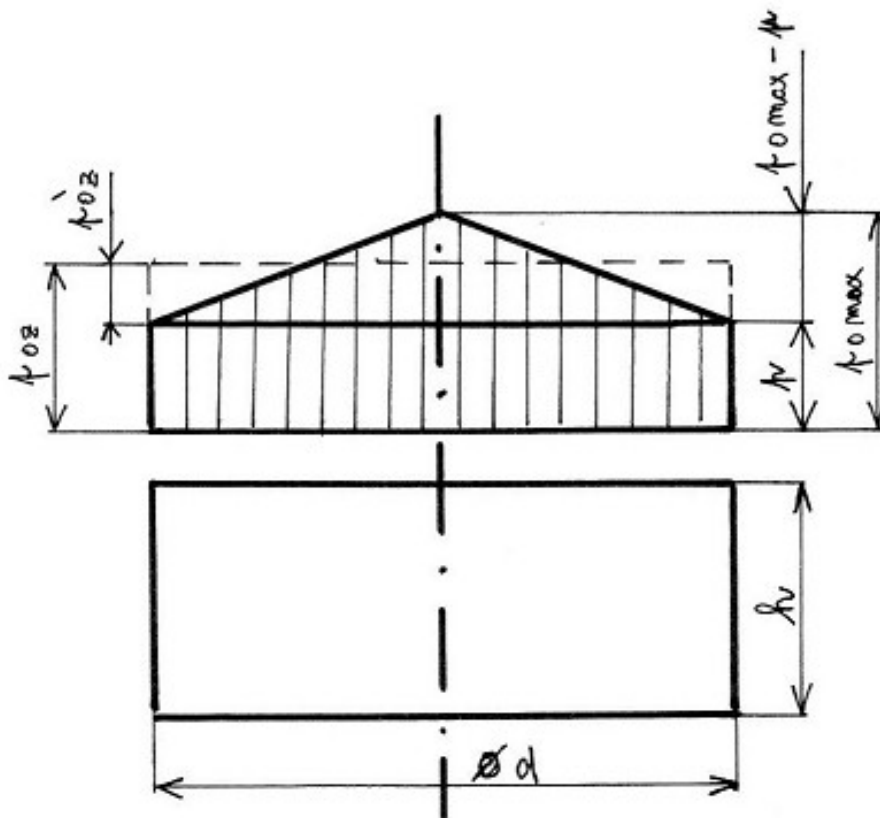
Dosadíme do podmínky plasticity:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_p$$

$$\sigma_1 = \sigma_p + \frac{2\sigma_p \cdot \mu}{h} \cdot \left( \frac{d}{2} - x \right) = \sigma_p \cdot \left[ 1 + \frac{2\mu}{h} \cdot \left( \frac{d}{2} - x \right) \right]$$

Rozložení tlaku na ploše při pýchování válce vykazuje lineární závislost (obr.4-2 ) s maximální hodnotou ve středu styčné plochy. Napětí  $\sigma_1$  má význam deformačního (přetvárného) odporu  $\sigma_d$  , označovaného také symbolem  $p_0$ .

$$p_0 = p \left[ 1 + \frac{2\mu}{h} \left( \frac{d}{2} - x \right) \right]$$



**Obrázek 4-2** Zdánlivě rovnoměrně rozložený tlak na kontaktní ploše při pýchování

V praxi při výpočtu síly potřebné ke tváření počítáme s tím, jako by tlak byl rovnoměrně rozložen v celé ploše. Pracujeme tedy s jakýmsi zdánlivě rovnoměrně rozloženým tlakem  $p_{oz}$ . Při stanovení velikosti  $p_{oz}$  vycházíme z představy, že objem kužele, zkonstruovaného nad plochou válce, o výšce  $p_{0 \text{ max}} - p$ , se rovná objemu válce o výšce  $p_{oz}$ .

(pozn. Objem kužele nebo jehlanu vypočítáme jako  $V = 1/3 \cdot S \cdot v$  , kde  $S$  je plocha základy a  $v$  je výška)

Platí v souladu s obr.4-2:



pro  $x=0$  bude  $p_{0\max} = p \left( 1 + \mu \frac{d}{h} \right)$

a součastně je  $p_{0Z} = p + \frac{p_{0\max} - p}{3}$

z toho  $p_{0\max} = 3p_{0Z} - 2p$

čili:  $3p_{0Z} - 2p = p \left( 1 + \mu \frac{d}{h} \right) = p + p \frac{\mu d}{h}$

$$3p_{0Z} = 3p + p \frac{\mu d}{h}$$

$$p_{0Z} = p + p \frac{\mu d}{3h} = p \left( 1 + \frac{\mu d}{3h} \right)$$

Tento **Sieblův vztah** je pro svou jednoduchost a pro rychlou orientaci používán pro výpočet síly, potřebné na provedení operace přechování. Přechovací sílu vypočteme tak, že zdánlivě rovnoměrně rozložený tlak vynásobíme plochou, na níž působí:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot p \cdot \left( 1 + \frac{\mu}{3} \cdot \frac{d}{h} \right)$$

Součinitel tření  $\mu$  se volí při tváření za tepla zpravidla cca 0,3 .

#### 4.2. Deformační rychlost

Deformační rychlostí se rozumí změna deformace v určitém časovém úseku.

Tato rychlost není totožná s rychlostí, jakou se deformuje vlastní těleso. Tato rychlost závisí také na jeho rozměrech.

Jestliže se stupeň (změna) deformace v případě přechování vyjádří elementární změnou poměrné lineární deformace

$$d\varepsilon_{\text{pech}} = \frac{dh}{h} ,$$

pak poměr tohoto stupně a doby deformace  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  udává deformační rychlost.

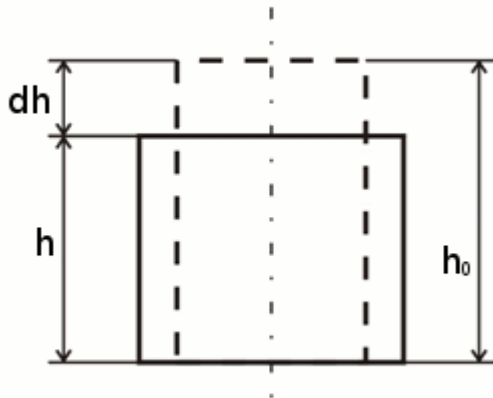
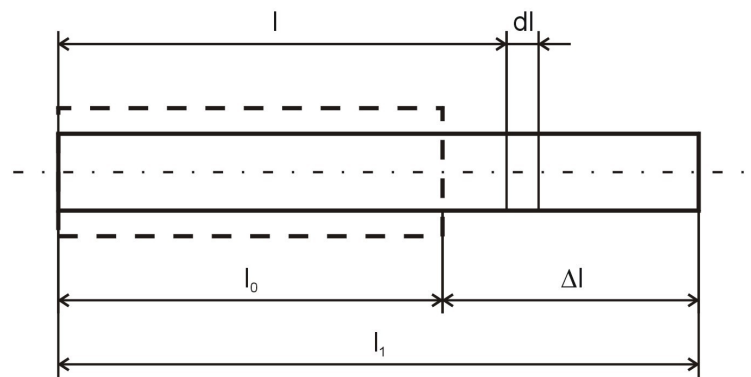
$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon_{\text{pech}}}{dt} = \frac{dh}{h} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{dh}{dt} \cdot \frac{1}{h} = \frac{v}{h} [s^{-1}]$$

kde  $v$  je okamžitá rychlost tvářecího nástroje ( kovádla) a  $h$  je okamžitá výška pěchovaného polotovaru ( obr.4-3 ).

Pro prodlužování platí analogicky

$$\dot{\varphi} = \frac{dl}{l} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{dl}{dt} \cdot \frac{1}{l} = \frac{v}{l} [s^{-1}]$$

kde  $l$  je okamžitá délka prodlužovaného polotovaru.



Obrázek 4-3 Elementární deformace při pěchování ( vlevo) a prodlužování (vpravo)

Rychlost pohybu tvářecího nástroje  $v$  je určena použitým druhem tvářecího stroje.

Tvářecí nástroj	$v$ [m/s]
Hydraulické lisy	0,025 - 0,5
Klikové a výstř. lisy	0,3 - 0,6
Hydraulické kovací stroje	0,3 - 0,6
Buchary	5 – 8 (10 – 12)
Buchary s vysokou $v$ úderu	20 - 30

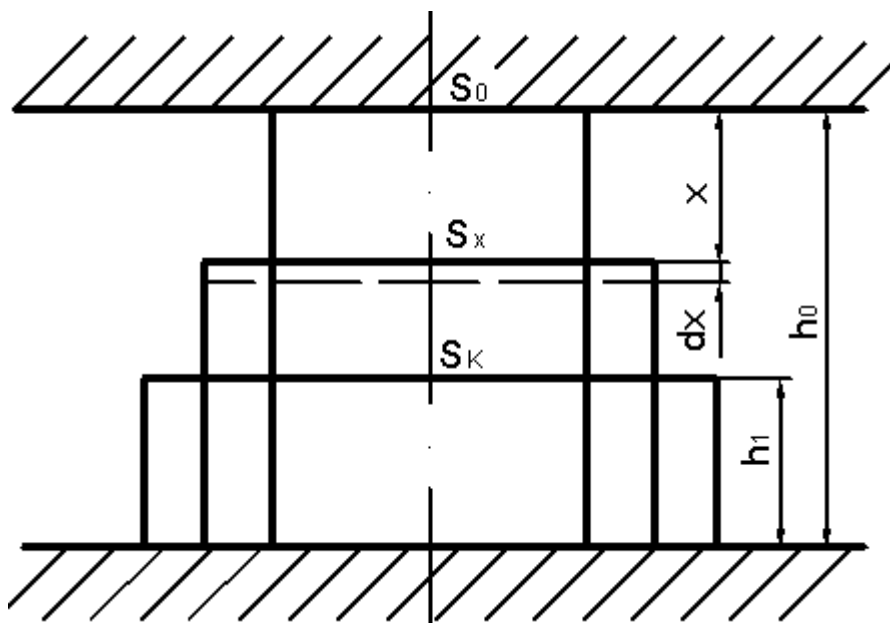
Tabulka 4-1 Rychlosti pohybu tvářecího nástroje pro různé typy kovacích strojů

Deformační rychlost ve skutečnosti vyjadřuje, jakou rychlostí se k sobě přibližují dva příčné průřezy. Především při tváření za tepla ovlivňuje deformační rychlost velikost deformačního odporu. Rychlosti deformace pro jednotlivé typy kovacích strojů jsou uvedeny v tab.4-2 .

Tvářecí nástroj	$\dot{\phi} [s^{-1}]$
Hydraulické lisy	0,01 – 10
Klikové a vřetenové lisy	4 – 25
Buchary	40 (-100)

Tabulka 4-2 Rychlosti deformace pro různé typy kovacích strojů

### 4.3. Deformační (přetvárná) práce



Obrázek 4-4 Práce při přechování tělesa

Za předpokladu menšího stupně přetvoření (plastické deformace), kdy se deformační odpor podstatně nemění a můžeme proto počítat s určitou jeho střední hodnotou, a kdy konečný tvar

pěchovaného válcového tělesa bude opět válcového tvaru, je možno vypočítat ideální deformační práci, potřebnou na deformaci tohoto úseku.

Elementární práce  $dA$  při stlačení polotovaru ve vzdálenosti  $x$  od počátku pěchování o hodnotu  $dx$  lze určit ze vztahu (obr. 4-4):

$$dA = F_x \cdot dx = S_x \cdot p_o \cdot dx$$

$S_x$  ... průřez ve vzdálenosti  $x$

$p_o$  ... přetvárný odpor

Velikost průřezu  $S_x$  v kterékoliv poloze lze vyjádřit z podmínky stálosti objemu pěchovaného polotovaru

$$S_x = \frac{V}{h_o - x} \Rightarrow dA = p_o \cdot \frac{V}{h_o - x} dx,$$

kde  $V$  je objem pěchovaného tělesa a  $h_o$  počáteční výška tohoto tělesa.

Integrací v mezích  $x = 0$  až  $x = h_o - h_1$  získáme vztah pro deformační práci při pěchování polotovaru z původní výšky  $h_o$  na konečnou výšku  $h_1$  za předpokladu, že přetvárný odpor se nemění a má proto střední hodnotu  $p_{oz}$  :

$$A = p_{oz} \cdot V \int_0^{h_o - h_1} \frac{1}{h_o - x} dx$$

Výpočet provedeme pomocí substituce:

$$z = h_o - x$$

$$x = z + h_o$$

a po derivaci

$$dx = - dz$$

Při integraci využitím substituce musí být změněny integrační meze dle tab. 4-3.

Změna mezí pro integraci:		
x	0	$h_o - h_1$
z	$h_o$	$h_1$

Tabulka 4-3 Změna integračních mezí při substituci

Výpočet integrálu :

$$\int_0^{h_0-h_1} \frac{1}{h_0-x} dx = \int_{h_0}^{h_1} -\frac{1}{z} dz = [-\ln z]_{h_0}^{h_1} = -(\ln h_1 - \ln h_0) = \ln h_0 - \ln h_1 = \ln \frac{h_0}{h_1}.$$

Výpočet práce:

$$A = A_{id} = p_{0z} \cdot V \cdot \int_0^{h_0-h_1} \frac{1}{h_0-x} dx = p_{0z} \cdot V \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}$$

Takto vypočtená práce představuje ideální deformační práci  $A_{id}$ .

Poměr ideální deformační práce  $A_{id}$  a skutečné práce  $A_{skut}$  se nazývá deformační účinnost

$$\gamma_d = \frac{A_{id}}{A_{skut}}$$

K stanovení deformační práce s ohledem na proměnný přetvárný odpor se také používají empirické vztahy, např. : - dle Storoževa ,

kde  $d_0$ ,  $h_0$  a  $d$ ,  $h$  jsou rozměry tělesa před a po pěchování.

## **5. METALURGICKÉ ZÁKLADY OHŘEVU**

Správně vedeným ohřevem se zvyšuje tvařitelnost a snižuje přetvárný (deformační) odpor, což příznivě ovlivňuje energetickou stránku tváření, životnost tvářecích nástrojů a výrobnost tvářecího pochodu. Vlivem zrychlené difúze dochází také ke zlepšení jakosti ohřívání oceli: chemické složení struktury se homogenizuje, částečně nebo úplně se rozpouštějí precipitáty, případně i vměstky, zlepšuje se jakost hranic zrn.

Stanovení optimálního ohřevu je podmíněno znalostí vybraných fyzikálních veličin a jejich závislosti na teplotě. Patří k nim: součinitel tepelné vodivosti, měrná tepelná kapacita, hustota, součinitel teplotní vodivosti, teplotní délková roztažnost a mechanické vlastnosti.

### **5.1. Fyzikální veličiny, ovlivňující ohřev kovu**

#### **Součinitel tepelné vodivosti**

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] závisí na kmitavém pohybu molekul, rozložení atomů v mřížce a na volné dráze elektronů. Součinitele tepelné vodivosti dále snižuje zvýšená hustota mřížkových poruch, licí struktura, struktura tvářená za studena nebo zakalená struktura. Podle vlivu teploty na součinitel tepelné vodivosti lze oceli rozdělit na tři skupiny:

- 1) součinitel tepelné vodivosti se s teplotou výrazně snižuje (nizkouglikové oceli, čisté železo)
- 2) součinitel tepelné vodivosti se s teplotou snižuje nevýrazně nebo se vůbec nemění (středně legované oceli)
- 3) součinitel tepelné vodivosti se s teplotou poněkud zvyšuje (vysokolegované oceli, ale také slitiny Cu a Al).

Čím je větší součinitel tepelné vodivosti, tím rychlejší je přestup tepla z povrchu do jádra zahřívaného tělesa, menší tepelné ztráty a kratší doba ohřevu.

### **Měrná tepelná kapacita**

Měrná tepelná kapacita  $c$  [ $\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] výrazně závisí na teplotě, kdy její maximum nastává při teplotě překrystalizace (fázové transformace). Závislost na chemickém složení u ocelí při pokojové teplotě je malá.

Čím větší je měrná tepelná kapacita (měrné teplo), tím delší je doba ohřevu a větší energetická náročnost ohřevu.

*Pozn.: Střední měrné teplo uhlíkových ocelí pro 0-100° C je:*

$$c = 4,6665 + 0,01905 \cdot w_c, \text{ kde } w_c \text{ je hmotnostní koncentrace uhlíku v oceli (\%)}$$

*Měrné teplo ostatních kovů a slitin (viz. fyzikální tabulky):*

$$\text{Př: Al} = 8,79$$

$$\text{Fe} = 5,02 - 5,86$$

$$\text{Pt} = 0,134 - 0,129$$

### **Měrná hmotnost (hustota) kovů**

Čím vyšší je hustota  $\rho$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ], tím delší je doba ohřevu a větší energetická náročnost ohřevu.

*Pozn.: Surové Fe:  $\rho = 7790 \div 7900 \text{ kg / m}^3$  - při pokojové teplotě*

$$\text{Tavenina Fe: } \rho = 7230 \text{ kg / m}^3 \text{ - při } 1530^\circ \text{ C}$$

*Měrnou hmotnost je také možné u ocelí určit výpočtem podle chemického složení:*

$$\rho = 7876 - 40C - 16Mn - 73Si - 164S - 117S - 11Cu + 4Ni + Cr + 95W - 120Al + 100As$$

*(obsahy prvků v %)*

Pro praktické výpočty u uhlíkových i legovaných ocelí pro  $t = 0$  až  $1100^\circ\text{C}$  používáme hodnoty:

$$\rho = 7800 \div 7400 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Hustota dále závisí na struktuře oceli podle výrazu:

$$\rho_{\text{austenitu}} \setminus \rho_{\text{bainitu}} \setminus \rho_{\text{perlitu}} \setminus \rho_{\text{martenzitu}}$$

### **Součinitel teplotní vodivosti**

Vyjadřuje poměr dodaného tepla k teple nezbytnému pro ohřev daného tělesa  $[\text{m}^2 \text{h}^{-1}]$ :

$$a = \lambda / (c \cdot \rho)$$

Čím vyšší je součinitel teplotní vodivosti, tím kratší je doba ohřevu a nižší energetická náročnost ohřevu.

### **Teplotní délková roztažnost**

Čím větší je teplotní délková roztažnost  $\alpha$   $[\text{K}^{-1}]$ , tím větší jsou tepelná pnutí v ohřivaném tělese a tím menší je rychlost ohřevu.

Pozn.: U čistého železa je teplotní délková roztažnost  $\alpha = 11,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Vliv uhlíku je téměř zanedbatelný. Největší teplotní roztažností se vyznačují austenitické oceli:  $\alpha = 16 \text{ až } 20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

### **Mechanické vlastnosti**

S teplotou se mění výrazně i plastické vlastnosti oceli (obr.2-7 na str.14). Podle tažnosti A se oceli rozdělují do tří skupin:

- oceli s vysokou plasticitou:  $A > 25\%$
- oceli se střední plasticitou:  $A > (15 \text{ až } 25\%)$
- oceli s nízkou plasticitou:  $A < 15\%$

Čím vyšší je plasticita, tím větší je rychlost ohřevu a menší citlivost ocelí k tepelným pnutím.

### **5.2. Tepelná pnutí při ohřevu**

Následkem nerovnoměrného teplotního pole vznikají při ohřevu nebo při ochlazování tepelná pnutí, která v některých případech mohou být limitující pro rychlost ohřevu. Tepelná pnutí se v konkrétních podmínkách ohřevu vyskytují v první fázi ohřevu, a to při teplotách od  $0$  -  $550^\circ\text{C}$ . Nad touto teplotou se ocel stává plastická, pnutí se snižují a rozptylují.

Pro velikost tepelného pnutí, které neohrozí soudržnost tělesa, platí vztahy

$$\sigma_D \geq \frac{\alpha \cdot E}{K} \cdot \Delta t$$

$$\Delta t = t - t_x$$

kde  $\sigma_D$  je dovolené pnutí v MPa,  $\alpha$  je součinitel lineární tepelné roztažnosti, E je modul pružnosti v tahu, K součinitel závislý na tvaru (formě) detailu (polotovaru),  $t$  je průměrná teplota tělesa a  $t_x$  je teplota ve sledované části.

Pozn.:

*Dovolená rychlost ohřevu: Při ohřevu studeného materiálu lze obecně volit tento postup:*

*Připustit teplotní spád v rozmezí 1,2 ÷ 3,4° C na 1cm průměru*

*Při ohřevu teplých (ingotů) je možný spád v rozmezí 6 ÷ 10° C na 1cm průměru.*

### Rozdělení ocelí dle režimu ohřevu:

Rozdělení ocelí do 5 skupin :

- 1) nelegované oceli  $c < 0,4 \%$
- 2) nelegované oceli  $c < 0,4 \div 0,7$  (př. mírně a středně legované  $c = 0,5$ )
- 3) eutektoidní a nadeutektoidní nelegované oceli (př. mírně a středně legované nástrojové oceli)
- 4) vysocelegované nástrojové oceli
- 5) vysocelegované oceli tř. 17 manganové oceli aj.

### **5.3. Technologické zásady ohřevu kovů**

Ohřev polotovaru provádíme jako operaci, předcházející procesu tváření nebo jako ohřev pro následující tepelné zpracování.

#### Horní tvářecí teplota

Stanovení této teploty je podmíněno respektováním zcela protichůdných jevů: se stoupající teplotou se zlepšuje tvařitelnost a snižuje přetvárný odpor, což je výhodné, avšak současně se zintenzivňuje oxidace a oduhličení povrchových vrstev, zvyšuje se náchylnost k růstu zrna, přehřátí a spálení oceli. Horní tvářecí teplota se u polotovarů s lící strukturou poněkud zvyšuje, čímž se podporuje homogenizace lité oceli.

Oblast horních tvářecích teplot je na obr.2-6 ( str.13). Horní tvářecí teplota se zpravidla pohybuje 150 až 200° C pod křivkou solidu.

Při vysokých teplotách pod křivkou solidu vzniká riziko přehřátí a spálení oceli.



### Dolní tvářecí teplota

Tato teplota ovlivňuje rozhodujícím způsobem výsledné vlastnosti tvářené oceli. Při dosažení dolní tvářecí teploty musí být splněny tyto principy:

- a) ocel musí vykazovat ještě dostatečnou tvařitelnost
- b) přetvárný odpor oceli musí být v souladu s energosilovými veličinami tvářecího stroje
- c) požadované vlastnosti oceli jsou výsledkem vhodné kombinace dolní tvářecí teploty, posledního úběru a následného způsobu ochlazování.

Vzhledem k naprosto rozdílným vlastnostem feritu a cementitu se určuje dolní tvářecí teplota zvlášť pro podeutektoidní a zvlášť pro nadeutektoidní oceli.

#### Podeutektoidní oceli

Optimální dokovací teplota pro podeutektoidní oceli se pohybuje asi 50° nad teplotou  $A_3$ .

Ukončení tvářecího pochodu vysoko nad teplotou  $A_3$  podporuje statickou rekrystalizaci a může dojít ke zhrubnutí zrna. Tvářecí mezi teplotami  $A_3$  a  $A_1$  se rovněž nedoporučuje, neboť ve dvoufázové struktuře vzrůstá pnutí, zhoršuje se tvařitelnost, vzniká řádkovitost a zvýrazňuje se anizotropie mechanických vlastností.

#### Nadeutektoidní oceli

Dolní tvářecí teplota se pohybuje těsně nad teplotou  $A_1$  v oblasti austenitu a vyloučeného sekundárního cementitu. Účelem je rozrušit cementitové síťové po hranicích zrn, což je výhodně pro další tepelné zpracování. Podmínky tvářecí závisí na tvaru cementitu - globulitický tvar nečiní při tvářecí potíže. Pokud by spodní kovací teplota byla nad  $A_{rm}$ , pak by při ochlazování (mezi teplotami  $A_{rm}$  a  $A_{r1}$ ) docházelo k vylučování křehkého cementitu ve formě síťové po hranicích zrn.

#### Tvářecí teploty neželezných kovů a slitin

Kovací teploty se volí většinou tak, aby slitina byla homogenní a teplotou se ovlivnila mezikrystalická soudržnost. U těchto materiálů je ve většině případů užší interval tvářecích teplot, přičemž teploty jsou závislé na dosti rozdílné rekrystalizační schopnosti jednotlivých slitin.

## 5.4.Průvodní jevy ohřevu

### Opal

Opal je důsledkem povrchové oxidace ohřívaného tělesa v pecní atmosféře. Vznik okují je limitován difúzí atomů železa a probíhá působením volného kyslíku, oxidu uhličitého a vodní páry. Okuje se tvoří od teplot 600 až 700° C, zpočátku téměř nezatelně, ale nad teplotou 1000° C velmi intenzívně. Důsledkem opalu je ztráta kovu, snížení životnosti pece a tvářecích nástrojů, zvýšené nebezpečí zmetkovitosti v podobě zatlačení okují do povrchu tvářených polotovarů a nezbytnost odstranění okují před dalším tvářením za studena nebo obráběním. Snížení opalu je možné ovlivnit zlepšením tepelné práce pece, dokonalým spalováním (vhodné hořáky), zrychlením ohřevu, použitím účinných izolačních materiálů aj.

Těmito opatřeními lze snížit opal o 20 – 50%.

Rovněž ohřev v ochranných atmosférách, v solných lázních nebo ohřev v lithiové atmosféře ovlivňují množství a strukturu vznikajících okují.

### Oduhličení

Oduhličení ochuzuje povrchové vrstvy ohřívaného polotovaru o uhlík, což vede ke snížení pevnosti a únavových vlastností. Oduhličené vrstvy se při zatížení deformují plasticky, kdežto zbývající materiál pružně, což po určité době vede ke vzniku povrchových trhlin.

### Přehřátí a spálení oceli

K přehřátí dochází při ohřevu oceli těsně nad horní tvářecí teplotu, kdy hrubne austenitické zrno. Silné zhrubnutí austenitického zrna při ohřevu má za následek prudké zhoršení houževnatosti oceli, zejména po zušlechtění. Náprava je možná normalizačním žiháním.

Při vysokém přehřátí v oxidační atmosféře nastává rychlá difúze kyslíku podél hranic zrn a jejich okysličení. Navíc při vysokých teplotách dochází k natavování nízkotavitelných eutektik uložených v mezikrystalové hmotě (po hranicích zrn). Tím dochází k naprosté ztrátě platických vlastností a houževnatosti – jde o tzv. spálení oceli. Tento stav již nelze napravit tepelným zpracováním.

## **6. ROZDĚLENÍ TVÁŘECÍCH POCHODŮ**

Tvářecí pochody můžeme rozdělit podle teploty na tvářecí za studena a za tepla, nebo podle stavu napjatosti na plošné a objemové tvářecí.

Mezi technologické postupy tvářecí za tepla patří:

- 1) Kování: - volné (hydraulické lis, buchary)
  - zápusťkové (buchary, vřetenové a klikové lis, kovací válce, aj.)
- 2) Válcování: - k hromadné výrobě předmětů jednoduchého tvaru (desky, plechy, kruhové průřezy; dráty; trubky; kolejnice, nosníky, aj.)
- 3) Vytlačování: - pro výrobu tyčí, profilů, trubek

Technologické postupy tvářecí za studena jsou tyto:

- 1) Válcování: - obdobně jako za tepla (jemné plechy a pásy)
- 2) Tažení: - drátů, tyčí, profilů, trubek
- 3) Lisování:
  - a) stříhání (prostřihování, děrování, odstřihování, aj.) nástroj překonává mez pevnosti materiálu
  - b) ohýbání, rozšiřování, zkružování
  - c) tažení nádob
  - d) objemové tváření – protlačování

Z hlediska stavu napjatosti dělíme tvářecí procesy na **objemové tváření**, kam patří:

- 1) Kování
- 2) Válcování
- 3) Tažení drátů a profilů
- 4) Protlačování

Mezi postupy **plošného tváření** řadíme:

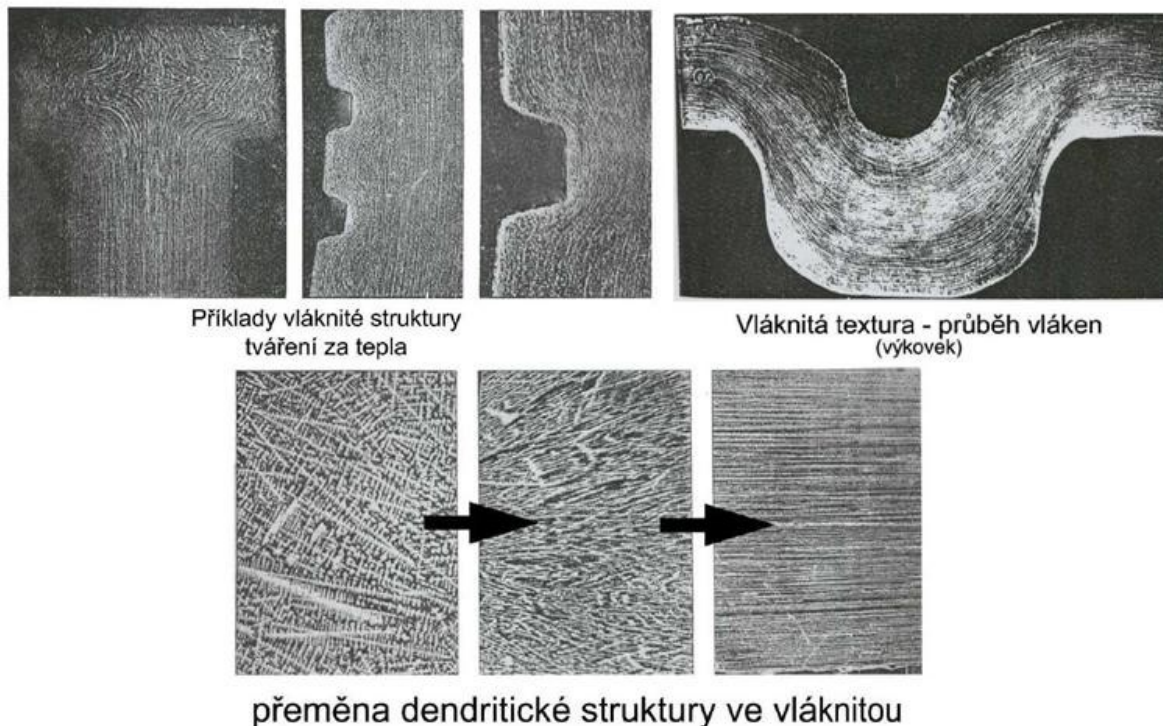
- 1) Válcování plechů a pásů
- 2) Tažení plechu
- 3) Stříhání (prostřihování, děrování, odstřihování)
- 4) Ohýbání, rozšiřování, zkružování

## **7.VOLNÉ KOVÁNÍ**

Kováním rozumíme objemové tváření za tepla, prováděné úderem nebo klidně působící silou. Kování má bohatou historii - ruční kování pomocí kladiva a kovádky zná lidstvo několik tisíců let. Jedná se o přetržitý způsob a výsledek má požadovaný tvar, příznivou makrostrukturu, výhodnou mikrostrukturu a zvýšené mechanické a fyzikální vlastnosti. Kováním lze zpracovávat téměř všechny kovy. Cílem volného kování je získat polotovary požadovaného tvaru s typickou tvářenou strukturou, charakterizovanou tzv. **stupněm prokování**. Účelem **prokování** je odstranění nestejně rozložené hrubé lící

struktury a metalurgických vad u ingotů, které snižují tvárnost a fyzikální a mechanické hodnoty a vlastnosti kovu. Tvářením za tepla se tvar primárních krystalů, dendritů, mění (dochází k jejich rozrušování) a vytvářejí se vlákna. Protože však nastává dynamická rekrytalizace, deformovaná zrna se změjí na nová, jemnější a textura zmizí. Avšak nečistoty ( také karbidy včetně cementitu) v povrchových vrstvách krystalů nepodléhají rekrytalizaci a proto nemění svůj tvar - vzniká vláknitá (řádkovitá) textura (obr.7-1), kterou nelze žádným tvářením ani tepelným zpracováním odstranit. Vlákňitost má vliv na anizotropii vlastností (mechanické vlastnosti, tažnost, ...) ve směru vláken a ve směru příčném a mění se stupněm prokování  $P_k$  (praktická hodnota prokování je 3 až 4) a stupněm deformace. Proto se musí při tvářením za tepla vždy pamatovat na správný směr vláken. Směr největšího normálového napětí má souhlasit se směrem vláken a tečné napětí má být k němu kolmé. Vlákna nemají být přerušena a mají se shodovat s obrysem součásti.

Problematika kování je vázána na vliv tření mezi tvářecími částmi nástroje a materiálem, které způsobuje soudečkovitost výkovku nebo vyboulení u dlouhých těles a dále rozdílné stupně prokování v jednotlivých oblastech výkovku (je nutné otáčení) – mluvíme o kovářském kříži.



Obrázek 7-1 Příklad vláknité textury po kování

**Volné kování** je proces, kdy se materiál zpracovává postupně za použití víceúčelových nástrojů a nářadí. Operace volného kování můžeme rozdělit následovně:

1. pěchování – zvětšuje se příčný průřez polotovaru na úkor jeho výšky, resp. se provádí místní napěchování (obr. 7-2),

2. prodlužování – charakterizované zvětšováním délky polotovaru za současného zmenšování jeho příčného průřezu (obr. 7-3) ,

3. osazování – prodlužování vymezených částí polotovaru při zachování souososti všech jeho částí (obr.7-4),

4. další operace – prosazování, přesazování (obr.7-4, 7-5), děrování plným (obr.7-6) a dutým trnem atd

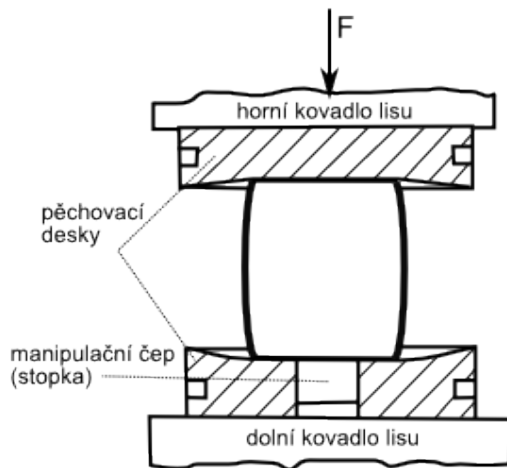
3. rozkování na trnu, využívá se při kování kroužků, při němž se zvětšuje vnější i vnitřní průměr a výška kroužku na úkor tloušťky stěny (obr. 7-8),

6. kování na trnu - prodlužování na trnu (obr.7-7), kdy se dutý(vyděrovaný) předkovek prodlužuje ve směru podélné osy trnu za současného zmenšování vnějšího průměru a stěny (kování do délky – dutá tělesa); rozkování na trnu (kování na průměr - kroužky)

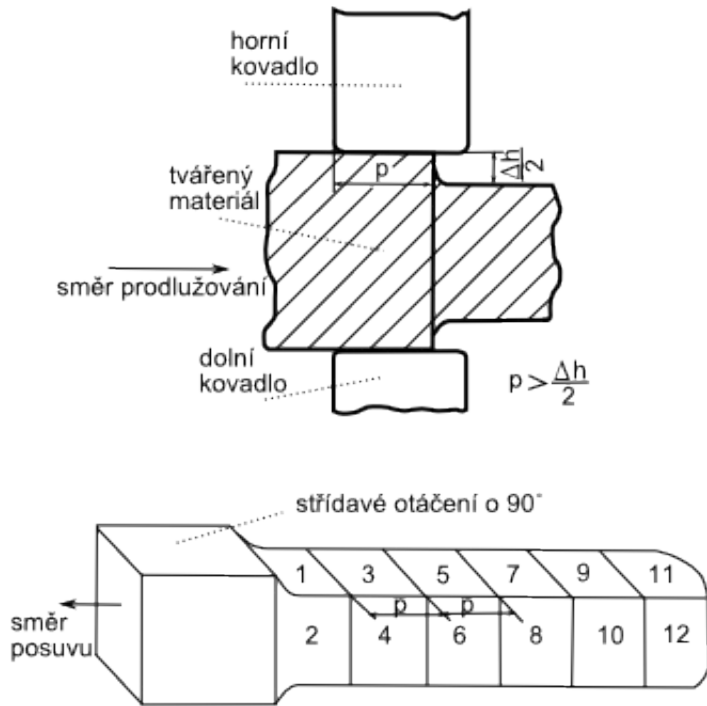
7. sekání (odsekávání), okování, hlazení

Podle ČSN EN se volně kované výkovky dělí na kované tyče, výkovky podélné (např. válce, zalomené hřídele atd.) , kotouče a kruhové desky, kroužky a dutá tělesa. Vždy se jedná o polotovary, které mají nerovný zokuzený povrch s kovářskými přídávky.

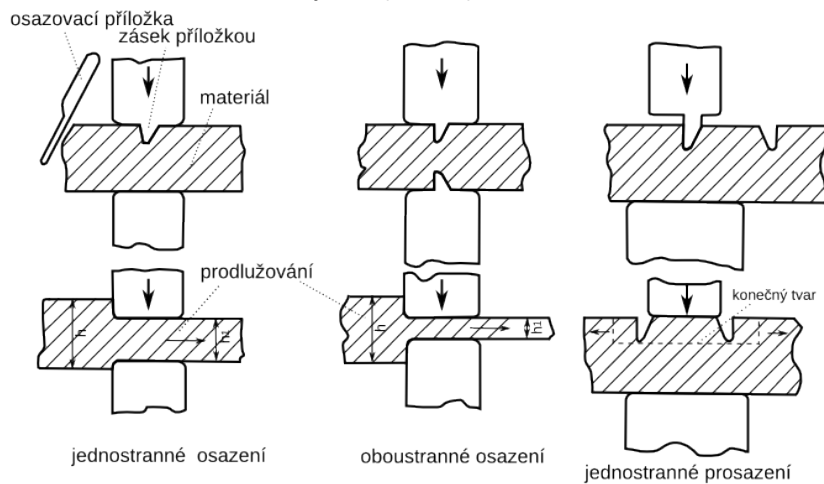
Volné kování se provádí buď na lisech nebo bucharech.



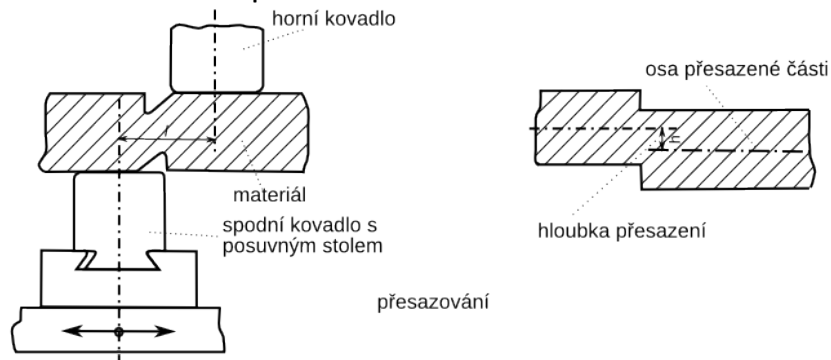
Obrázek 7-2 Pěchování ingotu s předkovaným manipulačním čepem



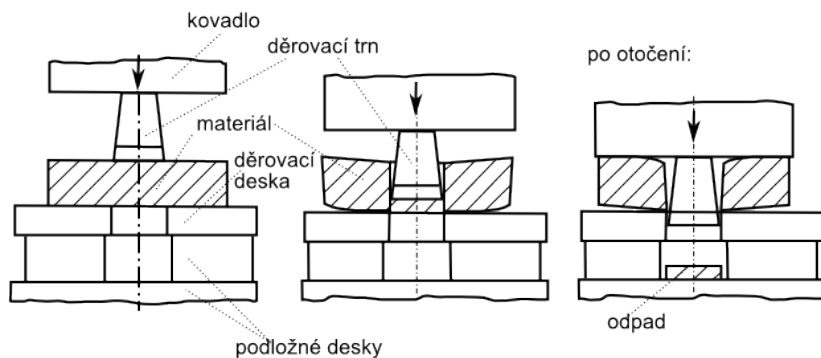
**Obrázek 7-3 Prodlužování na čtyřhran (kvadrát)**



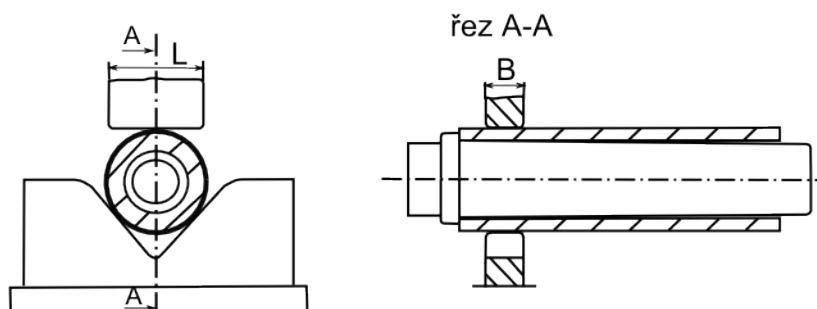
**Obrázek 7-4 Osazování a prosazování**



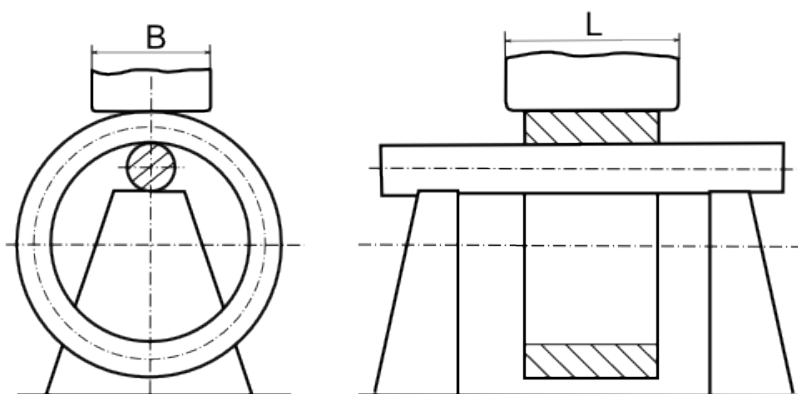
**Obrázek 7-5 Přesazování**



Obrázek 7-6 Děrování plným trnem



Obrázek 7-7 Prodlužování na trnu



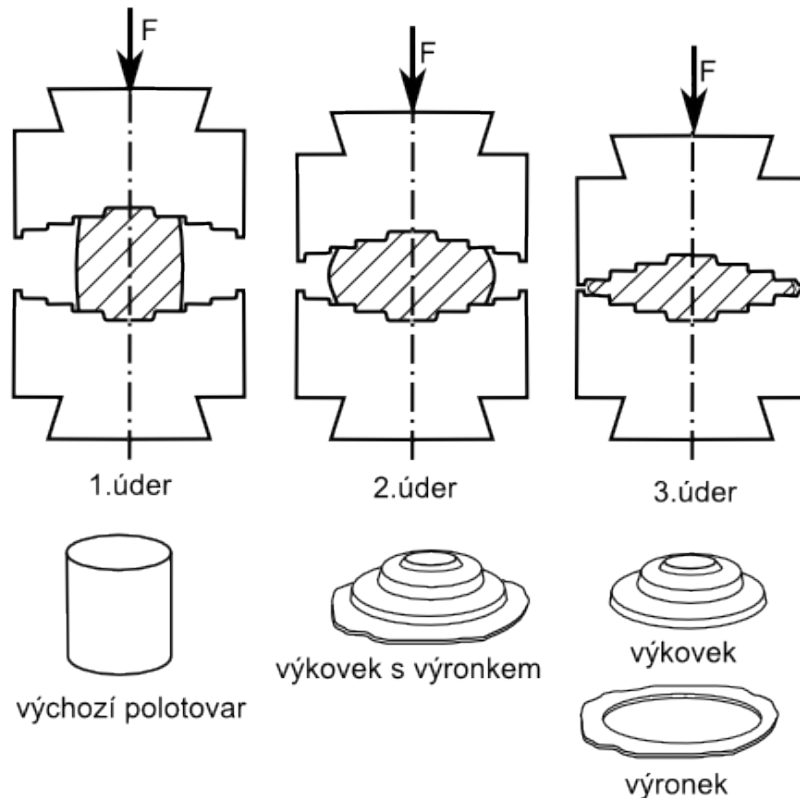
Obrázek 7-8 Rozkování na trnu

## 8. ZÁPUSTKOVÉ KOVÁNÍ

Zápustkové kování slouží k výrobě velkého počtu tvarově stejných součástí z ocelí nebo jiných tvárných slitin. Zápustka je většinou dvoudílný nástroj. Hlavní předností zápustkového kování je vysoká výkonnost a snadná obsluha. Výkovky mají však omezené rozměry a hmotnost.

Ohřátý materiál se tváří v dutině zápustky, jejíž tvar je shodný s tvarem výkovku. Rozměry jsou však zvětšeny o hodnotu smrštění vychladlého výkovku. Proti volnému kování se dosahuje přesnějšího tvaru výkovku. Přesnost a jakost povrchu se dá výrazně zlepšit následným kalibrováním tak, že se nemusí již dále používat obrábění. Zápustkovým kováním se dosahuje vysokého stupně prokování a

průběh vláken sleduje obrys výkovku. Při zápusťkovém kování se postupuje tak, že se výchozí polotovár, ohřátý na potřebnou kovací teplotu, vloží do dutiny zápusťky a působí se na něj tlakem nebo úderem tvářecího stroje (obr. 8-1). K zápusťkovému kování používáme bucharů (kování úderem) a lisů (kování klidným tlakem).



Obrázek 8-1 Postup kování v jednodutinové zápusťce na bucharu

Zápusťky dělíme na

- 1) jednodutinové (jednoduché) – pro jednoduché tvary výkovků, které nepotřebují předkování (v případě složitějších tvarů probíhá předkování mimo zápusťku)
- 2) vícedutinové – postupové zápusťky – pro složitější tvary výkovků

Dutinu zápusťky je možno zaplňovat buď vtlačováním nebo pěchováním - z čehož pěchování je lepší. Při kování na bucharcích je zápusťková dutina vyplňována postupně během několika úderů beranu, při kování na lisech je výkovek zhotoven v průběhu jednoho zdvihu nebo několika zdvihů (postupová zápusťka). Výkovky se často sdružují ve vícenásobných dutinách. Po vykování spolu výkovky souvisí prostřednictvím výronku, takže k jejich oddělení dojde po odstřížení výronku. Kovat lze též na třecích lisech. Jedná se převážně o výkovky rotačních tvarů, kovaných ve svislé poloze.

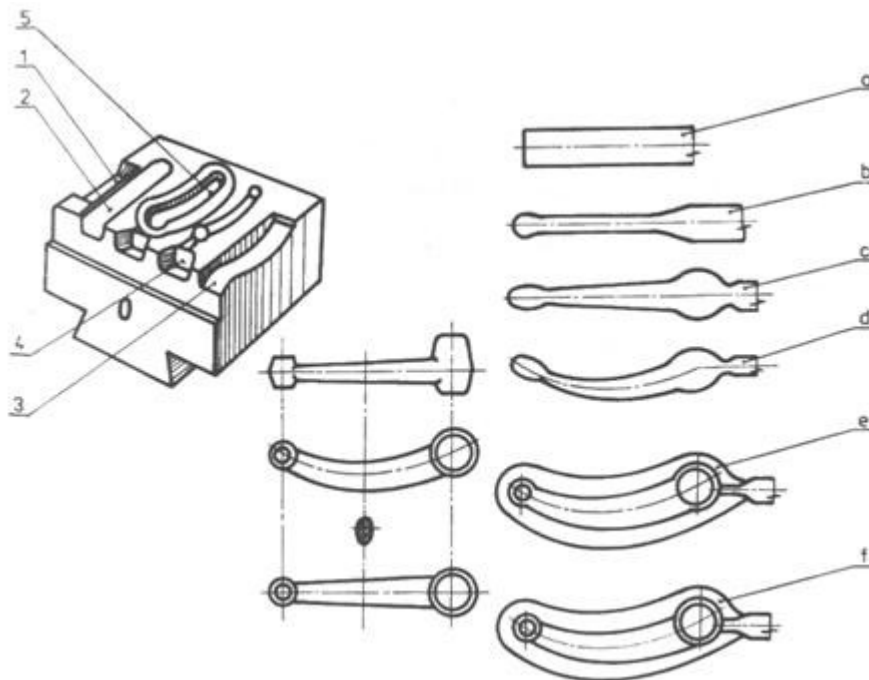
Pro složitější tvary výkovků v zásadě platí tato pravidla:



- a) v jedné dutině se nesnažíme deformovat kov v příčném i podélném směru současně
- b) rozdělení materiálu v podélném směru provedeme dříve než ve směru příčném
- c) tvar předkovku navrhne tak, aby při kování docházelo k posuvu částic v příčných řezech a předkovek měl rotační tvar

Při zápustkovém kování záleží počet kovacích dutin na tvaru výkovku, ale též na tvaru výchozího materiálu. Jen zřídka se stane, že k vykování výkovku stačí jedna dutina. Jednotlivé dutiny se často umísťují do společného bloku oceli - nástroje, což je pro práci na bucharu výhodné. Přenášení výkovku z jedné dutiny do druhé netrvá příliš dlouho, výkovek nechladne rychle. V případě složitějších tvarů je tedy nutno kovat ve více dutinách, které zajistí tečení materiálu v dutině zápustky – kování v postupových zápustkách.

Postupová zápustka může být někdy konstruována pomocí výměnných tvarových vložek kruhového nebo obdélníkového tvaru. Dochází zde k výrazné úspoře materiálu zápustky. Kování v zápustkách bez výronku se říká tzv. kování v uzavřených zápustkách. Je velmi náročné, protože objem materiálu musí být velmi přesně stanoven. Na obr.8-2 je ukázka postupové zápustky pro buchar. V postupové zápustce nejsou dutiny umístěny za sebou podle technologického postupu. Kovací (dokončovací), tj. poslední dutina se umísťuje uprostřed tak, aby její těžiště bylo blízko těžiště celého bloku. To proto, že síla (nebo energie) na kování výkovku je větší než na kování předkovků, výkovek chladne a tedy roste jeho přetvárná pevnost, a dále proto, že výkovek včetně výronkové drážky má největší plochu. Ostatní dutiny jsou rozmístěny kolem této dokončovací dutiny.



**Obrázek 8-2** Postupová zápustka pro buchar (vlevo: dutiny zápustky:1 – prodlužovací, 2 – rozdělovací, 3 – předkovací, 4 – kovací, 5 – dokončovací dutina; vpravo: technologický postup: a – polotovar, b – prodlužování, c - rozdělování, d - ohýbání, e – kování v 1.dohotovné dutině, f-dokování)

Dutiny postupové zápustky dělíme na:

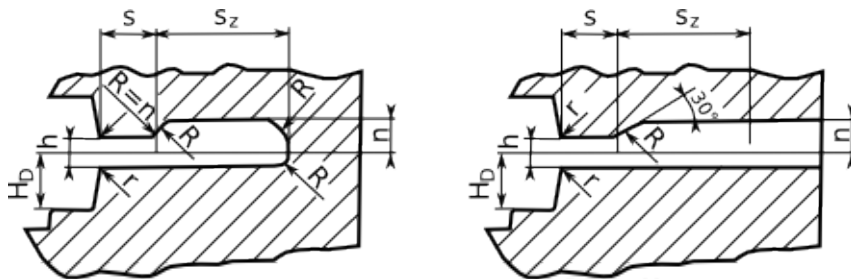
- a) předkovací dutiny, kdy v řadě případů se jedná o dutiny otevřené
- b) dokončovací (dohotovní) uzavřené dutiny

Předkovací dutiny slouží k přemístění materiálu (předběžné tvarování) do míst budoucího složitějšího tvaru výkovku

Mezi předkovací dutiny patří:

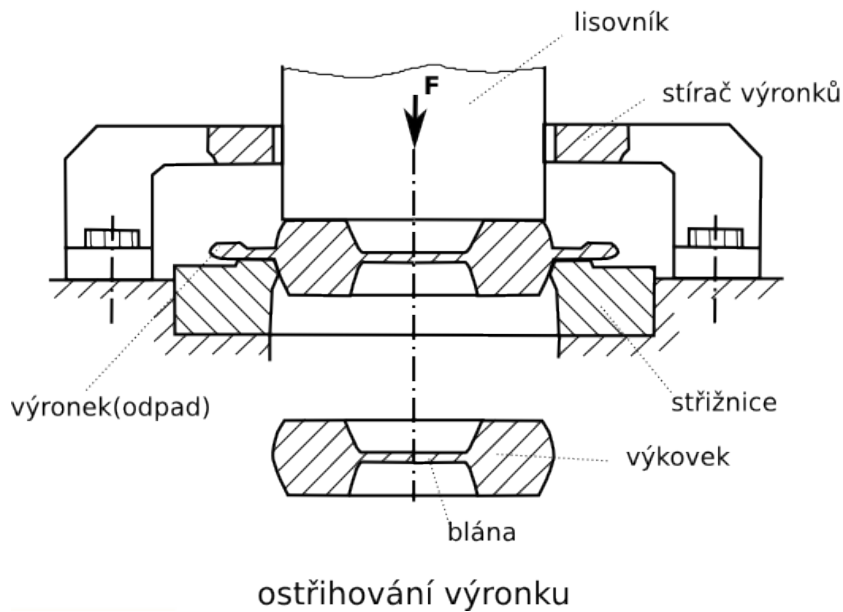
- prodlužovací
- pěchovací
- rozdělovací (otevřená nebo uzavřená)
- zužovací
- ohýbací
- tvarovací

Poslední dokončovací (finální) dutina je opatřena okolo obrysu tvaru výkovku ještě výronkovou drážkou (obr.8-3). Její průřez pro zvolený kovací stroj je znázorněn na obrázku. Zúžená část se nazývá můstkem, rozšířená zásobníkem. Funkce výronku je dvojí. Jednak pojmутí přebytečného materiálu, neboť dutina zápustky musí být dokonale vyplněna, a jednak ovlivnění toku materiálu uvnitř zápustky, kdy zvýšený odpor rychle chladnoucího materiálu v zúžené části výronkové drážky vede k dokonalému vyplňování horní části zápustky (zajišťuje „stoupání materiálu“). Výronek se dodatečně odstraňuje ostříhováním.

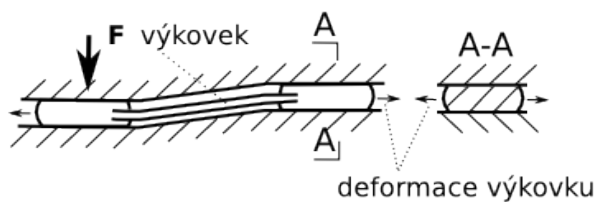


Obrázek 8-3 Výronková drážka v zápustce (vlevo pro buchar, vpravo pro lis)

Konečné úpravy výkovků jsou tedy odstřížení výronku (obr.8-4), popř. prostřížení blan v otvorech, rovnání výkovku, výkovek se zbavuje okují (moření, otryskávání), tepelně zpracovává (normalizační žíhání) nebo za studena kalibruje (obr. 8-5).



**Obrázek 8-4 Úprava výkovek: ostřihování výronku**



**Obrázek 8-5 Úprava výkovek: kalibrování**

## **9.VÁLCOVÁNÍ**

Válcováním rozumíme kontinuální proces, při kterém se tvářený materiál deformuje mezi otáčejícími se pracovními válci za podmínek převažujícího všestranného tlaku. Válcovaný materiál se mezi válci deformuje, výška se snižuje, materiál se prodlužuje a současně rozšiřuje a mění se i rychlost, kterou válcovaný materiál z válcovací stolice vystupuje. Mezera mezi pracovními válci je menší než vstupní rozměr materiálu. Válcování se provádí hlavně za tepla, ale i za studena. Výsledkem procesu je vývalek. Podle polohy válců a polotovaru se z hlediska hlavní deformace válcování dělí na:

- a) Podélné válcování (obr.9-1)– osy válců jsou rovnoběžné, dochází ke vtahování polotovaru mezi válce, směr otáčení válců je opačný - válce se otáčejí „proti sobě“. Polotovar je stlačován na požadovaný průřez, podélné osy polotovarů a válců jsou na sebe kolmé.

*Příklady výrobků: válcované polotovary obdélníkového(bloky, bramy) nebo čtvercového (sochory) průřezu, plechy*

- b) Podélné tvarové válcování : *plynulé* – tvarem kalibru je určen příčný průřez vývalku, *přerušované* – tváření probíhá v kalibru, vytvořeném na části obvodu válce, *periodické* – tvářecí proces probíhá v kalibru , jeho tvarem je dán opakující se tvar výrobku.

*Příklady výrobků:profilová ocel (I, H), kolejnice, válcované tyče, drát*

- c) Příčné válcování - osy válců i polotovaru jsou rovnoběžné, směr otáčení válců je shodný, polotovar se otáčí mezi válci kolem své osy, mění se průměry válcovaného polotovaru.

*Příklady výrobků: tvarové hřídele, závitové tyče, vřetena*

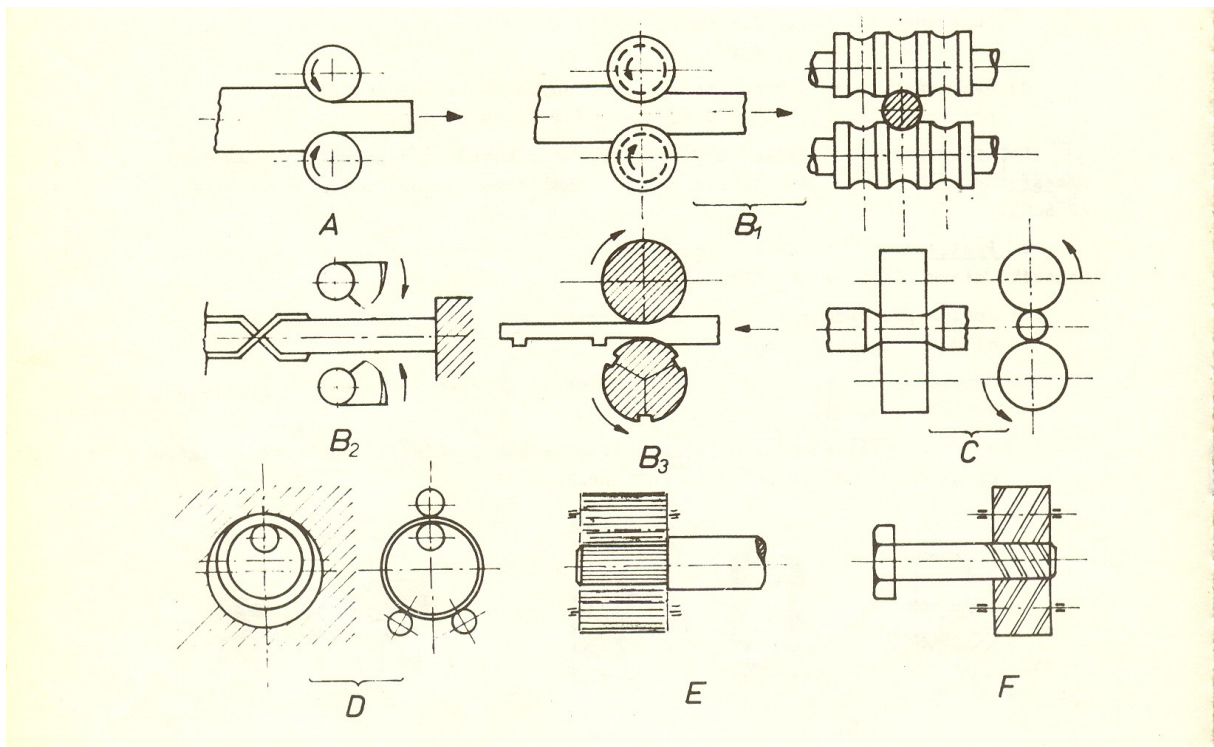
- d) Kosé válcování (obr.9-2) – osy válců nejsou rovnoběžné, svírají úhel asi 5°. Polotovar se otáčí kolem své osy a zároveň postupuje dopředu (válcování bezešvých trub). Vlivem tahových napětí uvnitř polotovaru vzniká dutina. Dělí se na *děrování kosým válčováním* – dutina se vytváří při použití trnu a na *kosé periodické válcování* – tvar vývalku je dán šroubovým kalibrem na obvodu válců.

*Příklady výrobků: bezešvé trubky*

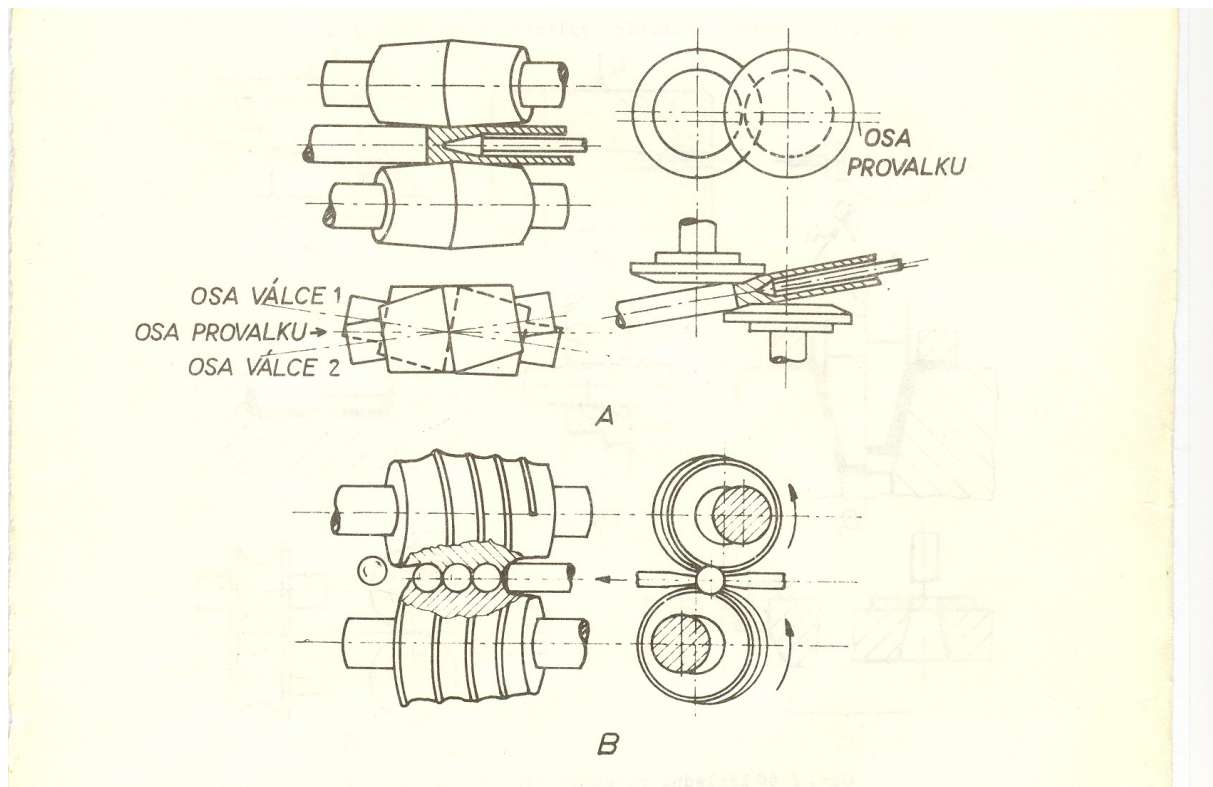
- e) Rozválcování – vyděrovaný polotovar se rozválcovává přítlačným válcem na požadovaný průřez

- f) Vroubkování – spočívá ve vytváření rýh na povrchu rotačního polotovaru

- g) Válcování závitů – závitové válce vytvářejí na polotovaru závit



Obrázek 9-1 Schemata válcování: A – válcování podélné, B1 – válcování podélné v kalibru, B2 – válcování podélné pomocí kovacích válců, B3 – periodické válcování, C až F – různé typy příčného válcování.



Obrázek 9-2 Kosé válcování: A – válcování trubek, B – kosé periodické válcování (např. koulí)

### 9.1. Válcovací tratě a stolice

Hlavní výrobní jednotkou válcovny je válcovací trať, která zahrnuje ucelený, vzájemně propojený soubor strojů a strojních částí, dopravních a manipulačních mechanismů, nezbytných k uskutečnění válcovacího pochodu. Kromě toho musí být válcovací trať vybavena ještě dalším zařízením, např. ohřívacími a žíhacími pecemi, zařízením pro chlazení, rovnání a povrchovou úpravu vývalků. Válcovací tratě jsou sestaveny z různého počtu válcovacích stolic do výrobních linek od jedné do dvanácti stolic i více. Rozlišují se nejčastěji podle těchto hledisek:

- 1) podle konstrukce válcovací stolice a počtu válců ve stolici
- 2) podle druhu vývalku a průměru pracovních válců
- 3) podle způsobu otáčení válců
- 4) podle uspořádání válcovacích stolic

Válcovací stolice je základní strojní prvek válcovací trati, v němž se uskutečňuje vlastní tváření. Válcovací stolice musí být pevná a tuhá, ale současně natolik jednoduchá, aby umožňovala snadnou a rychlou výměnu válců a dalších opotřebovaných či poškozených součástí.

Podle počtu válců se dělí stolice na dvouválcové, tříválcové, čtyřválcové, víceválcové, univerzální a speciální:

1) dvouválcové (duo) stolice patří k nejrozšířenějším a vyznačují se dvěma rovnoběžnými pracovními válci (obr.9-3 a). Motor pohání obvykle oba válce. Mohou být jednosměrné (průběžné) – oba válce se otáčejí jen v jednom směru, nebo vratné (reverzní - směr otáčení válců se mění po každém průchodu provalku mezi válci – válcování předvalků)

2) tříválcové (trio) stolice se vyznačují třemi rovnoběžnými pracovními válci ( obr.9-3b). Pohon se přenáší na střední, pevně uložený válec, zbývající válce, zpravidla stavitelné, jsou poháněny převodem.

Zvláštním druhem tříválcové stolice je Lauthovo trio. Jeho střední válec má asi o 1/3 menší průměr než válce spodní a horní. Tento válec je *vlečný*, tzn. že se otáčí pouze třením. Při každém průchodu se opírá buď o spodní nebo o horní válec.

Poháněny jsou válce spodní a horní. Nevýhodou je značné opotřebení středního válce.

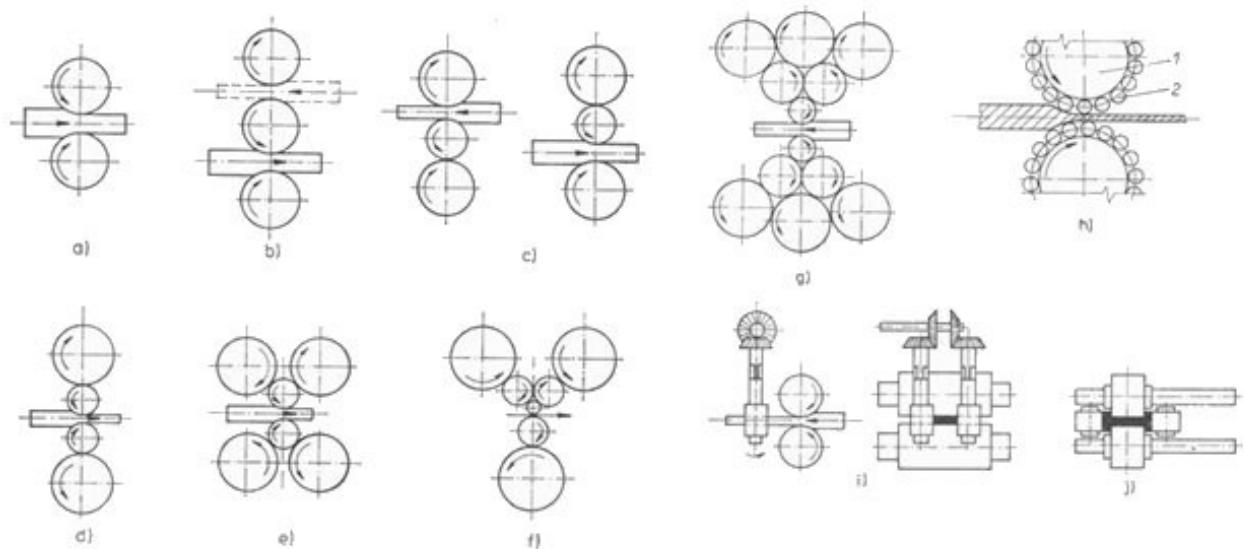
3) čtyřválcové (kvarto) stolice se vyznačují čtyřmi rovnoběžnými válci. Vnitřní válce jsou pracovní a jejich menší průměr podporuje prodloužení a zvyšuje přesnost tloušťky vývalku. Vnější válce jsou opěrné – zabraňují průhybu pracovních válců. Pohánějí se pracovní válce, kdežto opěrné válce jsou vlečené. Stavějí se v jednosměrném i vratném provedení a používají se při válcování plechů a pásů za tepla i za studena.

4) víceválcové se dále dělí :

a) klasické uspořádání , tzn. dva válce jsou pracovní , ostatní opěrné ( max. 20 válců). Dva vnitřní válce menšího průměru jsou většinou hnané. Tento typ válcovacích stolic umožňuje válcování tenkých plechů, pásů a fólií za studena.

b) planetové stolice (obr.9-3 h ) mají dva rovnoběžné opěrné válce velkého průměru, a dvě soustavy pracovních válečků, které volně – jako planety – obíhají kolem opěrných válců, což umožňuje až 95% úběr v jdnom průchodu. Uplatňují se při válcování plechů a pásů za tepla.

5) stolice univerzální jsou stolice se čtyřmi pracovními válci (dva válce v horizontální poloze a dva válce ve vertikální poloze). Pomocí vertikálních válců se omezuje šíření, tzn. upravuje se šířkový profil. Vývalek je obdélníkového průřezu a prodloužení v jediném průchodu touto stolicí je větší než u dva běžného.



**Obrázek 9-3 Válcovací stolice: a) dvouválcová stolice, b) tříválcová stolice, c) Lauthovo trio, d) čtříválcová stolice, e) šestiválcová stolice, f) sedmiválcová stolice, g) dvanáctiválcová stolice, h) planetová stolice, i) univerzální stolice, j) univerzální stolice pro válcování širokopřírubových nosníků**

Podle druhu vývalků a průměru pracovních válců se válcovací tratě rozdělují na:

a) předválcové tratě, na nichž se válcují předvalky (bloky, bramy, sochory), které slouží jako polorovar pro hotovní tratě.

*Příklady:*

*Slabingová trať – mohutná dvoustolicová trať osazená duo stolicemi s hladkými válci, přičemž první bývá univerzální.*

*Bloková trať (blooming) – bývá osazena jednou nebo dvěma vratnými stolicemi duo, s rýhovanými válci, chlazenými vodou*

*Sochorová trať – zpracovává hrubé předvalky na jemnější sochory. Osazení 2 x 6 stolic za sebou nebo vedle sebe.*

b) hotovní tratě, na nichž se válcují hotové vývalky ve velmi rozmanitém tvarovém a rozměrovém sortimentu

*Příklady:*

- a) těžké - vratné provedení na válcování těžkých tyčových a tvarových vývalků;  $D=700$  až  $950$  mm
- b) hrubé – pro válcování hrubých tyčových a tvarových vývalků;  $D=650$  až  $900$  mm
- c) střední - pro válcování středních tyčových a tvarových vývalků;  $D=400$  až  $600$  mm
- d) jemné - pro válcování středních tyčových a tvarových vývalků;  $D=250$  až  $350$  mm
- e) pro válcování drátu
- f) pro válcování tlustých plechů
- g) pro válcování tenkých plechů v tabulích

- h) pro válcování úzkých a širokých pásů za tepla i za studena
- i) univerzální – pro válcování široké oceli s pravoúhlým průřezem
- j) pro válcování bezešvých trubek za tepla i za studena
- k) speciální pro tvarově náročné vývalky (kola a obruče kolejových vozidel, vývalky proměnlivého průřezu atd.)

## **9.2. Výroba hutních polotovarů**

Technologie válcování základních hutních polotovarů můžeme rozdělit podle typu výrobku do tří skupin:

### **a) Válcování plechů**

Plech z hlediska výroby i spotřeby dělíme na tlusté a tenké. Jako hraniční uvádí norma tloušťku 3,75mm.

Tlusté plechy se válcují za tepla. Nejčastěji bývá trať osazena vratným duem, v případě větších šířek kvartem, nebo i nevratným triem ( Lauthovo trio).

Tenké plechy se válcují za studena a to až do tloušťky 0,15mm. Starší způsob výroby se prováděl válcováním v několika vrstvách na sobě. Tím se celková výška vývalku zvětší a potřeba přetvárných sil zmenší. Nevýhody tohoto způsobu:

- 1)Plech se při válcování někdy svaří a je obtížné je oddělit
- 2)Tloušťka jednotlivých listů není vždy stejná

Výhody:

- 1)Možnost překládání při válcování- tj. změna směru válcování o 90° a tím snížení plošné anizotropie plechu.

Dnes se převážně plechy vyrábějí jako pásy na tzv. široko pásových kontitratích a rozstřihují se na tabule po vyválcování.

### **b) Válcování profilů**

Profily se válcují na profilových tratiích. Profilové stolice jsou dva nebo tři osazená tzv. profilovými (kalibrovanými) válci. Kalibry jsou na válcích vypracovány v podobě obvodových drážek.

Kalibry mohou být otevřené nebo uzavřené, kdy je jeden válec je vybaven drážkou a druhý do ní zapadá profilovým nákrůžkem.

### **c) Válcování bezešvých trubek**

Výrobu bezešvých trubek je možno rozdělit do tří základních operací:



1) Děrováním polotovarů (kovářsky nebo válcováním): nejčastěji se děruje kosým válcováním, při kterém dochází k redukci průměru, prodloužení délky vývalku. Působením válců, jejichž osy nejsou rovnoběžné, dochází v centrální oblasti předvalku ke vzniku tahových napětí, která vedou k tvorbě vnitřních trhlin – tedy k děrování. Vnitřní otvor má nepravidelný tvar a proto se kalibruje trnem

2) Válcování děrovaného polotovaru (redukce průměru, prodloužení). K další redukci průměrů se používá válcování na profilové válcovací stolici s předvalkem navlečeným na trn. Profilová válcovací stolice na trubky, opatřená vedle pracovních ještě transportními válci se nazývá automatik. Jiné zařízení pro redukci je tzv. poutnická stolice, kdy se vývalek při válcování osově posouvá tam a zpět po jednotlivých krocích (odtud název). Na povrchu vývalků válcovaných na poutnické stolici jsou znát nepatrné povrchové vlnky, ve vzdálenosti válcovacího kroku, které je nutno odstranit kalibrací.

### 3) Kalibrace rozměrů

Rozeznáváme několik technologických způsobů výroby bezešvých trubek:

- a) systém Mannesman – k děrování se používají dlouhé kosé váce, redukce se provádí na poutnických stolicích
- b) systém Stiefel - děrování se provádí na krátkých kosých válcích, následující válcování se provádí na tratích s poutnickými stolicemi s podélným a příčným kalibračním válcováním)
- c) systém Erhardt – děrování polotovarů kovářským způsobem tj. trnem pod lisem. Redukce a kalibrace se provádí na spojitě trati vybavené mnoha páry kalibrovaných kotoučů.

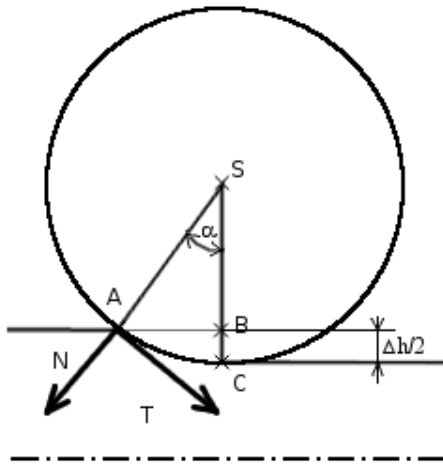
## **9.3. Podmínky pro záběr (vtažení) provalku**

### Úhel záběru

Úhel záběru je dán úhlem mezi spojnicí bodu, kde materiál vstupuje mezi válce a středu válce a spojnicí bodu, v němž materiál vystupuje z mezery válců a středu válce. Označujeme ho symbolem  $\alpha$  – (viz. obr.9-4, úhel ASC). Při válcování dochází k zmenšování výšky provalku o tzv. úběr, který vyjádříme vztahem:

$$\Delta h = H_1 - H_2,$$

kde  $H_1$  je vstupní výška válcovaného polotovaru a  $H_2$  je výstupní výška válcovaného polotovaru.



Obrázek 9-4 Úhel záběru

Velikost úhlu záběru závisí na průměru válce  $D$  a rozdílu mezi vstupní a výstupní výškou polotovaru – tzv. úběrem. Pro stanovení úhlu záběru platí :

$$\cos \alpha = \frac{BS}{AS}$$

$$AS = \frac{D}{2}$$

$$BC = \frac{h_0 - h_1}{2} = \frac{\Delta h}{2}$$

$$BS = CS - BC = \frac{D}{2} - \frac{\Delta h}{2}$$

$$BS = CS - \frac{\Delta h}{2} = \frac{D - \Delta h}{2}$$

$$\cos \alpha = \frac{D - \Delta h}{D} = 1 - \frac{\Delta h}{D}$$

Kde  $h_0$  je vstupní výška polotovaru,  $h_1$  je výstupní výška polotovaru,  $\Delta h$  je úběr.

Při daném průměru válce a zvoleném úběru můžeme určit úhel záběru  $\alpha$ . Při zvoleném úhlu záběru a daném úběru můžeme naopak určit průměr válce  $D$  pomocí vztahu:

$$D = \frac{\Delta h}{1 - \cos \alpha}$$

*Pozn.: Maximální záběrový úhel se liší podle typu válcovací stolice. U předvalkových tratí se pohybuje od 27 do 34°, u profilových tratí od 22 do 24°, při válcování plechů za tepla se válcuje s úhlem 15 až 22°, při válcování za studena je tento úhel velmi malý, a to v rozmezí 3 až 8°.*

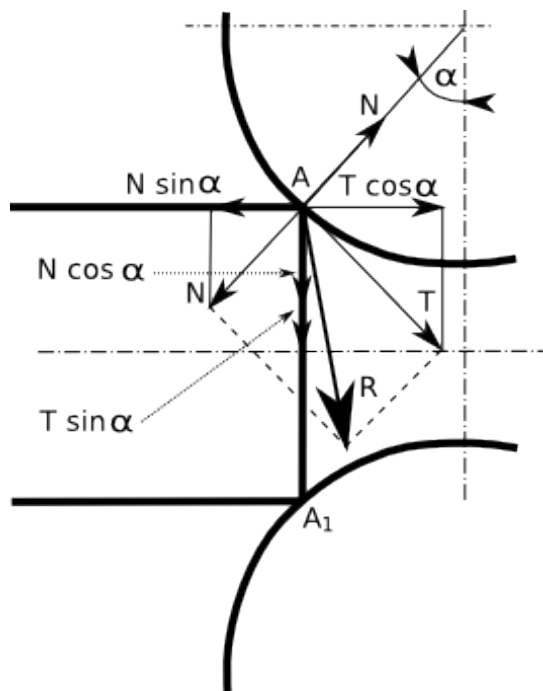
### Podmínka vtažení polotovaru mezi válce (podmínka záběru)

Materiál je do válců podáván určitou rychlostí. Při jeho dotyku s válci v bodu A, který reprezentuje styčnou kontaktní hranu předvalku a válce, vzniká tlaková síla  $\mathbf{N}$ , kolmá k povrchu válce. Proti ní působí podle principu akce a reakce na povrch stejně velká síla, ale opačného směru. Sílu, působící na povrch předvalku v bodě A, můžeme rozložit na dvě složky k sobě kolmé, svislou a vodorovnou. Vodorovná složka  $N \cdot \sin \alpha$  má tendenci válcovaný kus odstrčit od válce, svislá složka  $N \cdot \cos \alpha$  vede ke zmenšení výšky kusu (napomáhá úběru).

Vlivem tření provalku o otáčející se válce vzniká v bodě A třecí síla  $\mathbf{T}$ , kolmá na tlakovou sílu  $\mathbf{N}$ . Mezi třecí a tlakovou silou platí vztah

$$T = f \cdot N ,$$

kde  $f$  je součinitel tření mezi válcem a polotovarem. Třecí sílu  $\mathbf{T}$  můžeme opět rozložit na dvě složky, kdy vodorovná složka  $T \cdot \cos \alpha$  vtahuje polotovaz mezi válce a svislá složka  $T \cdot \sin \alpha$  vede ke zmenšení výšky polotovaru.



Obrázek 9-5 Podmínka vtažení polotovaru mezi válce

**U sil působících ve vodorovném směru mohou nastat tři případy:**

- 1)  $N \cdot \sin \alpha > T \cdot \cos \alpha$  ..... provalek nebude uchopen válci

2)  $N \cdot \sin \alpha = T \cdot \cos \alpha$  ..... mezní případ (provalek může a nemusí být vtažen mezi válce)

3)  $N \cdot \sin \alpha < T \cdot \cos \alpha$  ..... provalek bude vtažen mezi válce.

Úpravou nerovnosti  $N \cdot \sin \alpha < T \cdot \cos \alpha$

dostaneme :

$$\frac{T}{N} > \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$$

Výraz  $\frac{T}{N}$  lze nahradit hodnotou  $f$  ( $T = f \cdot N$ )

A odtud:

$$f > \operatorname{tg} \alpha$$

Definice podmínky záběru:

**Provalek může být vtažen mezi válce jen tehdy, je-li součinitel tření mezi válcem a provalkem větší než tangenta úhlu záběru.**

Při grafickém rozboru podmínky záběru dojde ke vtažení polotovaru mezi válce tehdy, pokud výslednice sil  $N$  a  $T$  (označená písmenem  $R$  v obr.9-5), směřuje mezi válce.

Součinitel tření je ovlivněn:

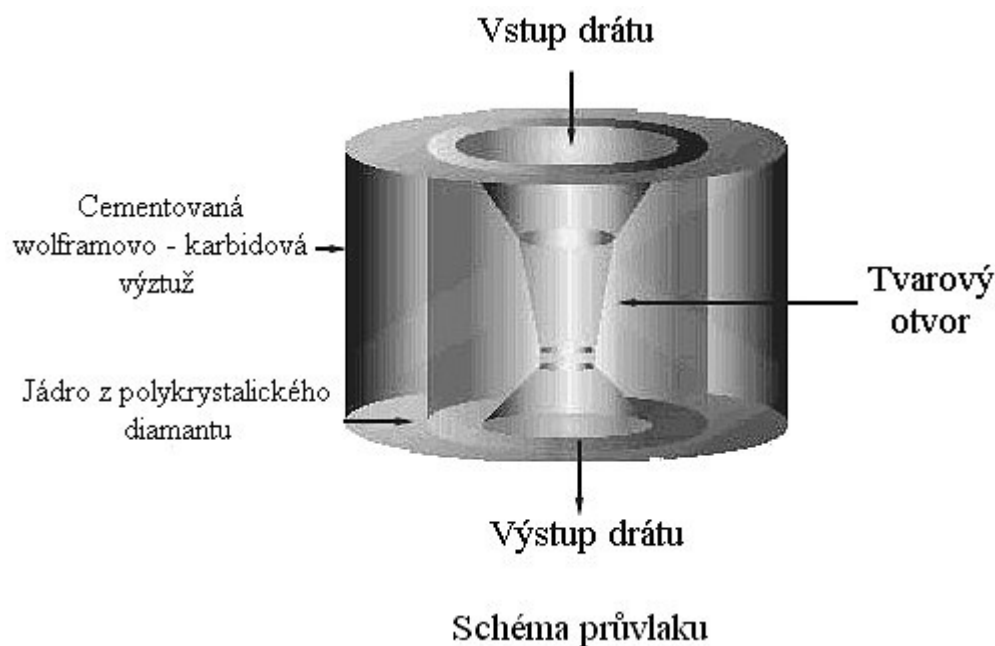
- 1) *přímo úměrně:*
  - a) materiálem válců a drsností jejich povrchu (umělé zdrsnění válců na blokových tratích)
- 2) *nepřímo úměrně:*
  - a) teplotou povrchu a chemickým složením provalku
  - b) obvodovou rychlostí válců

*Závěr:* Úběr (a tím produktivnost procesu) může být větší, čím budou válce menšího průměru a čím budou drsnější. Válce malého průměru však lze používat s ohledem na tuhost pouze při menších šířkách válcovaného materiálu (jinak je nutno používat válce opěrné), drsný povrch válců není vhodný pro dokončovací operace, protože by se tím porušil povrch vývalku.

## 10. TAŽENÍ DRÁTŮ, PROFILŮ A TRUB

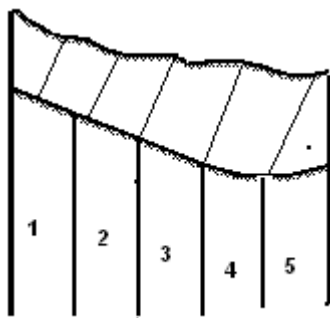
### 10.1. Tažení drátu

Tažení je protahování polotovaru otvorem průvlastku (obr.10-1), při kterém se zmenšuje příčný průřez a zvětšuje délka za současné změny mechanických vlastností (zvýšení meze pevnosti a meze kluzu). Dosahuje se přesných rozměrů a tvarů, zlepšuje se jakost povrchu (únavové vlastnosti). Nástroj je nepohyblivý, celková deformace se provádí postupně v několika za sebou jdoucích průvlastcích (10-20 průvlastců). Provádí se za studena. Pokud je vyčerpána plasticita a není ještě dosaženo požadovaného rozměru (průměru taženého drátu), musí se provést mezioperační žihání.



Obrázek 10-1 Schema průvlastku

Geometrie průvlastku, jehož pracovní část je vyrobena ze slinutých karbidů (tvrdokovu) nebo syntetického diamantu, je na obr. 10-2. Při tažení je nutno zajistit dostatečně účinné **mazání**, kdy mazivo musí snižovat součinitel tření, oddělovat polotovar a průvlastek, odvádět teplo a zajišťovat hladký povrch. V mazacím kuželi dochází k náběru maziva na povrch taženého polotovaru (drátu). Vlastní deformace probíhá v tažném kuželi, charakterizovaném tažným úhlem  $\alpha$  (8-16°), kalibrační kužel zajišťuje přesnost rozměrů, snížení vnitřních pnutí po tažení a dostatečnou životnost průvlastku.



**Obrázek 10-2** Pásma v průvlaku: 1 – vstupní kužel (zaváděcí), 2 – mazací kužel, 3 – tažný kužel, 4 - kalibrační kužel, 5 - výstupní kužel

Deformace v jednom průvlaku ( dílčí úběr) je relativně malá a činí 15 – 25% vstupního průřezu. Při dobře zvolené technologii lze však bez mezižhání dosáhnout celkové deformace ( celkového úběru  $U_c$ ) na úrovni 90-95% vzhledem ke vstupnímu průřezu, takže je možné psát:

$$\frac{S_p - S_k}{S_p} = U_c = 0,95$$

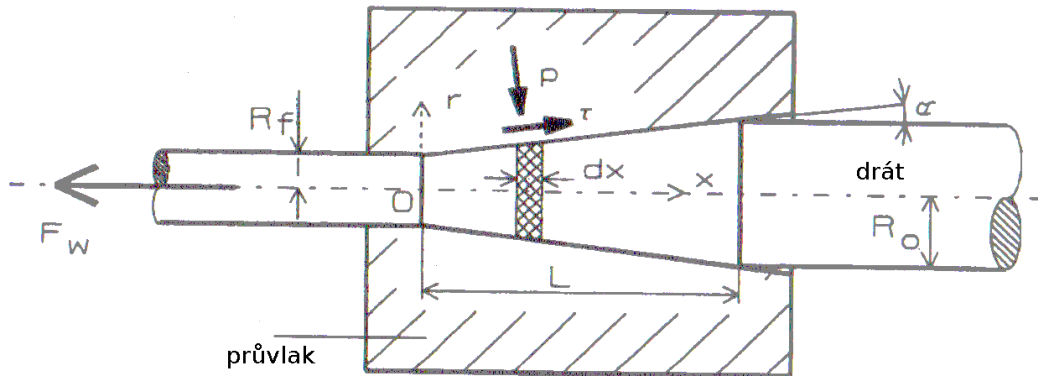
kde  $S_p$  je počáteční průřez taženého drátu a  $S_k$  je konečný průřez taženého drátu. Po úpravě:

$$\frac{D_p^2 - D_k^2}{D_p^2} = U_c = 0,95$$

kde  $D_p$  a  $D_k$  jsou vstupní a výstupní průměry drátu. Pokud vyjádříme celkový úběr pomocí logaritmické (skutečné) deformace, potom dosahuje hodnoty až

$$\ln \frac{l_k}{l_p} = \ln \frac{D_p^2}{D_k^2} \approx 3$$

kde  $l_k$  a  $l_p$  vyjadřují konečnou a počáteční (jednotkovou) délku drátu. Tuto značnou deformaci bez mezižhání umožňuje stav napjatosti v průvlaku, kdy k redukci průměru napomáhá značný radiální tlak, vznikající rozkladem sil v kuželové části průvlaku (obr.10-3). Tomu odpovídá mechanické schéma, uvedené na obr. 3-6 (str.21): převládajícím napětovým stavem je kombinace dvou tlakových a jednoho tahového napětí a jemu odpovídající schéma deformací (tahové). Pro tento proces je charakteristická rovnost hlavních tlakových napětí a hlavních tlakových deformací ( $\sigma_2=\sigma_3, \epsilon_2=\epsilon_3$ )



Obrázek 10-3 Schema tažení drátu:  $R_0$  je počáteční ( vstupní) poloměr drátu,  $R_f$  je výstupní poloměr taženého drátu

Vstupním polotovarem je válcovaný drát nebo drát, zpracovaný předcházejícím tažením a tepelně zpracovaný, s dobrou kvalitou povrchu. Před tažením je nutno drát zbavit okují mořením a dále např. fosfatováním, kdy se povrch drátu pokryje jemně krystalickou vrstvou fosforečnanů.

*Pozn.: Mezi jednotlivými krystaly jsou mezery a póry, což je mimořádně příznivé pro zachycení maziva na povrchu. Fosfatizovaný povrch je schopný asi 13x lépe udržet olej ( mazivo ) než povrch holý!*

Při tažení následuje za každým průvlakem tzv. tažný buben, který je poháněn a vyvozuje hlavní deformační sílu, která je tahová. Tento způsob deformace je vhodný pouze pro dobře tvařitelné materiály s vhodnou strukturou ( nejčastěji oceli tř. 12 s perlitickou strukturou a obsahem uhlíku v rozsahu 0,5 až 0,8% ).

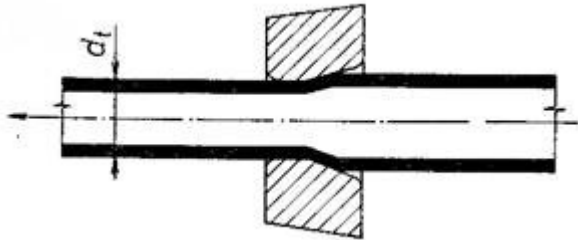
## 10.2. Tažení trubek a profilů

Pro tažení bezešvých *trubek a profilů*, které se na rozdíl od drátu táhnou v konečné délce, se používá přetržitý proces. Nejčastěji se provádí za studena a je určeno pro trubky malých a středních rozměrů (od 0,1 až do 250mm), tenkostěnných i tlustostěnných, s nároky na rozměrovou přesnost a jakost povrchu (lesklý a hladký vnější i vnitřní povrch). Někdy se tyto trubky označují jako trubky přesné. Polotovarem jsou trubky vyráběné válcováním zhruba do délky 4,5m s upraveným koncem pro prostrčení průvlakem.

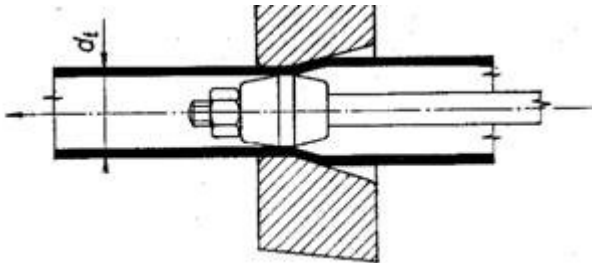
Základní způsoby tažení trubek jsou tyto (jednotlivé způsoby tažení se rozlišují podle toho, jak se vymezuje vnitřní průměr trubek během procesu tažení, protože vnější průměr trubky je vždy vymezen průměrem průvlaku):

- průvlečné tažení, kdy tažnou sílu přenáší trubka, vnitřní průměr ani tloušťka stěny není vymezena žádným nástrojem (obr.10-4)
- tažení na uchyceném trnu, kdy tažnou sílu přenáší trubka a trn je uchycen na trnové tyči (obr. 10-5)
- tažení na volném trnu, kdy tažnou sílu přenáší trubka, trn musí mít takový kuželovitý tvar, aby nedošlo buď k vytlačení trnu a nebo ke vtažení dopředu(obr. 10-6)

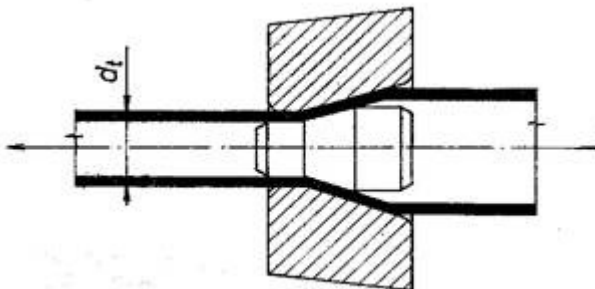
- d) tažení na tyči, kdy tažnou sílu přenáší tyč, následuje rozválcování aby šla tyč vytáhnout – není zde přesnost rozměrů, pro malé průměry trubek se táhne na struně(obr.10-7)
- e) profily nepravidelných tvarů se táhnou pomocí vícedílných průvleků sestavených v upevňovacím rámu a mají mnohem přesnější rozměry, než profily válcované. Některé z nich jsou určeny pro speciální strojírenskou výrobu jako např. pro vložky zámků.



Obrázek 10-4 Průvlečné tažení

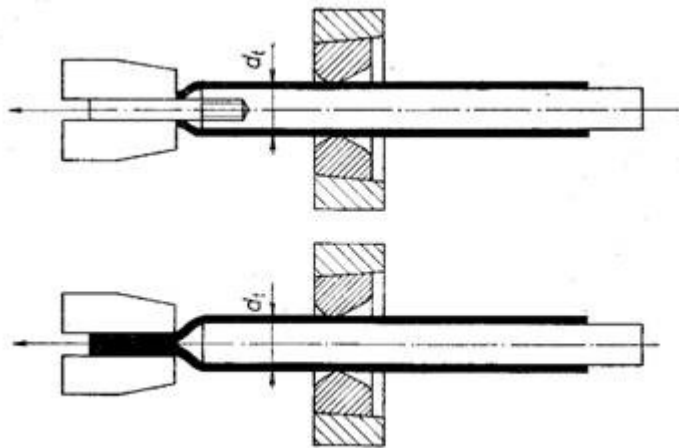


Obrázek 10-5 Tažení na uchyceném trnu



Obrázek 10-6 Tažení trubek na volném trnu





Obrázek 10-7 Tažení trubek na tyči

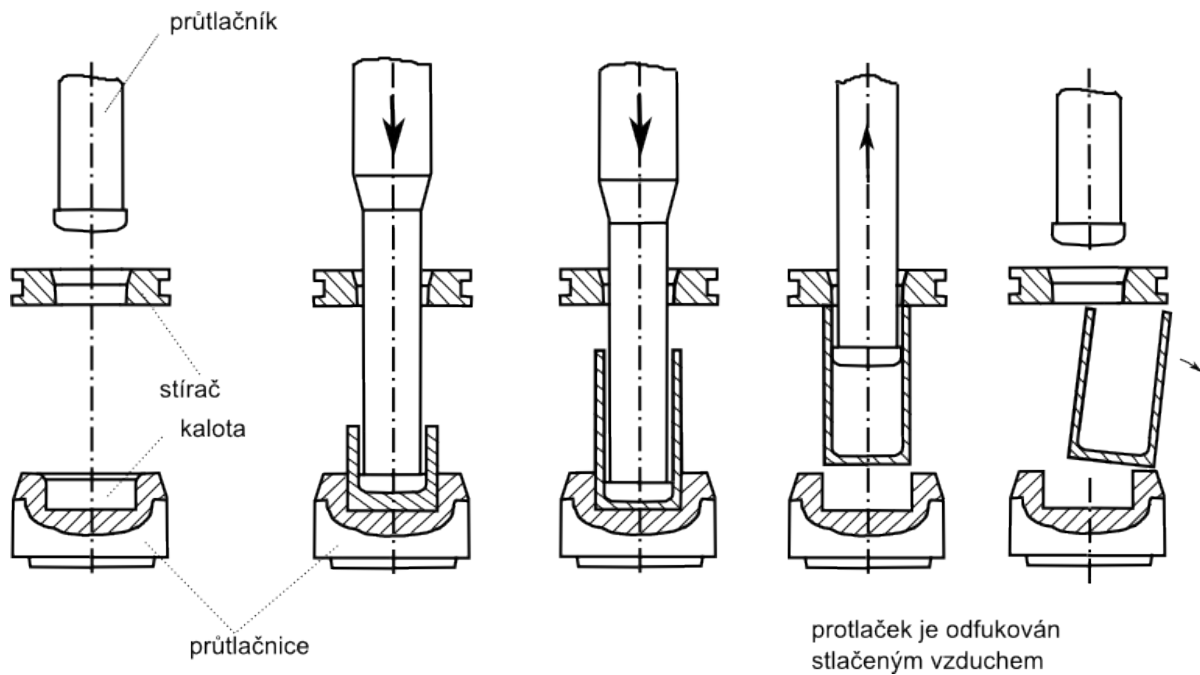
## 11. PROTLAČOVÁNÍ

Protlačování je technologie, kterou můžeme provádět

a) za tepla

b) za studena, kdy získáváme protlaček přesného tvaru s minimálními přídávky na opracování s ovlivněním mechanických vlastností (zpevnění).

Při protlačování se materiál deformuje průchodem přes pevnou průtlačnici vlivem síly, vyvolané pohybujícím se nástrojem – průtlačníkem (obr.11 -1).



Obrázek 11-1 Princip technologie protlačování

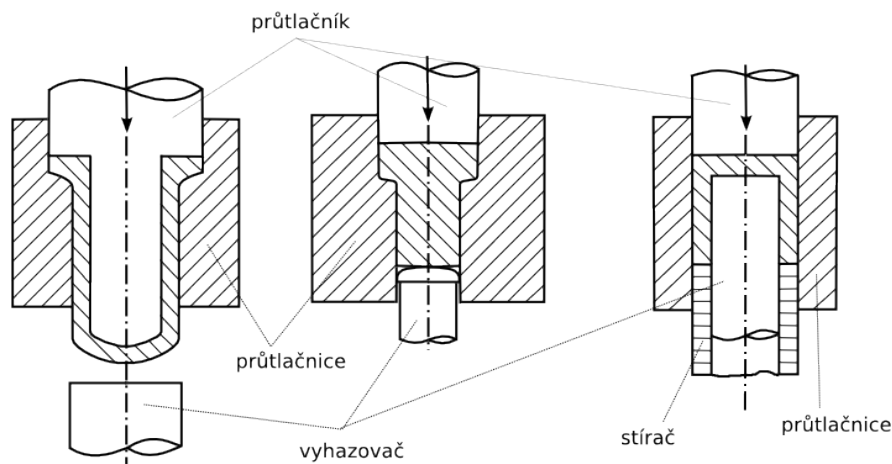
Napjatost v přetvářeném elementu materiálu je trojosá, všestranné tlaková. Tvářený materiál se přemísťuje a jeho směr pohybu je určen konstrukcí nástroje – protlačovadla. Výrobek se nazývá protlaček.

Tuto technologii je možno dělit do dvou skupin. První se týká výroby finálních výrobků, druhá výroby polotovarů (trubek, tyčí, profilů apod.). Tímto způsobem se vyrábějí např. nábojnice, svíčky do motorů, a další.

### 11.1 Způsoby protlačování

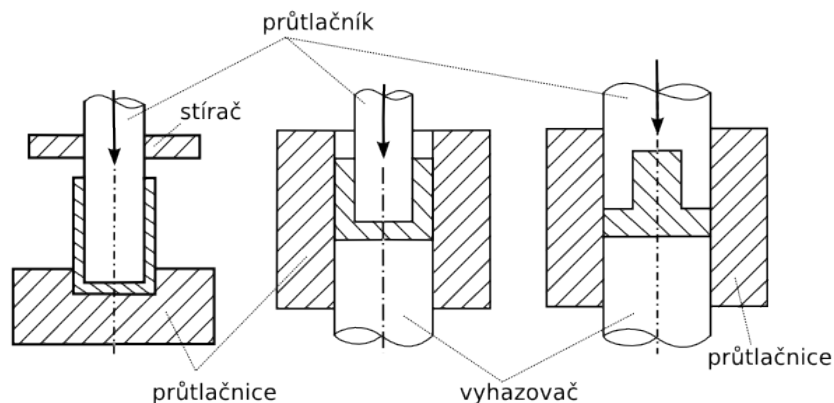
Protlačování – polotovar se tváří pod vlivem tlakových napětí v průtlačnici. Umožňuje tváření materiálů, které se vyznačují nízkou tvařitelností. Dělí se na :

- a) Dopředné protlačování – při němž se materiál pohybuje ve směru pohybu průtlačníku (obr.11-2). Používá se při tváření čepů, šroubů, pouzder, apod., tedy výrobků, u kterých není konstantní průřez



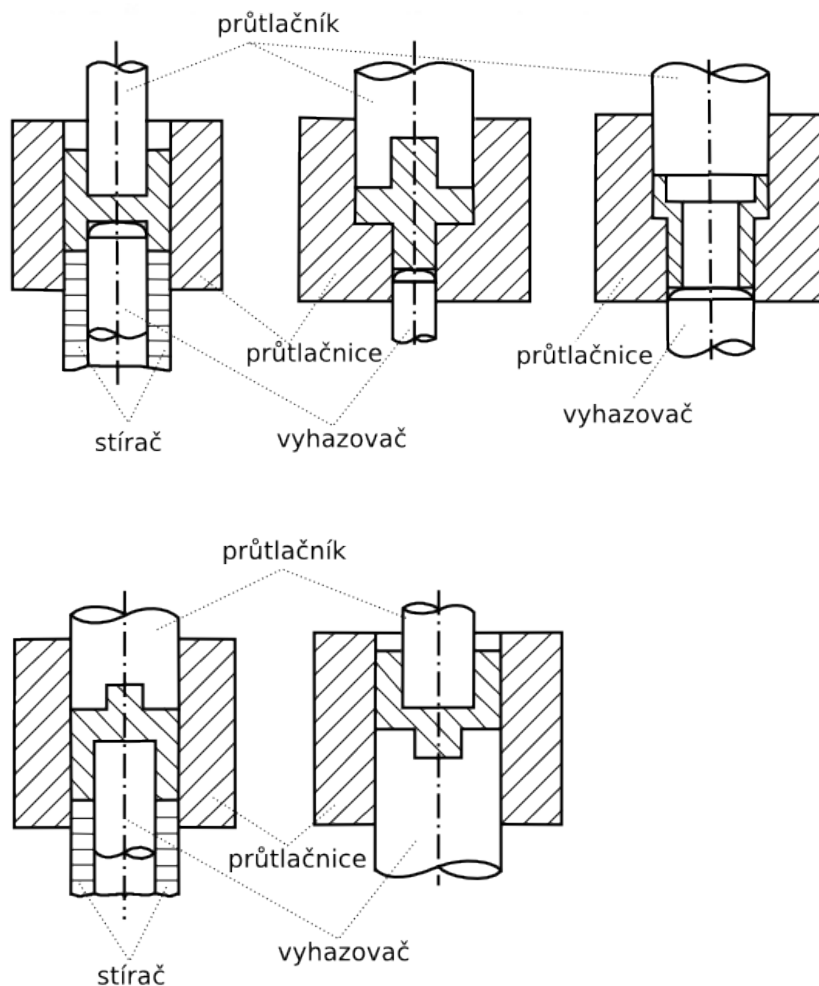
Obrázek 11-2 Princip dopředného protlačování

- b) Zpětné protlačování, při němž se materiál pohybuje proti směru pohybu průtlačníku (obr.11-3). Používá se k výrobě dutých protlačků i se žebry, kdy tloušťka stěny je v porovnání s průměrem velmi malá anebo naopak



Obrázek 11-3 Princip zpětného protlačování (1,3 – průtlačnice, 2,4 – průtlačník, a – průtlačník, b – stírač, c – průtlačnice, d – vyhazovač)

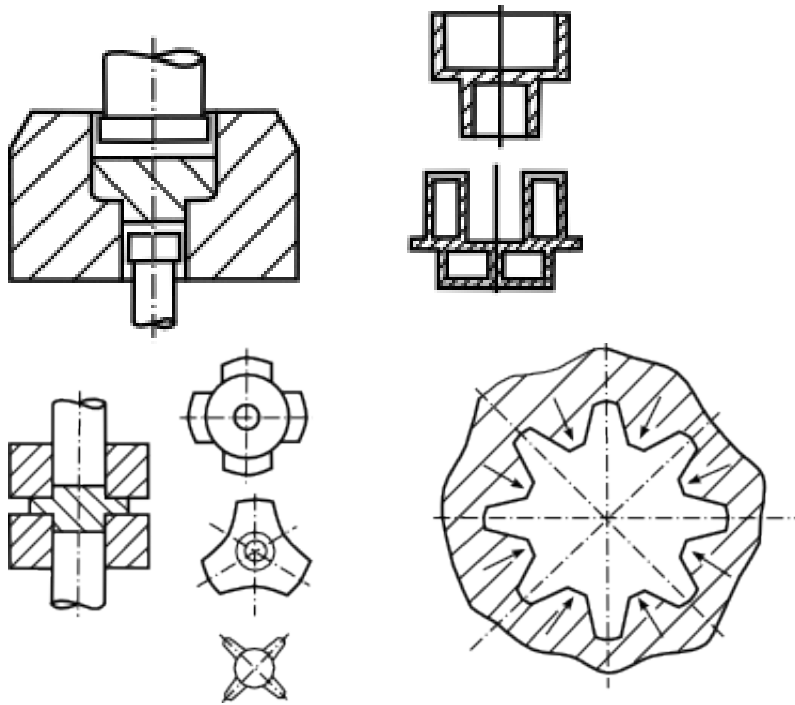
- c) Sdružené (kombinované) protlačování – materiál se přemísťuje současně ve směru i proti směru pohybu průtlačníku (obr.11-4).



Obrázek 11-4 Princip kombinovaného (sruženého) protlačování

- d) Stranové a radiální protlačování(obr.11-5)– materiál se pohybuje kolmo na směr pohybu průtlačníku

Slouží k výrobě průtlačků s vnějším i vnitřním oboustranným osazením. Radiálním protlačováním rozumíme tváření, při kterém se materiál i části nástroje pohybují v radiálním směru vzhledem k ose materiálu.

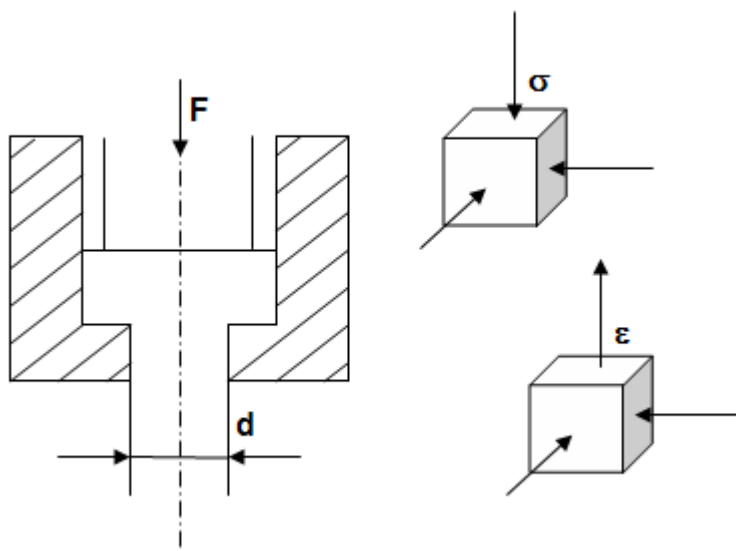


Obrázek 11-5 Princip stranového (nahoře) a radiálního protlačování

e) Vtlačování - pro tváření funkčních dutin nástrojů

### 11.2 Mechanické schéma, síla a práce při protlačování

Při protlačování je materiál zatížen trojosým tlakem, kdy všechna tři hlavní napětí jsou tlaková. Napěťové a deformační schéma je na obr. 11-6.



Obrázek 11-6 Schema napjatosti a deformace při protlačování

*Pozn :Pozor! Hlavní tlaková napětí nejsou stejně velká – v případě stejně velkých tlakových napětí by se jednalo o namáhání hydrostatickým tlakem, a za tohoto způsobu namáhání by plastická deformace nebyla možná. Odpor proti elastické deformaci by teoreticky rostl do nekonečných hodnot.*

Na protlačování za studena jsou potřebné velké deformační síly, které závisí na chemickém složení materiálu, přípravě a tepelném zpracování, mazání, geometrii nástroje (čím větší, tím větší síla), velikosti redukce (čím větší, tím větší síla), na tloušťce stěny (čím menší, tím větší síla), druhu stroje. Protlačováním lze díky tlakové napjatosti tvářet i materiály, které jsou obtížněji tvařitelné a nelze je zpracovat např. tažením. Potřebné síly a práce se vypočítají složitě a často se využívá empirických vztahů nebo numerických výpočtů. Limitujícím faktorem pro protlačovací stroje je velikost síly, potřebné pro deformaci pod vlivem tlaku, kdy deformační odpor materiálu obzvláště při protlačování za studena roste. Materiály s nízkou přetvárnou pevností, hliník a jeho slitiny, se dají protlačovat na jednu operaci. Oceli a ostatní kovy se protlačují na více operací. Někdy je potřeba provádět i mezioperační žíhání (nejdříve rekrystalizační a potom na měkko).

Dalším z rozhodujících faktorů při procesu protlačování je tření, které výrazně ovlivňuje vlastní proces, kvalitu výrobku a ekonomii výroby, a to zejména u ocelí – musí se provádět vhodná povrchová úprava, jinak dochází k suchému tření a zadření nástroje. Povrchová úprava se skládá:

- a) odstranění povrchových vad (otryskávání, broušení, moření u Al, ...),
- b) z chemického a mechanického čištění (omývání, sušení, ...),
- c) z fosfátování (fosfátovaný povrch má vysokou přilnavost k výchozímu materiálu, kterým je nejčastěji kotouč nebo kotouč s otvorem, tzv. kalota, což umožňuje mazání povrchu materiálu v důsledku pórovitosti fosfátované vrstvy při velkých tlacích, čehož bylo prvně použito v 30 letech dvacátého století),
- d) z nanesení vrstvy maziva (např. ponořením do roztoku organického oleje a mýdla).

Velikost třecích sil dále závisí na drsnosti povrchu průtlačníku a průtlačnice a na jejich opotřebení v kritických místech.

## 12. DĚLENÍ MATERIÁLŮ STŘÍHÁNÍM A LÁMÁNÍM – PLOŠNÉ TVÁŘENÍ

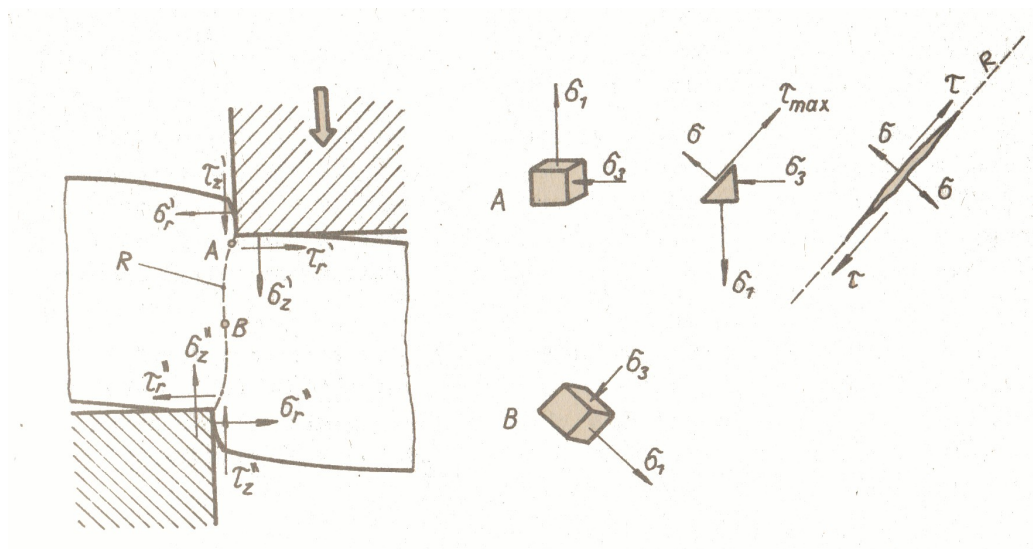
Dělení materiálu se v praxi provádí nejčastěji následujícími způsoby:

1. řezání na pilách
2. upichování na soustruhu
3. lámání na speciálních mechanických lámačích
4. sekání pod bucharem nebo lisem
5. stříhání nůžkami

Dělení materiálu stříháním se provádí na nůžkách s rovnými noži – rovnoběžnými nebo skloněnými – nebo na kotoučových nůžkách.

Podstata stříhání spočívá v oddělení materiálů smykovým působením dvou břitů s předchozí pružnou a plastickou deformací místa stříhu. Tento způsob dělení je vhodný především pro tvárné měkké materiály.

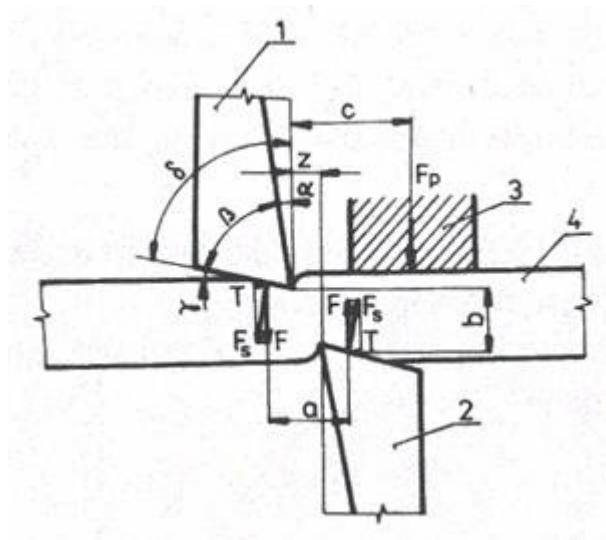
Rozdělení stříhání: přestřihování, nastřihování, vystřihování, ostřihování, přistřihování, přestřihování atd.



Obrázek 12-1 Napětí v místě stříhu, A - B schéma hlavních napětí v bodech A a B, R - plocha stříhu

Princip stříhání: Na počátku stříhání je materiál mezi pohybujícími se břity rámců natahován a vytlačován do stran, nejprve u břitů, postupně je zasahována oblast uvnitř. Podélné vrstvy se prodlužují a při posuvu odstřihované části se prohýbají a naklánějí. Probíhá deformace vnějšího obrysu materiálu a tloušťka plechu se v místě stříhu zmenšuje.

Působení břitů vyvolává vertikálně působící tlakové normálové napětí  $\sigma_z$  a horizontálně působící tahové normálové napětí  $\sigma_r$  (obr.12-1). Z teorie plasticity vyplývá, že k plastické deformaci a následnému tvárnému porušení materiálu dochází vlivem smykového napětí, a to ve směru, ve kterém dosahuje toto smykové napětí největších hodnot. Maximální smykové napětí působí ve směru, který svírá se směry hlavních normálových napětí ( v našem případě  $\sigma_z$  a  $\sigma_r$  ) úhel  $45^\circ$ . Pod tímto úhlem se na počátku stříhání začíná šířit trhlinka. S postupujícím stříháním dochází ke změně směru hlavních napětí, mění se i směr maximálního smykového napětí a směr šíření trhliny se stáčí do vertikálního směru. Důsledkem je esovitý tvar střižné čáry R- viz. obr. 12-1.



Obrázek 12-2 Síly při stříhání rovnoběžnými noži

Při skutečném procesu stříhání nepůsobí střižné síly  $F_c$  ideálně v jedné rovině, mezi noži musí být určitá mezera  $z$  (obr.12-2). Síla nepůsobí na hraně nožů, ale ve středu „střižné plošky“.

Síla  $F_c$ , kterou působí nůž na materiál, se dá rozložit na složky  $F_1$  a  $F_2$ .

Tyto složky vytvářejí momenty:  $M_1 = F_1 \cdot l$  a  $M_2 = F_2 \cdot a$

kde  $l$  je okamžitá vzdálenost působišť sil  $F_1$  ve svislém směru, a je vzdálenost působišť sil v horizontálním směru. Moment  $M_1$  způsobuje natáčení materiálu v průběhu stříhání. Stříhaný materiál se bude natáčet tak dlouho, dokud se nedosáhne rovnosti momentů

$$M_1 = M_2 \rightarrow F_1 \cdot l = F_2 \cdot a$$

Aby vlivem momentu  $M_1$  nedošlo k zaklínění materiálu mezi nože a zabránilo se natáčení materiálu, je třeba použít přidržovač.

Sílu přidržovače  $F_p$  lze určit ze vztahu :

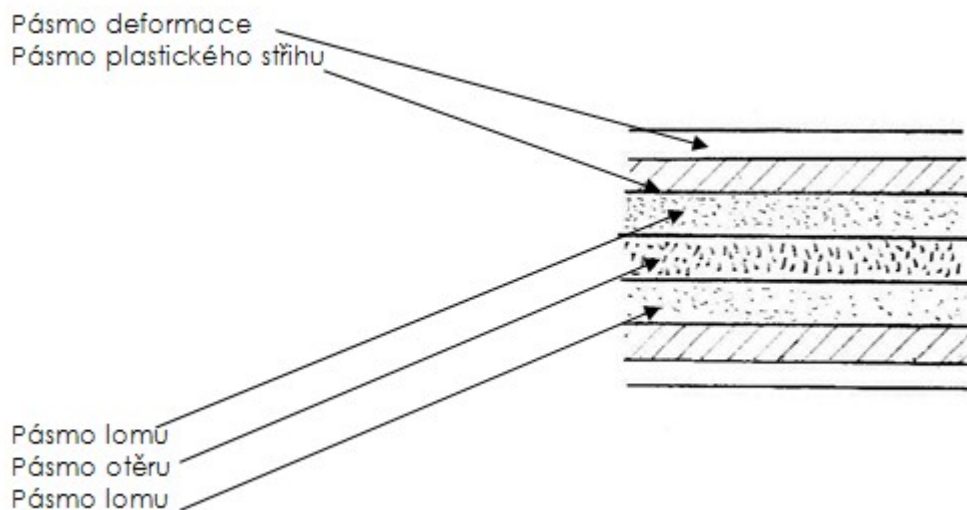
$$F_p \cdot c = F_1 \cdot l$$

a dále

$$F_p = \frac{F_1 \cdot l}{c}$$

Moment  $M_2$ , vyvolaný působením síly  $F_2$  se snaží nože od sebe oddálit. Způsobuje tedy odtlačení nožů a jejich ohyb, který může vést k ulomení, pokud nejsou dostatečně dimenzované.

Vůle mezi noži z ( obr.12-2 ) musí mít optimální velikost tak, aby trhliny, šířící se od obou protilehlých břitů, se ve středové oblasti spojily bez vzniku nežádoucího otřepu. Pokud je vůle mezi noži příliš velká, anebo naopak příliš malá, trhliny se v centrální oblasti nespojí a dochází k dolomení materiálu za vzniku nekvalitní střížné plochy.



**Obrázek 12-3** Pohled na střížnou plochu

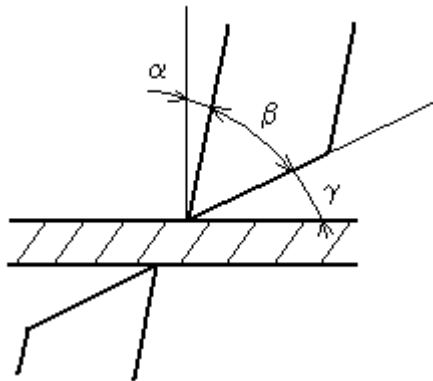
Na střížné ploše můžeme pozorovat několik pásem (obr.12-3):

- pásmo deformace, které odpovídá původnímu plasticky zdeformovanému povrchu
- pásmo plastického stříhu – v této oblasti je oddělení materiálu důsledkem přímého působení nožů na materiál
- pásmo lomu – po nastřížení materiálu noži do určité hloubky, typické pro daný materiál a geometrii nožů, dochází k samovolnému dolomení stříhaného materiálu, již bez přímého působení nožů.
- Pásmo otěru – toto pásmo je součástí pásma lomu a dochází zde k usmyknutí střížné plochy a vzájemnému otěru oddělených částí.



Při stříhání neprocházejí nože celým průřezem stříhaného materiálu, pronikají pouze do kritické hloubky a dokončení stříhu dále probíhá samovolně. Při stříhání za studena vlivem deformace dochází ke zpevnění střižné plochy, což se může projevit při následujícím zpracování tažením nebo ohýbáním.

Geometrie nože je definována úhlem hřbetu  $\alpha$  (max 3°), úhlem břitu  $\beta$  (75 – 85°) a úhlem čela  $\gamma$  (obr. 12-4)



Obrázek 12-4 Geometrie střižného nože

### 12.1 Výpočet střižné síly a střižné práce při stříhání na nůžkách s rovnoběžnými noži.

Při stříhání materiálu o tloušťce  $t$  a šířce  $l$  (obr.12-5) je možné ideální střižnou sílu  $F_{sid}$  určit ze vztahu

$$F_{sid} = S \cdot \tau_{ps} = l \cdot t \cdot \tau_{ps},$$

kde  $\tau_{ps}$  je mez pevnosti ve smyku (stříhu) a pro ocel odpovídá hodnotě

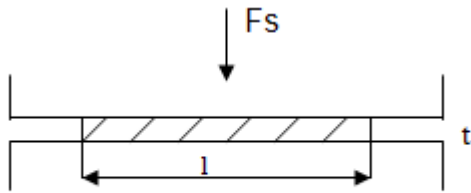
$$\tau_{ps} = (0,75 \div 0,85) R_m$$

$R_m$  je mez pevnosti v tahu. Pro ostatní materiály je možné mez pevnosti ve smyku zjistit podle vztahů, uvedených v tabulkách (tab.12-1).

Při výpočtu skutečné střižné síly je nutno vzít v úvahu vliv otupení břitu, velikost vůle mezi noži, tloušťku a jakost povrchu materiálu atd., takže ideální střižnou sílu musíme vynásobit koeficientem  $K_1$ :

$$F_S = S \cdot \tau_{ps} \cdot K_1.$$

Velikost koeficientu  $K_1$  se v praxi pohybuje v rozmezí od 1,2 do 1,5.

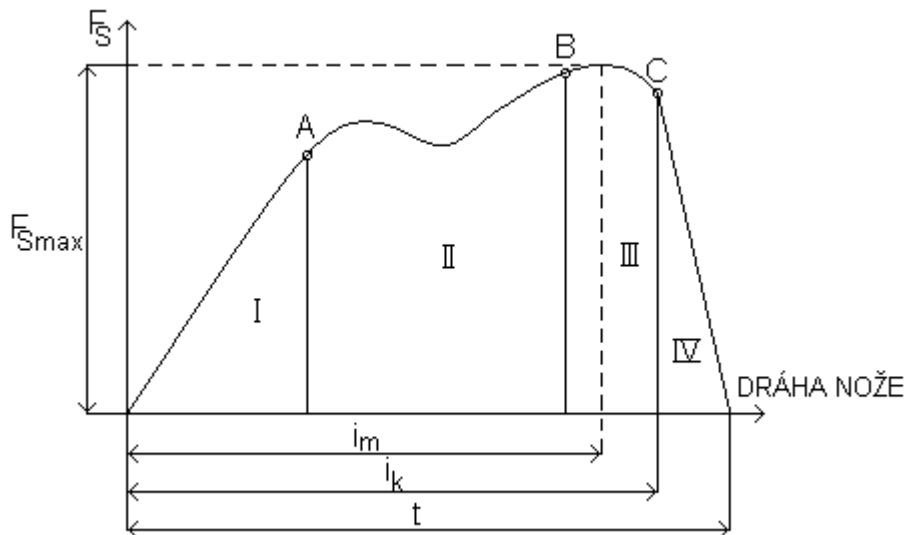


Obrázek 12-5 Schéma stříhání rovnoběžnými noži

Materiál	Vzorec pro výpočet
MOSAZ	$\tau_s = 167,7 + 0,285Rm$
DURAL	$\tau_s = 169,65 + 0,23Rm$
ZINEK	$\tau_s = 6,86 + 0,75Rm$
Al, Sn, Cu, Ni	$\tau_s = 0,75Rm$

Tabulka 12-1 Vztah mezi mezi pevností ve stříhu a v tahu pro vybrané materiály

Závislost střížné síly na dráze nože je uvedena na obr. 12-6.



Obrázek 12-6 Závislost střížné síly na dráze nože při stříhání rovnoběžnými noži

Při stříhání nejprve dochází k pružné deformaci materiálu – oblast I na obr.12-6, kdy síla, působící na nože, lineárně roste. Po překročení meze kluzu stříhaného materiálu dochází k plastické deformaci povrchu materiálu, která odpovídá pásmu II. Pásmo III je pásmem plastického stříhu, následuje

pásmo IV – dolomení materiálu. Hloubka  $i_m$  je tzv. poměrná hloubka vniku nože při maximální síle a  $i_k$  je poměrná hloubka vniku nože při přestřižení. Tloušťka materiálu  $t$  je větší než dráha nože. Při stříhání měkkých materiálů je maximální střížná síla malá a nože pronikají hluboko, při stříhání tvrdých materiálů je střížná síla vysoká a nože pronikají do materiálu méně.

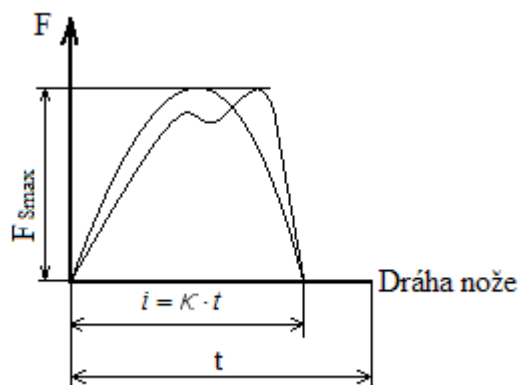
Při výpočtu střížné práce, která je dána plochou pod křivkou závislosti střížné síly na dráze nože ( obr. 12-6), nahrazujeme skutečný průběh idealizovanou křivkou – polovinou elipsy (obr.12-7). Hloubku vniknutí nože do materiálu vyjádříme pomocí součinitele  $\chi$ , který závisí na vlastnostech stříhaného materiálu a jeho hodnoty lze nalézt v tabulkách. Obecně platí, že čím tvrdší je stříhaný materiál, tím menší je součinitel  $\chi$  (součinitel zaplnění diagramu).

Pozn.: Tloušťka materiálu je vždy větší než dráha nože.

Střížnou práci budeme počítat jako plochu pod polovinou elipsy o poloosách  $F_s$  – a:

$$a = \frac{i}{2} = \frac{\kappa \cdot t}{2}.$$

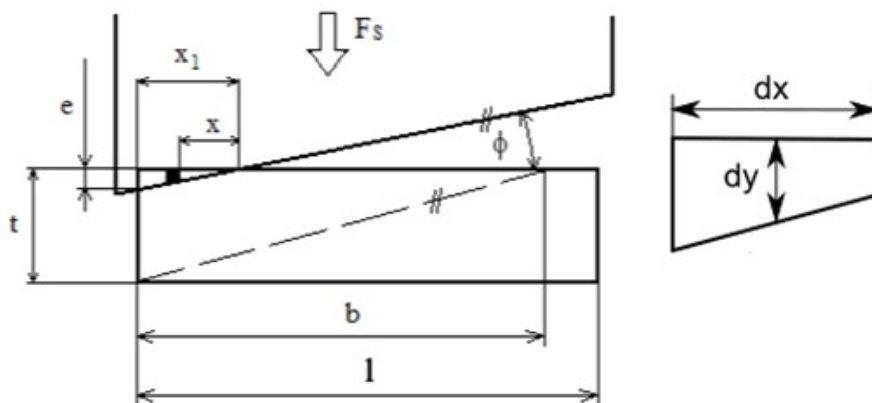
$$A = \frac{\pi}{2} \cdot F_s \cdot \frac{\kappa \cdot t}{2} = \frac{\pi}{2} \cdot S \cdot \tau_{ps} \cdot k_1 \cdot \frac{\kappa \cdot t}{2} = \frac{\pi}{4} \cdot S \cdot \tau_{ps} \cdot \kappa \cdot t \cdot k_1$$



Obrázek 12-7 Skutečný a ideální průběh střížné síly v závislosti na dráze nože.

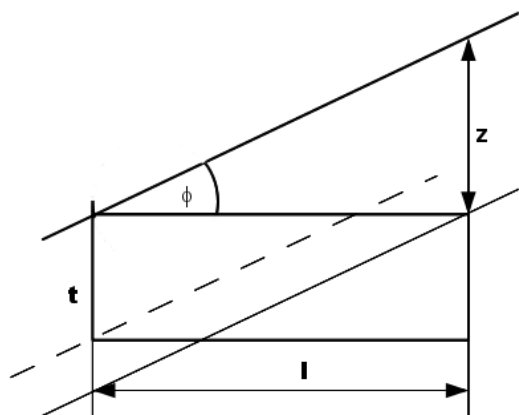
## 12.2 Výpočet střížné síly a střížné práce při stříhání na nůžkách se šikmými noži

Stříhání šikmými, skloněnými noži, které při stříhání svírají určitý úhel, je výhodné proto, že se při tomto způsobu zmenší celková potřebná střížná síla oproti stříhání na rovnoběžných nožích. Materiál se stříhá postupně. Pro velikost střížné síly bude rozhodující velikost střížné hrany a tloušťky - plochy trojúhelníka.



Obrázek 12-8 Stříhání skloněnými, šikmými noži

Výpočet střížné práce při stříhání šikmými noži



Obrázek 12-9 Dráha nože při stříhání šikmými noži

Střížnou sílu obecně vypočteme ze vztahu

$$dF = dx \cdot dy \cdot \tau_{ps} ,$$

kde  $dx \cdot dy$  je plocha vytknutého elementu a  $\tau_{ps}$  je mez pevnosti ve stříhu (smyku)

Integrací v mezích od nuly do hodnoty b (obr.12-8) a s použitím vztahu

$$\frac{dy}{x} = \frac{t}{b} = \operatorname{tg}\phi ,$$

kde  $t$  je tloušťka stříhaného materiálu a  $\varphi$  je úhel sklonu horního nože, získáme vztah pro výpočet ideální síly pro stříhání:

$$F_{Sid} = \int_0^b dx \cdot dy \cdot \tau_{ps} = \int_0^b \frac{t}{b} \cdot x \cdot \tau_{ps} \cdot dx = \frac{t}{b} \cdot \tau_{ps} \cdot \left[ \frac{x^2}{2} \right]_0^b = \frac{t}{b} \cdot \tau_{ps} \cdot \frac{b^2}{2} = \underline{\underline{\frac{1}{2} t \cdot b \cdot \tau_{ps}}}$$

Po dosazení za

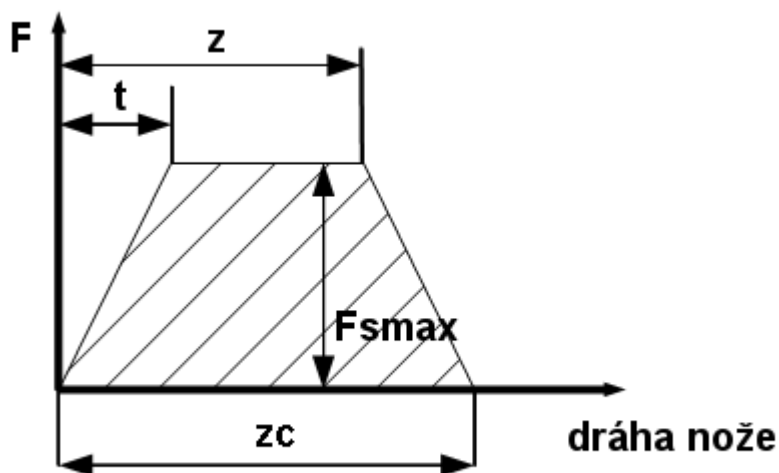
$$b = \frac{t}{\operatorname{tg}\varphi}$$

a s ohledem na technologické faktory – vliv tření, ohyb atd. , které zahrneme do výpočtu vynásobením ideální síly koeficientem  $K_2$  , získáme vztah pro výpočet skutečné střížné síly pro stříhání šikmými noži ve tvaru:

$$F_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{t^2}{\operatorname{tg}\varphi} \cdot \tau_{ps} \cdot K_2$$

Pozn.: Úhel sklonu horního nože pro pákové nůžky se pohybuje v rozmezí  $\varphi = 7$  až  $12^\circ$  , pro strojní nůžky  $\varphi = 2$  až  $6^\circ$  .

#### Výpočet střížné práce při stříhání šikmými noži.



Obrázek 12-10 Schéma pro výpočet střížné práce při stříhání šikmými noži

Z obr.12-10 je možné vypočítat teoretickou hodnotu práce, potřebnou pro stříhání šikmými noži jako plochu obdélníku o stranách  $z$  a  $F_{smax}$  :

$$A = z \cdot F_{smax} ,$$

kde

$$z = l \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

a po dosazení

$$A = z \cdot F_s \max = l \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{t^2}{\operatorname{tg} \varphi} \cdot \tau_{ps} \cdot K_2 .$$

Za předpokladu, že práce, vykonaná při stříhání rovnoběžnými noži a šikmými noži při stříhání téhož polotovaru, musí být stejná, můžeme odvodit vztah mezi technologickými koeficienty  $K_1$  a  $K_2$  :

$$K_2 = \frac{\pi}{2} \cdot K_1 \cdot k$$

### **12.3 Stříhání ve stříhadlech a děrovadlech**

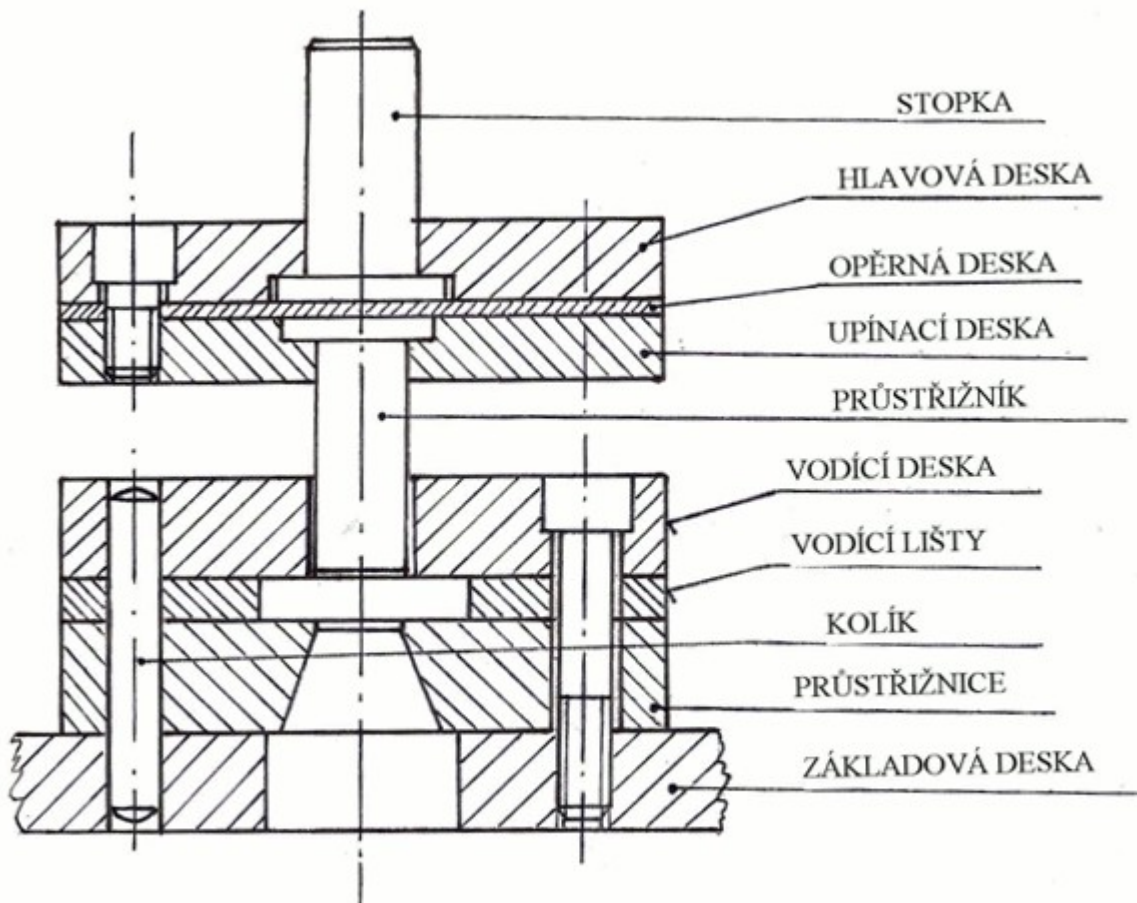
Nejrozšířenějším způsobem při zpracování plechu je stříhání ve stříhadlech a děrovadlech. Základními operacemi je děrování a vystřihování , kdy se z plechu získávají výstřižky pro další zpracování ( např. ohybem) anebo hotové součásti ( např. ozubená kola apod.). Schéma střížného nástroje je na obr. 12-11. Velikost střížné plochy při prostřihování vypočítáme vynásobením obvodu výstřižku a tloušťkou stříhaného plechu, pro případ kruhového výstřižku platí:

$$S = \pi \cdot D \cdot t$$

a pro střížnou sílu

$$F_s = S \cdot \tau_{ps} \cdot k$$

Kde koeficient  $k$  zahrnuje také sílu, potřebnou na setření výstřižku z obvodu střížníku .



Obrázek 12-11 Schema stříhacího nástroje

#### 12.4 Stříhání na kotoučových - kruhových nůžkách

Pro podélné stříhání dlouhých pásů se staví nůžky kotoučové, kruhové. Je to střížný nástroj s odvalujícími se noži. Použití kruhových nožů prodlužuje čas stříhu, ale snižuje rázy při stříhání. Sklon řezné hrany se mění od nejvyšší hodnoty v místě záběru do nuly.

**Kotoučové nůžky** dělíme podle počtu kotoučů na **jednokotoučové, dvukotoučové a vícekotoučové**:

**1) Jednokotoučové** se používají převážně v hutích k oboustrannému ostříhování dlouhých tabulí tlustých plechů. Dolní nože jsou pevné (hrana ostříhovacího stolu), horní pohyblivé.

**2) Dvukotoučové** – rozdělujeme podle vzájemné polohy nožů a stříhaného plechu:

a) kotouče o velkém průměru (pásové nůžky), osy rovnoběžné, pro rovné stříhy do tlouštěk 30mm

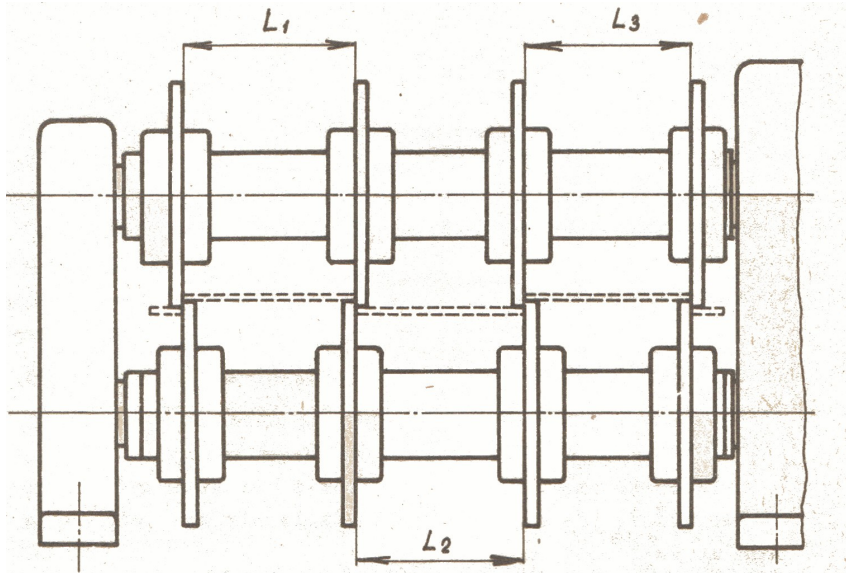
b) nože o velmi malých průměrech, osy rovnoběžné, stříhání na zakřivených čarách

c) okružní nůžky s jedním skloněným nožem (o cca 30 až 40°) do tlouštěk 30mm.

d) nůžky se šikmými oběma noži, tzv. křivkové pro stříhání silně zakřivených obrysů

3) **Vícekotoučové** – s více páry kotoučových nožů ( dělení tabulí na užší pásy-obr.12-12).

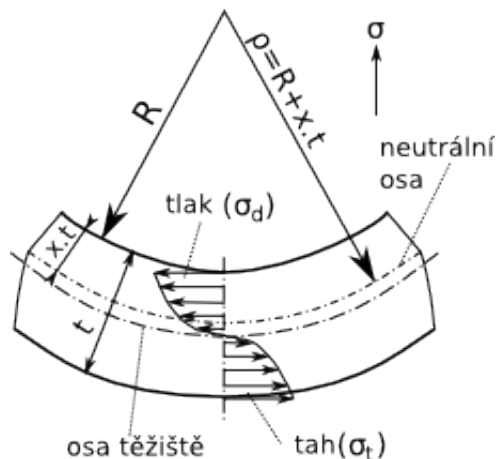
4) **Další typy** - nůžky na profily, stříhání na lisech



Obrázek 12-12 Uspořádání kotoučových nůžek při stříhání pásů

### 13. OHÝBÁNÍ A ROVNÁNÍ

Ohýbání je proces tváření, při kterém je materiál trvale deformován do různého úhlu ohybu s menším nebo větším zaoblením hran. Při ohýbání dochází k pružně plastické deformaci, která je způsobená momentem vnějších sil. Zasahuje poměrně malý objem polotovaru, v němž napětí a deformace mění výrazně svoji velikost i směr. Vrstvy (vlákna) kovu na vnitřní straně ohybu jsou v podélném směru stlačovány a zkracovány a ve směru příčném roztahovány. Vrstvy kovu na vnější straně ohybu se roztahují a prodlužují, v příčném směru stlačují. Mezi prodlouženými a zkrácenými vrstvami (vlákný) je vrstva neutrální, jejíž délka se během ohýbání nemění. Neutrální vrstva neprochází středem průřezu. Rozložení a velikost napětí v materiálu je uveden na obr. 13-1.

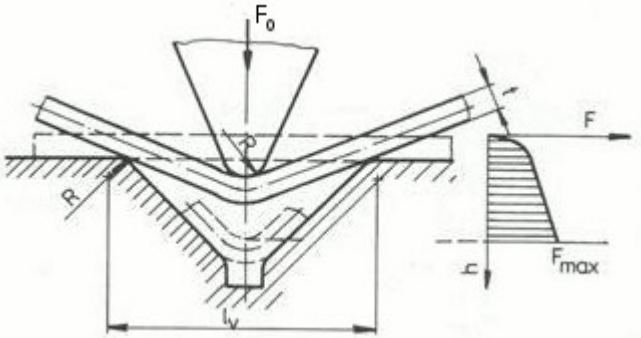


Obrázek 13-1 Rozložení napětí při ohýbání



### 13.1 Výpočet síly při ohybu do tvaru „V“

Ohýbaný výrobek se považuje za nosník o dvou podporách zatížený silou uprostřed obou podpor (obr.13-2)



Obrázek 13-2 Ohyb do tvaru V

Průřez materiálu je ve vzdálenosti x od podpory namáhán ohybovým momentem

$$M_0 = F_0 \cdot \frac{x}{2} ,$$

kde  $F_0$  je působící síla.

Vzroste-li napětí tak, že v krajních vláknech dosáhne napětí meze kluzu, začne trvalá deformace součásti. Tento stav nastane v místě maximálního momentu pod působišťem síly  $F_0$ , která dosáhne hodnoty

$$F_0 = \frac{4 \cdot W}{l_v} \cdot \sigma_k$$

kde  $W$  je průřezový modul ohybu,  $l_v$  je vzdálenost podpor (obr.13-2) a  $\sigma_k$  je mez kluzu materiálu.

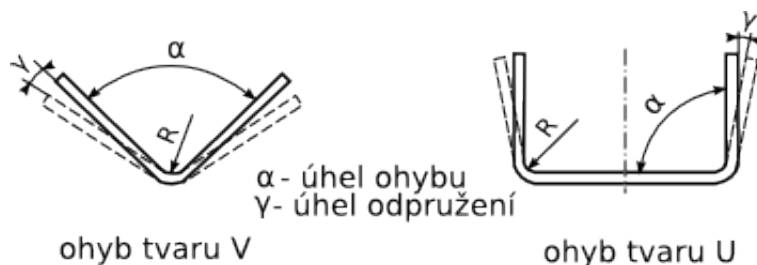
Další zvětšování síly  $F_0$  způsobuje rozšiřování trvale deformované oblasti jak do hloubky, tak směrem k podporám. V místě ohybu vykazuje průřez tři pásma:

- pásma pružných deformací, které je příčinou tzv. dopružování ohýbané součásti a nachází se kolem neutrální osy
- vnější pásmo s trvalým prodloužením
- vnitřní pásmo s trvalým spěchováním

Pominou-li vnější síly na deformované těleso, rozměry tělesa se částečně vrátí do původních, tj. těleso odpruží. Zatímco u dříve probraných technologií bylo odpružení zanedbatelné, má při ohýbání značný význam. Odpružení při ohybu se projevuje jako úhlová odchylka  $\gamma$ , jejíž význam roste s délkou ramen (obr. 13-3). Zpětné odpružení ohýbaných součástí je způsobeno vlivem pružné deformace materiálu kolem neutrální osy. Velikost úhlů odpružení závisí na:

- druhu materiálu
- tvaru ohýbané součásti
- tloušťce materiálu
- poloměru ohybu
- konečné velikosti ohýbané součásti a způsobu ohýbání.

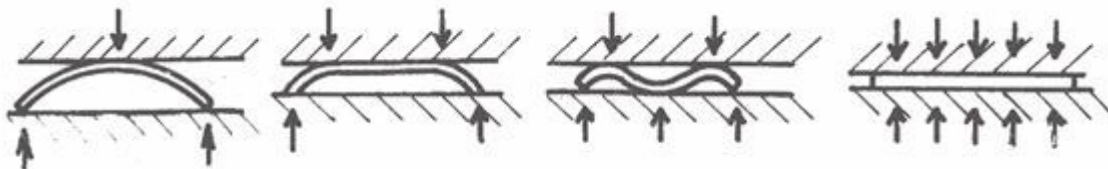
Bývá v rozsahu 3 až 15°.



Obrázek 13-3 Odpružení materiálu pro ohyb tvaru V a U

### 13.2 Rovnání

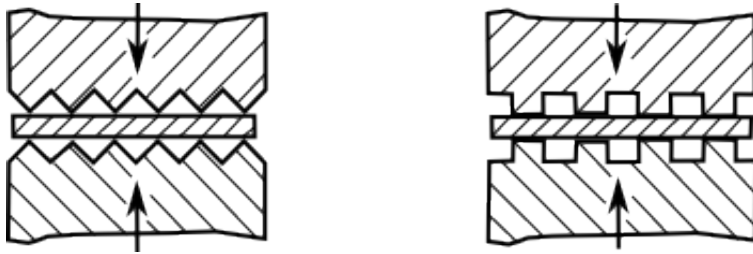
Rovnáni je technologie, která se používá k odstranění nežádoucí deformace, která vznikla buď manipulací anebo ve výrobě. Rovnáni tlakem pod lisem si lze představit jako „obrácený“ ohyb, při kterém uvádíme křivé části do roviny (obr.13-4). I zde platí pravidlo současného působení elastických deformací s plastickými - takže po zrušení vnějších sil rovnané těleso odpruží - což se projeví zbytkovým zakřivením.



Obrázek 13-4 Rovnáni výlisku tlakem mezi rovnými deskami

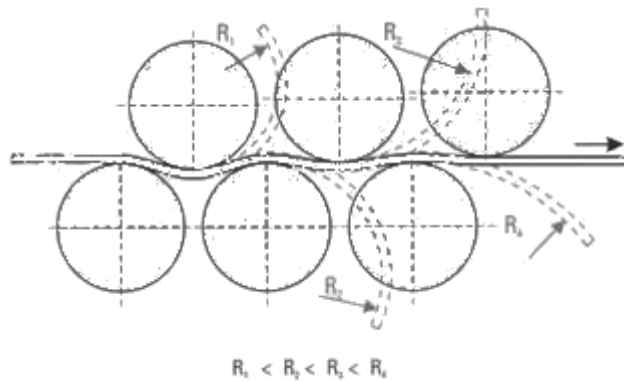
U velmi tenkých materiálů a nebo u tvrdých materiálů roste lisovací síla do neúnosných hodnot. Proto se v těchto případech volí jiná cesta. Rovnané těleso nevedeme do plastického stavu v celém ob-

jemu, nýbrž jen v určitých, pravidelně rozložených místech. Jedná se o tzv. *bodové* nebo *bradavkové* rovnání. Detail čelistí je na obrázku 13-5. Na velmi tvrdé materiály a nebo tam, kde nevadí vpichy, se používají čelisti s ostrými hroty.



Obrázek 13-5 Rovnání bodové (vlevo) a bradavkové (vpravo)

Často se používá k vyrovnání materiálů způsob opakovaného prohýbání. Je to obvyklé např. při vyrovnávání drátů nebo pásů před vstupem materiálu do zpracovatelského stroje. Střídavým ohybem při průchodu mezi válci je materiál vyrovnán (obr.13-6). Zbylá pnutí budou menší, použijeme-li střídavě rovnacích ohybů menších a menších. Přítomnost zbytkových pnutí má značný vliv na pevnost součástí a velikost odpružení.

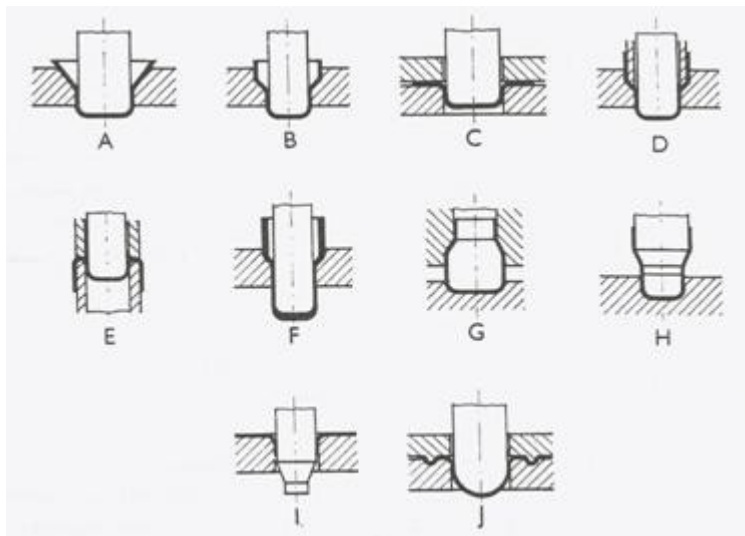


Obrázek 13-6 Rovnání plechů válcováním

Mezi nevýhody rovnacích technologií patří zejména riziko poškození povrchu povrchovými trhlinami a vruby, které mohou vést ke značnému snížení až k degradaci únavových parametrů (plechy, válcované za studena, tažený drát).

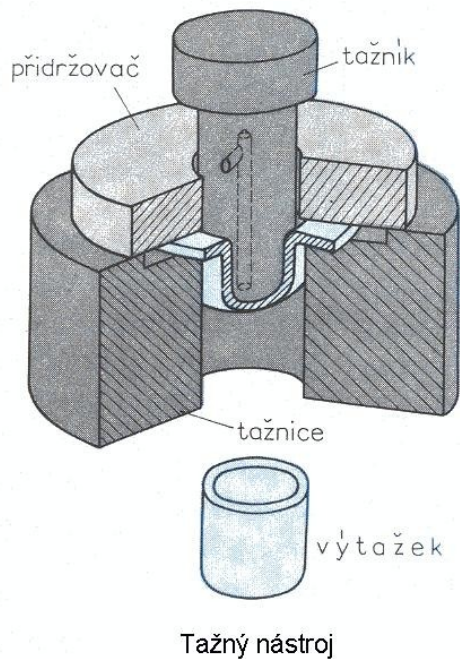
## 14. TAŽENÍ PLECHU – TECHNOLOGIE PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ

Tažením plechů a pásů vzniká prostorový výlisek nerozvinutelného tvaru. Podle tvaru výlisku můžeme proces tažení dělit na tažení mělké a hluboké, tažení bez a se ztenčením stěny, tažení rotačních a nerotačních tvarů a dále tažení nepravidelných tvarů (tzv. karosářské výlisky). Výchozím polotovarem je přístřih plechu, pás plechu nebo již jinak zpracovaný polotovar, který lze zpracovávat následujícími technologiemi: prostým tažením, tažením se ztenčením stěny, zpětným tažením, žlábkováním, rozšiřováním a lemováním, zužováním, přetahováním, napínáním a speciálními způsoby (obr. 14-1).



Obrázek 14-1 Technologické způsoby tažení :A, B - tažení bez přídržovače, 1. a 2. tah, C, D - tažení s přídržovačem, 1. a 2. tah, E - zpětné tažení (obracení), F - tažení se ztenčením stěny, G - zužování, H - rozšiřování, I - lemování (přetahování), J - napínání

Tažení je takový technologický způsob tváření, při kterém se jedním nebo v několika tazích vyrobí z rovného plechu (přístřihu) duté těleso - polouzavřená nádoba. Někdy se tento technologický proces nazývá hluboké tažení. Nástrojem je tažidlo (14-2), které se skládá z tažníku a tažnice a ostatních konstrukčních částí, výrobkem je výtazek.

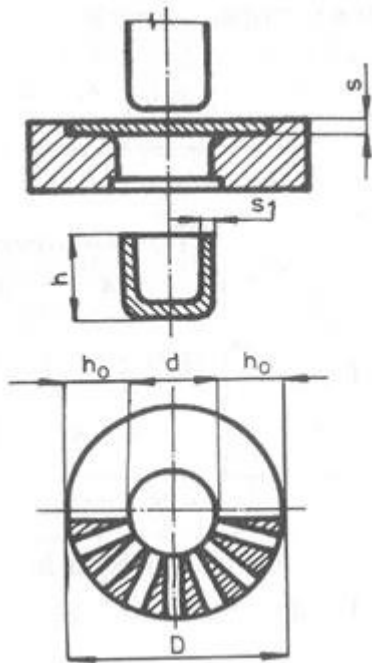


Obrázek 14-2 Tažný nástroj

#### **14.1 Proces tažení, mechanické schéma**

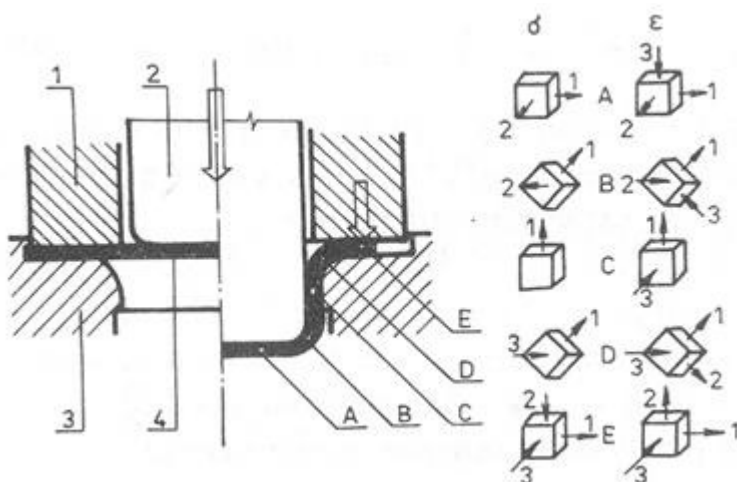
Princip tažení je ideální vysvětlit na tažení jednoduchého válcového tvaru se dnem. Potom obdobným způsobem lze získané výsledky aplikovat i na výtažky hranatých nebo nepravidelných tvarů. Zatlačujeme-li tažník do tažnice, posunuje se plech přes tažnou hranu, která se z celého nástroje nejrychleji opotřebuje. Síla potřebná k tažení vyplývá z podmínky pevnosti válcové části nádoby, která se nesmí při tažení přetrhnout. Je nutné uvažovat vliv tření a zpevnění materiálu.

Při tažení se mezikružší přístřihu ( $D - d$ ) změní na válec s průměrem  $d$  a výškou  $h$  z dřívějšího rozměru přístřihu  $D$  (obr.14-3). V důsledku platnosti zákona stálosti objemu se objem kovu během procesu nemění a proto výška  $h$  bude větší než šířka mezikružší  $D - d$ .



Obrázek 14-3 Princip tažení válcového tvaru

**Napjatost při tažení** je v jednotlivých místech výtažku různá a dochází zde k anizotropii mechanických vlastností plechu. Dno (A) se vytahuje nepatrně a stejnoměrně do dvou směrů. Válcová část (C) je natahována v jednom směru, ale u dna (B) je dvoj nebo trojosá napjatost. Materiál, který přechází přes tažnou hranu (D), je namáhán ohybem radiálním a tangenciálním tlakem. Materiál pod přidržovačem (E) je namáhán tahem v radiálním směru, tlakem v tangenciálním směru a tlakem kolmo na povrch příruby. Je-li nástroj bez přidržovače, odpadá tlak pod přidržovačem. Nejnevýhodnější podmínky jsou v místě ohybu u dna výtažku, je zde vysoké tahové napětí. Důsledkem je zeslabování tloušťky stěny, a to vede k nebezpečí utržení dna.



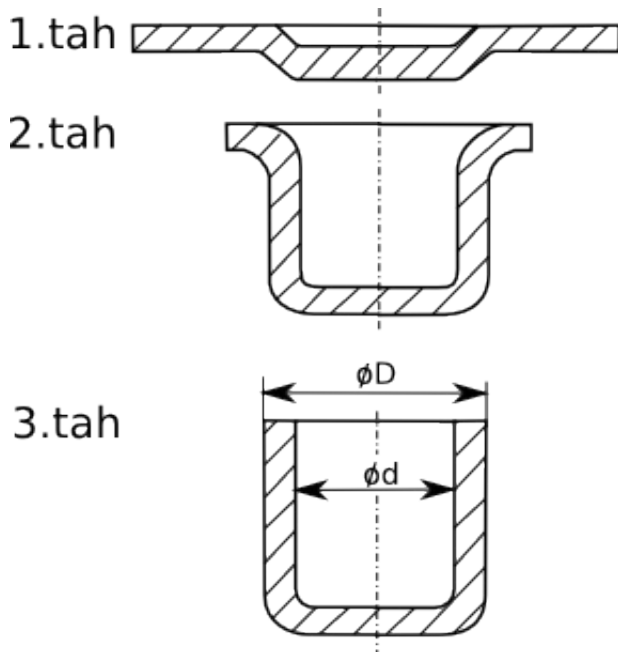
Obrázek 14-4 Schéma napětí a deformací při tažení s přidržovačem: 1 - přidržovač, 2 – tažník, 3 –tažnice, 4 – přístřih



kde  $h$  je výška výtažku a  $C$  koeficient zaplnění plochy.

### **14.3 Určování rozměrů přístřihu, počet tahů**

Celkové přetvoření plechu při tažení je značné, celou nádobku nelze zpravidla vytáhnout v jedné operaci. Proto se první tah provádí mělký a o velkém průměru. Tažení pokračuje dalším tahem a to vždy na menší průměr. Současně roste výška výtažku (obr. 14-6). Při vyčerpání plastičnosti je nutné provést mezioperační žíhání.



**Obrázek 14-6 Tažení výrobku na tři tahy**

Pro určení maximální deformace na jeden tah a počtu tažných operací se používá součinitel tažení nebo také stupeň tažení, který se vypočte pro první tah ze vztahu

$$m = \frac{d}{D} = \frac{1}{K}$$

kde  $m$  je **součinitel tažení**,  $d$  je průměr výtažku,  $D$  je průměr přístřihu a  $K$  je stupeň tažení.

Pro další tahy se součinitel nebo stupeň tažení počítá obdobným způsobem. Celkový součinitel tažení se rovná součinu jednotlivých součinitelů. Hodnoty součinitelů tažení pro válcové nádoby jsou uváděny v tabulkách. Jde-li o tvary jiné, stanovuje se součinitel tažení podle místa, kde zakřivení stěny a poměrná hloubka dosahují maximálních hodnot. Obecně závisí na druhu materiálu, na předchozím zpevnění, poměrné tloušťce, tvaru výtažku, tažné rychlosti, tlaku přidržovače, mazání a hlavně na geometrii tažného nástroje.



## Obsah

<b>1. FYZIKÁLNÍ POVAHA A MECHANISMUS PLASTICKÉ DEFORMACE.....</b>	<b>3</b>
1.2.Mechanismus plastické deformace.....	3
1.3. Plasticita a tvařitelnost.....	6
<b>2.VLIV TVÁŘENÍ NA VLASTNOSTI A STRUKTURU KOVŮ.....</b>	<b>8</b>
2.1.Zotavení.....	8
2.2.Rekrystalizace.....	9
2.3. Tváření za studena.....	12
2.4.Tváření za tepla.....	13
2.5.Vliv struktury na plastické vlastnosti materiálu.....	14
2.6.Vliv teploty na plastické vlastnosti materiálu.....	15
<b>3.MECHANICKÁ PODSTATA TVÁŘENÍ A ZÁKLADNÍ ZÁKONY PLASTICKÉ DEFORMACE..</b>	<b>16</b>
3.1.Napětí v tvářeném tělese.....	16
3.2. Mechanické schéma – schémata napětí a deformací (MSD).....	18
3.3. Deformace v tvářeném tělese.....	21
3.4.Základní zákony plastické deformace.....	24
3.5.Vnější tření.....	27
<b>4. DEFORMAČNÍ ODPOR, SÍLY A PRÁCE, POTŘEBNÉ KE TVÁŘENÍ.....</b>	<b>28</b>
4.1. Stanovení deformačního odporu pro případ pětování kruhové desky.....	28
4.2. Deformační rychlost.....	33
4.3. Deformační (přetvárná) práce.....	35
<b>5. METALURGICKÉ ZÁKLADY OHŘEVU.....</b>	<b>37</b>
5.1. Fyzikální veličiny, ovlivňující ohřev kovu.....	38
5.2.Tepelná pnutí při ohřevu .....	40
5.3. Technologické zásady ohřevu kovů.....	40
5.4.Průvodní jevy ohřevu.....	41

<b>6. ROZDĚLENÍ TVÁŘECÍCH POCHODŮ</b> .....	42
<b>7.VOLNÉ KOVÁNÍ</b> .....	44
<b>8. ZÁPUSTKOVÉ KOVÁNÍ</b> .....	48
<b>9.VÁLCOVÁNÍ</b> .....	52
9.1. Válcovací tratě a stolice.....	54
9.2. Výroba hutních polotovarů.....	56
9.3. Podmínky pro záběr (vtažení) provalku.....	57
<b>10. TAŽENÍ</b> .....	61
10.1.Tažení drátu.....	61
10.2.Tažení trubek a profilů.....	63
<b>11. PROTLAČOVÁNÍ</b> .....	65
11.1 Způsoby protlačování .....	66
11.2 Mechanické schéma, síla a práce při protlačování.....	68
<b>12. DĚLENÍ MATERIÁLŮ STŘÍHÁNÍM A LÁMÁNÍM – PLOŠNÉ TVÁŘENÍ</b> .....	70
12.1 Výpočet střížné síly a střížné práce při stříhání na nůžkách s rovnoběžnými noži.....	73
12.2 Výpočet střížné síly a střížné práce při stříhání na nůžkách se šikmými noži.....	75
12.3 Stříhání ve stříhadlech a děrovadlech.....	78
12.4 Stříhání na kotoučových - kruhových nůžkách.....	79
<b>13. OHÝBÁNÍ A ROVNÁNÍ</b> .....	80
13.1 Výpočet síly při ohybu do tvaru „V“.....	81
13.2 Rovnání.....	82
<b>14. TAŽENÍ PLECHU – TECHNOLOGIE PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ</b> .....	84
14.1 Proces tažení, mechanické schéma.....	85
14.2 Výpočet síly a práce.....	87
14.3 Určování rozměrů přístřihu, počet tahů.....	88

## **Technologie tváření**

Ing. Soňa Benešová, Ph.D.

Doc. Ing. Vladimír Bernášek, CSc.

Vydavatel:                   Západočeská univerzita v Plzni  
Univerzitní knihovna – oddělení vydavatelství a tiskových služeb  
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň  
tel.: 377 637 724  
e-mail: vydavatel@uk.zcu.cz

Katedra:                   materiálu a strojírenské metalurgie

Vedoucí katedry:       Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.

Určeno:                   pro studenty 2. ročníku FST

Vyšlo:                    listopad 2014

Počet stran:            90

Nositelé autorských práv:

Ing. Soňa Benešová, Ph.D.

Doc. Ing. Vladimír Bernášek, CSc.

Západočeská univerzita v Plzni

Vydání:                  1. vydání

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.