

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA STROJNÍ**



# **TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ A SLÉVÁNÍ – TEORETICKÝ ZÁKLAD**

**VLIV TVÁŘENÍ NA VLASTNOSTI A STRUKTURU MATERIÁLU**

prof. Ing. Radek ČADA, CSc.

**Ostrava 2013**

© prof. Ing. Radek ČADA, CSc.

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3015-5



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

## OBSAH

<b>1</b>	<b>VLIV TVÁŘENÍ NA VLASTNOSTI A STRUKTURU MATERIÁLU.....</b>	<b>3</b>
1.1	Tváření.....	6
1.2	Plastická deformace kovů.....	6
1.3	<i>Základní mechanizmy plastické deformace</i> .....	6
1.4	Základní faktory ovlivňující plastickou deformaci.....	8
1.4.1	Vliv struktury materiálu na plastickou deformaci.....	8
1.4.2	Vliv teploty deformovaného materiálu na proces plastické deformace .....	10
1.4.3	Vliv tření na styčných plochách nástroje s materiálem na průběh plastické deformace.....	11
1.4.4	Vliv napjatosti na plastickou deformaci .....	11
1.4.5	Vliv rychlosti deformace na plastickou deformaci.....	12
1.5	Základní zákony plastické deformace.....	13
1.5.1	Zákon stálosti objemu.....	13
1.5.2	Zákon nejmenšího odporu.....	14
1.5.3	Zákon závislosti deformace na napět'ovém stavu .....	14
1.5.4	Zákon stálosti potenciální energie na změnu tvaru.....	15
1.5.5	Zákon smykových napětí.....	15
1.5.6	Zákon pružného odlehčení .....	16
1.5.7	Zákon zpevnění .....	16
1.5.8	Zákon tření .....	17
1.5.9	Zákon přídavných napětí .....	17
1.5.10	Zákon podobnosti.....	17
<b>2</b>	<b>K JAKÝM ZKUŠEBNÍM OTÁZKÁM SE TATO PŘEDNÁŠKA VZTAHUJE: ....</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>DOPLŇUJÍCÍ ZDROJE – KNIHY, INTERNET, ...</b> .....	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>21</b>



# 1 VLIV TVÁŘENÍ NA VLASTNOSTI A STRUKTURU MATERIÁLU



## STRUČNÝ OBSAH PŘEDNÁŠKY:

Tváření

Plastická deformace kovů

Základní mechanismy plastické deformace

**Základní faktory ovlivňující plastickou deformaci** (vliv struktury materiálu na plastickou deformaci, vliv teploty deformovaného materiálu na proces plastické deformace, vliv tření na styčných plochách nástroje s materiálem na průběh plastické deformace, vliv napjatosti na plastickou deformaci, vliv rychlosti deformace na plastickou deformaci)

**Zákony plastické deformace** (zákon stálosti objemu, zákon nejmenšího odporu, zákon závislosti deformace na napět'ovém stavu, zákon stálosti potenciální energie na změnu tvaru, zákon smykových napětí, zákon pružného odlehčení, zákon zpevnění, zákon tření, zákon přídavných napětí, zákon podobnosti)



## MOTIVACE:

Tato kapitola je důležitým teoretickým základem pro pochopení podstaty řady výrobních technologií. Je to kapitola, která částečně opakuje znalosti z předmětu „Nauka o materiálu“. Je postupně uvedeno deset základních zákonů plastické deformace, které autor studijní opory shromáždil z většího množství odborné literatury, ve které jsou zpravidla uvedeny jen některé z nich.



## CÍL:

### Budete umět:

- definovat pojem tváření,
- vysvětlit výhody technologie tváření,
- objasnit princip plastické deformace kovů,
- rozebrat základní mechanismy plastické deformace,
- odvodit, za jakého zatížení vznikne první plastická deformace tělesa,
- vysvětlit průběh křivky zpevnění a důvody zpevnění materiálu při tváření zastudena,
- definovat plošné a objemové tváření,



- objasnit vliv tváření na vlastnosti a strukturu materiálu,
- definovat a vysvětlit jednotlivé základní zákony plastické deformace,
- objasnit vznik zpevnění při deformačních procesech pod rekrytalizační teplotou,
- vysvětlit vznik tření mezi nástrojem a materiálem v procesu plastické deformace.

**Získáte:**

- přehled o vlivu struktury materiálu na plastickou deformaci, tj. vlivu chemického složení, typu krystalové mřížky, vlivu velikosti zrn, stejnorodosti zrn a vlivu mezikrystalické hmoty a jejího rozdělení,
- znalosti o vlivu teploty deformovaného materiálu na proces plastické deformace,
- přehled o vlivu tření na styčných plochách nástroje s materiálem na průběh plastické deformace,
- znalosti o vlivu napjatosti na plastickou deformaci,
- informace o vlivu rychlosti deformace na plastickou deformaci,
- znalosti o způsobu zaplňování dutin zápustek při zápustkovém kování,
- přehled o vlivu přídatných napětí na tvářené těleso včetně způsobů jejich snížení.

**Budete schopni:**

- popsat rozdíly mezi mechanismy plastické deformace kluzem, dvojčatěním a difúzí,
- rozdělit tvářecí procesy podle teploty,
- určit schopnost plastické deformace jednotlivých krystalových mřížek,
- vysvětlit průběh rekrytalizace struktury a její význam pro tváření materiálu,
- rozebrat rozdíly mezi technologiemi tváření zastudena a zatepla,
- rozlišit aktivní a pasívní tření,
- posoudit vliv napjatosti na plastickou deformaci,



- vysvětlit, ve kterých případech zákon stálosti objemu zcela neplatí,
- popsat závislost deformace na napěťovém stavu,
- vysvětlit stálost potenciální energie na změnu tvaru,
- rozebrat zákon smykových napětí,
- vysvětlit podmínky geometrické, mechanické a fyzikální podobnosti, které je třeba splnit pro platnost zákona podobnosti.



## 1.1 TVÁŘENÍ

- zpracování materiálu *velkými plastickými deformacemi* (jde o trvalou změnu tvaru a rozměrů tělesa účinkem vnějších sil pomocí tvářecího nástroje a stroje),
- vyvolání stavu napjatosti *nad mezí kluzu materiálu* (vzniká tak trvalá deformace požadovaného směru a velikosti bez porušení tvářeného materiálu),
- vhodné především pro *plastické materiály* (umožňují trvalou deformaci bez porušení).

### Význam tváření:

- vysoká produktivita práce (včetně možnosti automatizace),
- vysoká hospodárnost (beztržiskové zpracování, minimální množství odpadu),
- zvyšování užitečných vlastností kovů (zvýšení pevnosti a houževnatosti, u tváření zastudena nedochází k přerušení vláken – vyšší odolnost na únavu),
- vhodné především pro větší série (podle ceny nástrojů).



Audio 1.1 Význam tváření.



## 1.2 PLASTICKÁ DEFORMACE KOVŮ

### Struktura kovů:

- kovy jsou především *polykrystalické látky* – struktura kovu je tvořena větším množstvím *krystalů* (v metalurgickém názvosloví se nazývají *zrna*),
- *zrna mají zpravidla polyedrický tvar* – při tuhnutí kovu vzniká v tavenině velké množství *krystalizačních center*, která jsou navzájem náhodně orientovaná, růst jednotlivých krystalů je po určité době omezen jinými krystaly
- *krystaly mají mozaikovou strukturu* – skládají se z malých krystalových bloků (*subzrn*), u kterých úhel krystalografických os kolísá v rozmezí několika úhlových vteřin kolem průměrné polohy osy celého krystalu.

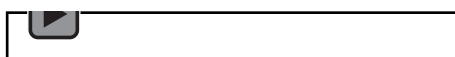
### Typy plastické deformace:

- *deformace na hranicích bloků (uvnitř krystalu)* – prostorová orientace bloků, kluz na krystalových rovinách bloků, prodlužování zrn ve směru převládající deformace (*vznik textury*), lze docílit velké plastické deformace, pokud se soudržnost na hranicích bloků neporuší,
- *deformace na hranicích zrn (mezikrystalová)* – nemůže způsobit větší změnu tvaru (soudržnost hranic zrn se brzy poruší, tvářený kov se stane křehkým).

Hlavním znakem plastických deformací je jejich *nevratnost*.



Audio 1.2 Plastické deformace.



## 1.3 ZÁKLADNÍ MECHANISMY PLASTICKÉ DEFORMACE

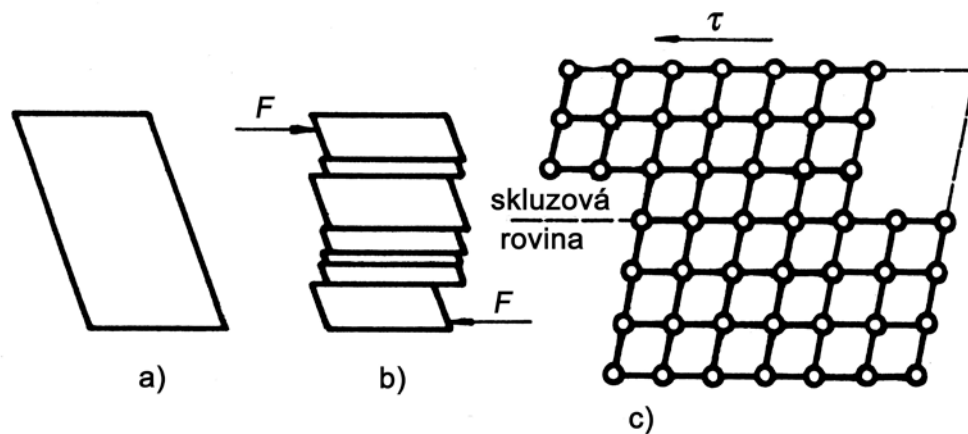
- kluzem*
- dvojčatěním*
- difúzí*

### A) Plastická deformace kluzem



- je základním mechanismem plastické deformace (obr. 1.1),
- kluzový systém je určen *rovinou kluzu a směrem kluzu* (zpravidla nejhustěji obsazeny atomy),
- velikost posuvu je celočíselným násobkem nejmenší mřížkové vzdálenosti,
  - **jednoduchý kluz (translační)** – vzniká v počátečním stádiu plastické deformace, probíhá podle jednoho systému kluzových čar (nedochází k ohybu a zkrucování rovin kluzu, malé zpevnění, minimální poruchy krystalové mřížky),
  - **složité kluz** – vzniká při dalším zatěžování, probíhá současně v několika kluzových systémech (dochází k natačení kluzových rovin, zpevnění, zvýšení deformačního odporu, vzniku mikroskopických trhlin, fragmentaci krystalů).

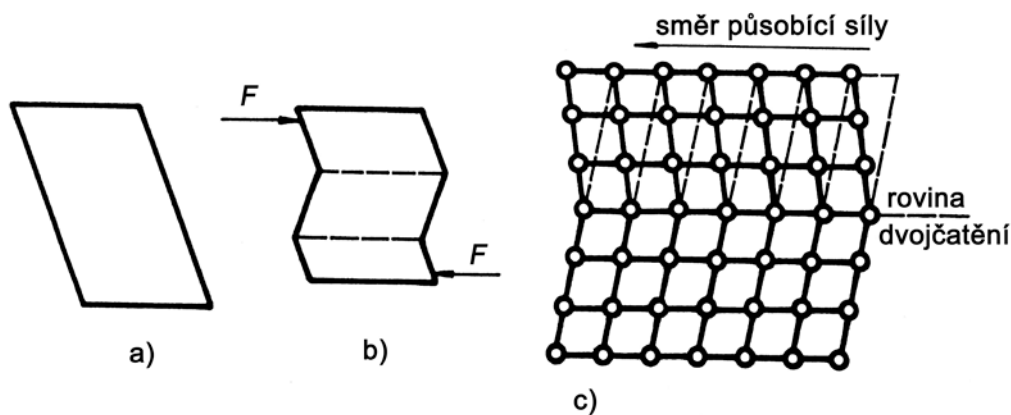
Napětí, potřebné ke kluzu v určité rovině – **kritické smykové napětí**. Je to minimální smykové napětí potřebné k vyvolání kluzu. Minimální smykové napětí potřebné k vyvolání kluzu v tělese se docílí na rovině, která je skloněna vůči působícímu napětí pod úhlem  $45^\circ$  v okamžiku, kdy osové napětí dosáhne hodnoty meze kluzu  $R_e$ .



Obr. 1.1 Plastická deformace kluzem

## B) Plastická deformace dvojčatěním

- vlivem vnějších sil se část krystalu symetricky pootočí kolem roviny dvojčatění a vytvoří zrcadlový obraz nedeformované části (obr. 1.2),
- tvorbu dvojčat podporuje *kubická plošně centrovaná mřížka, zvýšená deformační rychlost a nižší teploty tváření*,
- *deformace kovů* při vzniku dvojčat *nemůže být velká* (vzniká značné zpevnění), další deformace se zpravidla děje kluzovým mechanismem.



Obr. 1.2 Plastická deformace dvojčatěním

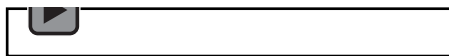
Tento mechanismus plastické deformace je typický např. při *tváření výbuchem*, kdy je vysoká rychlost deformace.

### C) Plastická deformace difúzí

- základními předpoklady jsou *vysoká teplota* a *velmi malá deformační rychlost*,
- přemísťování atomů vlivem vnějších napětí do míst s energeticky výhodnějšími podmínkami (*difúze vakantních míst* – přemísťování atomů z hrany nadbytečné roviny do vakantních míst krystalu, *difúze meziuzlových atomů* – k hraně nadbytečné roviny),
- na difúzní pohyb má vliv koncentrace vakancí a intersticiálních atomů, teplota, napětí při deformaci krystalu.



Audio 1.3 Mechanismy plastické deformace.



## 1.4 ZÁKLADNÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PLASTICKOU DEFORMACI

### 1.4.1 Vliv struktury materiálu na plastickou deformaci

#### a) vliv chemického složení

- *se stoupajícím obsahem C* – zvětšují se deformační odpory, *roste pevnost* (u nízkoalloyovaných konstrukčních ocelí, tj. manganových, chromvanadových, chrommolybdenových), rychleji než u ocelí uhlíkových),
- *vysokolegované nekorodující oceli a oceli nástrojové* – mají zpravidla větší odpory proti deformaci, než oceli uhlíkové a nízkoalloyované,
- většina *neželezných kovů* má malý odpor proti deformaci (měď, kujné mosazi a kujné bronzy lze tvářet snadněji než měkkou ocel).

#### b) vliv typu krystalové mřížky

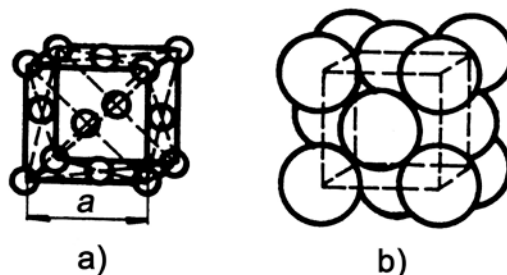
*Kovy a jejich slitiny* – vytvářejí v tuhém stavu *krystalickou strukturu* (atomy kovů jsou prostorově pravidelně uspořádány do krystalových mřížek a tvoří krystaly)

- *plošně centrovaná kubická mřížka* (lze ji nejnárodněji přetvářet – má největší počet příznivě orientovaných krystalografických rovin, které kladou malý odpor kluzovým deformacím) – Au, Ag, Cu, Al (obr. 1.3),

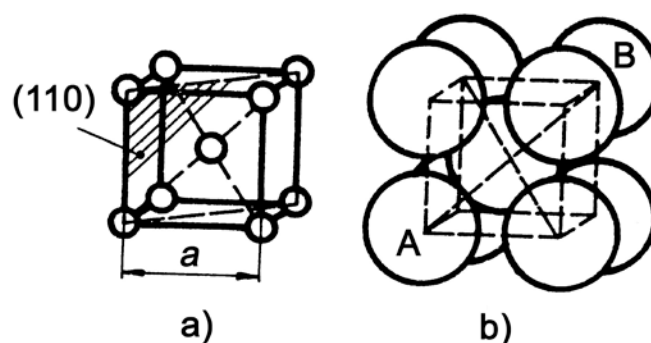




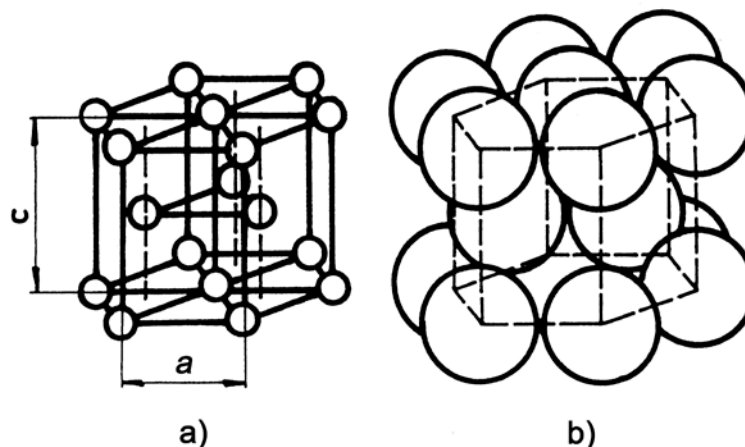
- **prostorově centrovaná kubická mřížka** (menší schopnost plastické deformace) – Fe (obr. 1.4),
- **hexagonální mřížka s těsným uspořádáním atomů** (mají omezený počet kluzových rovin, obtížné dosažení plastického stavu) – Zn (lze jej tvářet za normální teploty, protože při ní rekrystalizuje) (obr. 1.5).



Obr. 1.3 Plošně centrovaná kubická mřížka ( $a$  je parametr mřížky)



Obr. 1.4 Prostorově centrovaná kubická mřížka ( $a$  je parametr mřížky)



Obr. 1.5 Hexagonální mřížka s těsným uspořádáním atomů ( $a$  je parametr mřížky,  $c$  je vzdálenost bazálních rovin)

- c) **vliv velikosti zrn** (jemnozrnnější struktura má větší deformační odpor a často i nižší plastičnost)

**Jemnozrnná struktura** znamená větší množství hranic zrn, která tvoří překážky pro pohyb dislokací při plastické deformaci. Proto je jemnozrnná struktura houževnatější než hrubozrnná.

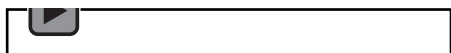
- d) **vliv stejnorodosti zrn** (různá velikost zrn zhoršuje plastické vlastnosti vlivem nerovnoměrného postupu deformace),



- e) vliv mezikrystalické hmoty a jejího rozdělení (přítomnost snadno tavitelných příměsí nebo místní koncentrace těchto příměsí, nerovnoměrné rozdělení mezikrystalické hmoty způsobuje *oslabení vazby mezi zrnny*).



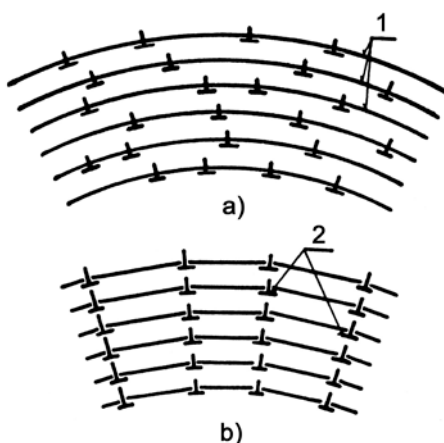
Audio 1.4 Vliv struktury materiálu na plastickou deformaci.



### 1.4.2 Vliv teploty deformovaného materiálu na proces plastické deformace

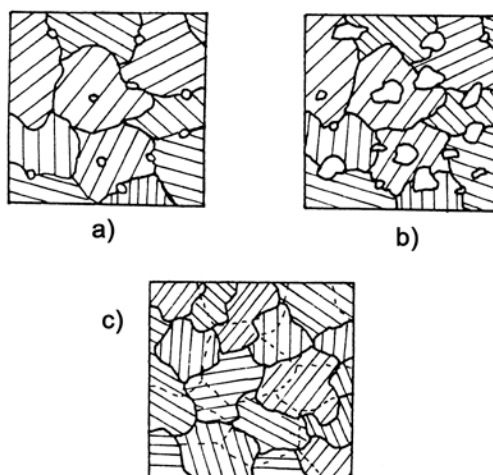
Rozdělení tvářecích procesů podle teploty:

1. **tváření zastudena** – do teploty  $0,3 \cdot T_{\text{tav}}$ , v kovu vzniká zpevnění v závislosti na velikosti deformace a deformovaná struktura.
2. **tváření se zotavením** – v rozmezí teplot  $(0,3 \text{ až } 0,5) \cdot T_{\text{tav}}$ , struktura je deformovaná, mírný pokles pevnosti, zpevnění je nižší, zlepšení plasticity. **Zotavení** – při teplotě  $(0,3 \text{ až } 0,35) \cdot T_{\text{tav}}$  (uvolnění některých zachycených dislokací, změna jejich uspořádání bez snížení jejich počtu). **Polygonizace** (obr. 1.6) – nepravidelně rozložené dislokace po tváření za studena zaujmou místa v určitých liniích).
3. **tváření s částečnou rekrytalizací struktury** – v rozmezí teplot  $(0,5 \text{ až } 0,7) \cdot T_{\text{tav}}$ , v materiálu jsou dvě struktury – rekrytalizovaná s rovnoměrnými zrnny a nerekrystalizovaná se zrnny prodlouženými ve směru tváření.
4. **tváření zatepla s úplnou rekrytalizací** – při teplotách nad  $0,7 \cdot T_{\text{tav}}$ , rekrytalizace probíhá současně s tvářením, struktura má zrnitý vzhled, vzniká jen velmi malé zpevnění (obr. 1.7).



Obr. 1.6 Polygonizace v kovové mřížce deformované ohybem (a – nepravidelně rozložené dislokace po tváření zastudena před polygonizací, b – umístění dislokací v určitých liniích po polygonizaci)





Obr. 1.7 Proces úplné rekystalizace struktury (a – nukleace, b – růst nových zrn, c – struktura kovu po rekystalizaci)

### 1.4.3 Vliv tření na styčných plochách nástroje s materiálem na průběh plastické deformace

#### Působení vnějšího tření:

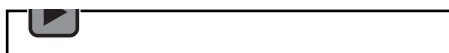
1. **aktivní** (žádoucí, nebylo by bez něj možné uskutečnit některé tvářecí operace, např. válcování),
2. **pasivní** (nežádoucí, brzdí rozvoj plastické deformace, zvyšuje spotřebu energie, zvyšuje opotřebení tvářecích nástrojů).

#### Tření způsobuje:

1. *změnu stavu napjatosti* deformovaného materiálu a tím i změnu plastického toku (např. čím větší je tření, tím je větší soudkovitost pěchovaných válečků),
2. *kvalitativní změny materiálu* (nerovnoměrné rozložení tvrdosti způsobené nerovnoměrností plastického toku materiálu),
3. ovlivňuje *velikost tvářecí síly a spotřebovanou energii* pro tváření,
4. ovlivňuje *životnost nástrojů*.



#### Audio 1.5 Tření na styčných plochách.



### 1.4.4 Vliv napjatosti na plastickou deformaci

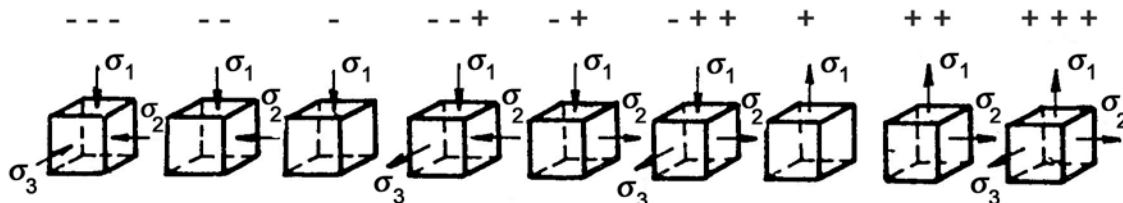
Napjatost lze znázornit *schémata stavu napjatosti* (je jich devět) – pomocí hlavních napětí, tj. bez existence tangenciálních napětí (obr. 1.8). Každou napjatost lze rovněž znázornit Mohrovými kružnicemi napětí.

#### Druhy napjatostí:

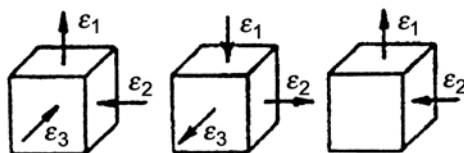
1. *jednoosá* (např. v prvním stádiu tahové zkoušky),
2. *dvojosa* (např. při ohýbání a hlubokém tažení plechů),
3. *tříosa* (např. při protlačování, kování, válcování).

Existují tři *schémata stavu deformace* (obr. 1.9).





Obr. 1.8 Schémata stavu napjatosti



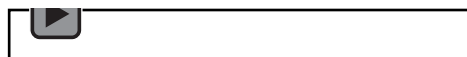
Obr. 1.9 Schémata stavu deformace

Čím více ve schématu napjatosti převládají **tlaková napětí**, tím je **tvářitelnost materiálu vyšší** (lze tvářet většími deformačními stupni bez nebezpečí vzniku trhliny a tvářet kovy s nižšími plastickými vlastnostmi).

Při převládajícím **tahovém napětí** tvářitelnost materiálu klesá (obr. 1.8).



**Audio 1.6** Vliv napjatosti na plastickou deformaci.



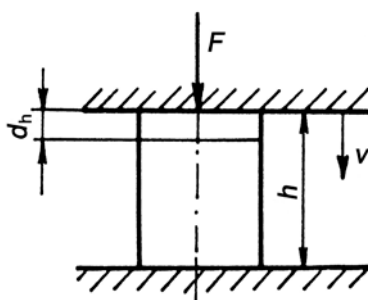
### 1.4.5 Vliv rychlosti deformace na plastickou deformaci

**Rychlosti:**

1. **rychlost tvářecího nástroje** (je dána např. rychlostí beranu),
2. **deformační rychlost** (poměrná rychlost tváření) – rychlost, kterou se při tváření blíží průřezy tvářeného materiálu (obr. 1.10). Je to změna poměrné deformace za časovou jednotku:

$$v_d = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dh}{h \cdot dt} = \frac{dh}{dt} \cdot \frac{1}{h} = \frac{v}{h} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (1.1)$$

kde jsou  $\varepsilon$  – poměrná deformace (-),  $t$  – čas (s),  $h$  – výška tvářeného materiálu (m),  $v$  – rychlost tvářecího nástroje ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).



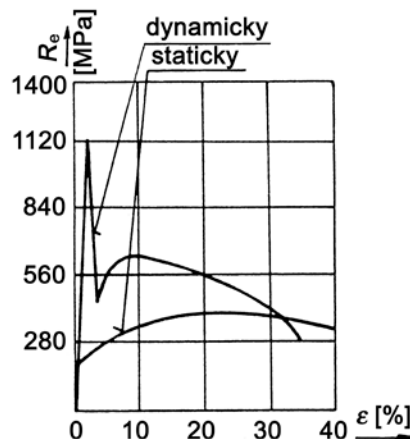
Obr. 1.10 Vzorek pro stanovení deformační rychlosti

- s růstem  $v_d$  roste **napětí potřebné pro deformaci materiálu**, rostou tvářecí síly,
- s růstem  $v_d$  se **zvyšuje teplota tvářeného materiálu** (tzv. **tepelný efekt**) – energie, spotřebovaná na plastickou deformaci se mění na energii tepelnou, která se nestačí odvést do okolí. To působí příznivě na tvářitelnost, pokud se nepřekročí max. teplota ohřevu.



- s růstem  $v_d$  se zvyšuje *kritická teplota*, při které nastává přechod od chování plastického ke křehkému,
- vliv  $v_d$  je tím větší, čím menší je pevnost materiálu,
- u materiálu s výraznou mezí kluzu je s růstem  $v_d$  růst meze kluzu větší než je růst meze pevnosti.

Srovnání statického a dynamického pracovního diagramu pro měkkou ocel (obr. 1.11) – existence tzv. *hrotu* (poměr horní a dolní meze kluzu může dosáhnout hodnoty až 6,5). Horní mez kluzu se označuje jako nestabilní, dolní mez kluzu jako stabilní.



Obr. 1.11 Vliv rychlosti deformace na plastickou deformaci



Audio 1.7 Vliv rychlosti deformace na plastickou deformaci.



## 1.5 ZÁKLADNÍ ZÁKONY PLASTICKÉ DEFORMACE

Mezi základní zákony plastické deformace lze zařadit následující zákony:

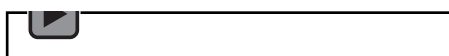
1. zákon stálosti objemu (viz 1.5.1),
2. zákon nejmenšího odporu (viz 1.5.2),
3. zákon závislosti deformace na napět'ovém stavu (viz 1.5.3),
4. zákon stálosti potenciální energie na změnu tvaru (viz 1.5.4),
5. zákon smykových napětí (viz 1.5.5),
6. zákon pružného odlehčení (viz 1.5.6),
7. zákon zpevnění (viz 1.5.7),
8. zákon tření (viz 1.5.8),
9. zákon přídatných napětí (viz 1.5.9),
10. zákon podobnosti (viz 1.5.10).

### 1.5.1 Zákon stálosti objemu

**Definice:** Objem materiálu před deformací je roven objemu materiálu po deformaci, tedy součet hlavních logaritmických deformací je roven nule.



Audio 1.8 Zákon stálosti objemu.



Odvození:

$$V_0 = V_1 = a_0 \cdot b_0 \cdot c_0 = a_1 \cdot b_1 \cdot c_1 \quad (1.2)$$



kde jsou  $V_0$  – objem hranolu před deformací,  $V_1$  – objem hranolu po deformaci,  $a_0, b_0, c_0$  – rozměry hranolu před deformací,  $a_1, b_1, c_1$  – rozměry hranolu po deformaci.

Úpravou rovnice (1.2) se získá:

$$\frac{a_1}{a_0} \cdot \frac{b_1}{b_0} \cdot \frac{c_1}{c_0} = 1 \quad (1.3)$$

Logaritmováním rovnice (1.3) se získá:

$$\ln \frac{a_1}{a_0} + \ln \frac{b_1}{b_0} + \ln \frac{c_1}{c_0} = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (1.4)$$

kde jsou  $\varphi_1$  – hlavní logaritmická deformace ve směru 1,  $\varphi_2$  – hlavní logaritmická deformace ve směru 2,  $\varphi_3$  – hlavní logaritmická deformace ve směru 3.

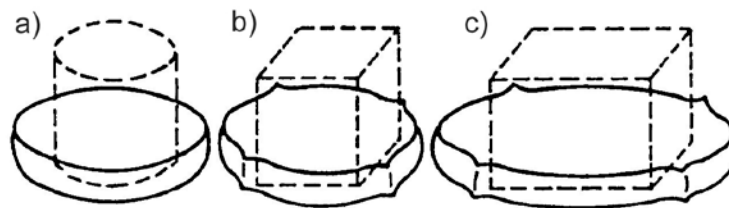
### 1.5.2 Zákon nejmenšího odporu

**Definice:** Elementy deformovaného tělesa se přemísťují ve směru nejmenšího odporu.

Audio 1.9 Zákon nejmenšího odporu.



**Pěchování hranolu mezi rovnoběžnými deskami** s uvažováním tření na kontaktních plochách. Element materiálu se přemísťí do nové polohy *po nejkratší dráze*, tj. kolmo k povrchu deformovaného tělesa. U volných deformací má obrys průřezu postupně minimální obvod (kruh) (obr. 1.12).

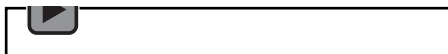


Obr. 1.12 Změna tvaru pěchovaných součástí (a – pěchování válce, b – pěchování krychle, c – pěchování hranolu)

### 1.5.3 Zákon závislosti deformace na napět'ovém stavu

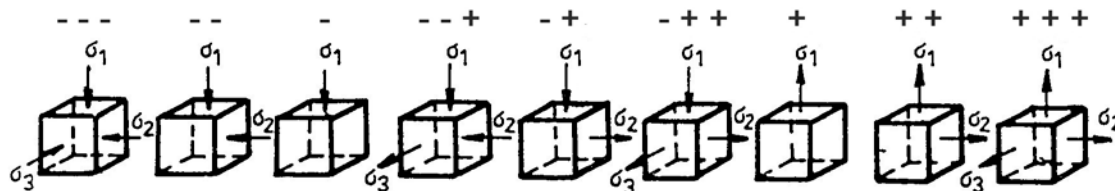
**Definice:** Průběh plastické deformace je závislý na napět'ovém stavu.

Audio 1.10 Zákon závislosti deformace na napět'ovém stavu.



Se změnou stavu napjatosti se mění tvářitelnost tvářeného kovu – od trojosého tlaku klesá po trojosý tahový stav napjatosti (obr. 1.13).





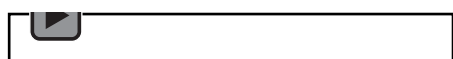
Obr. 1.13 Mechanická schémata stavu napjatosti (směrem zleva doprava tvářitelnost klesá)

### 1.5.4 Zákon stálosti potenciální energie na změnu tvaru

**Definice:** Množství měrné potenciální energie na změnu tvaru, která je obsažena v deformovaném tělese při plastické deformaci, závisí na podmínkách plastické deformace (teplota, rychlost a stupeň deformace) a na materiálu, ale nezávisí na stavu napjatosti.



Audio 1.11 Zákon stálosti potenciální energie na změnu tvaru.



*Jinými slovy:* množství měrné potenciální energie pružné deformace elementu kovového tělesa při jeho plastické deformaci je pro dané podmínky tváření veličinou stálou, nezávislou na stavu napjatosti.

Při deformaci se v tělese hromadí *potenciální deformační energie* číselně rovná deformační práci vnějších sil, které na těleso působí.

Měrná potenciální deformační energie (tj. pro jednotku objemu):

$$A_D = A_V + A_{Tv} \quad (\text{J}) \quad (1.5)$$

kde jsou  $A_V$  – měrná potenciální energie na změnu objemu,  $A_{Tv}$  – měrná potenciální energie na změnu tvaru.

Měrná potenciální energie na změnu objemu:

$$A_V = \frac{1-2\mu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \quad (\text{J}) \quad (1.6)$$

kde jsou  $\mu$  – Poissonova konstanta,  $E$  – modul pružnosti,  $\sigma_1$  – hlavní normálové napětí ve směru 1,  $\sigma_2$  – hlavní normálové napětí ve směru 2,  $\sigma_3$  – hlavní normálové napětí ve směru 3.

Měrná potenciální energie na změnu tvaru:

$$A_{Tv} = \frac{1+\mu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \frac{1+\mu}{6E} 2\sigma_K^2 = \text{konst.} \quad (1.7)$$

kde je  $\sigma_K$  – skutečné napětí na mezi kluzu.

Jde o fyzikální význam energetické podmínky plasticity (HMH):

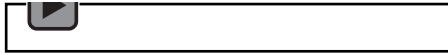
$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_K^2 \quad (1.8)$$

### 1.5.5 Zákon smykových napětí

**Definice:** K plastické deformaci ve tvářeném tělese dojde tehdy, když smykové napětí vznikající v něm působením vnějších sil dosáhne určitou hodnotu, takzvané kritické smykové napětí, která je závislá na materiálu a podmínkách plastické deformace, to je teplotě, stupni a rychlosti deformace, schématu hlavních napětí.



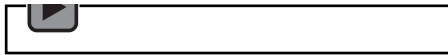



**Audio 1.12 Zákon smykových napětí.**


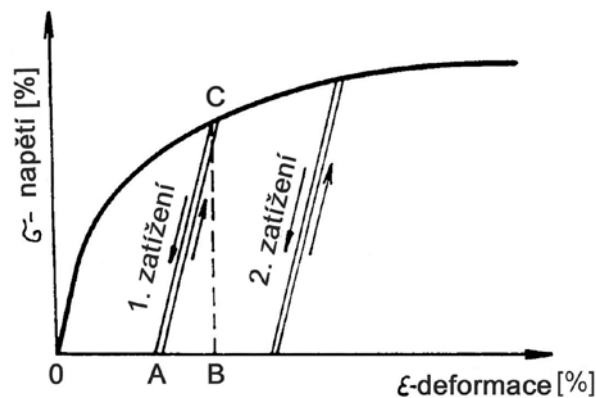
Kritické smykové napětí působí v rovinách, které jsou vůči směru maximálního a minimálního hlavního napětí skloněny pod úhlem 45°.

### 1.5.6 Zákon pružného odlehčení

**Definice:** V případě přerušení plastické deformace odlehčením a opětovným zatížením při zachování charakteru a způsobu zatížení nemění deformační diagram svůj tvar.


**Audio 1.13 Zákon pružného odlehčení.**


- odlehčení a opětovné zatížení se řídí Hookovým zákonem, nedochází-li mezitím ke stárnutí, zotavování (obr. 1.14),
- po ukončení plastické deformace a odlehčení se změni následkem *pružné deformace* rozměry deformovaného tělesa (výlisky neodpovídají rozměrům tvářecích nástrojů).



Obr. 1.14 Diagram  $\sigma - \varepsilon$  při opětovném zatěžování

### 1.5.7 Zákon zpevnění

**Definice:** Při deformačních procesech pod rekryalizační teplotou převládá kluzový mechanismus deformace se zpevněním.


**Audio 1.14 Zákon zpevnění.**


Obecné vyjádření přirozeného deformačního odporu:

$$\sigma_p = f(\text{materiál}, \varphi, v_d, T) \quad (1.9)$$

kde jsou  $\varphi$  – logaritmičká deformace,  $v_d$  – deformační rychlost,  $T$  – teplota.

Při tváření zastudena s úplným zpevněním je přirozený deformační odpor:

$$\sigma_p = C \cdot \varphi^n \quad (\text{MPa}) \quad (1.10)$$

kde jsou  $C$  – konstanta pevnosti (MPa),  $\varphi$  – logaritmičká deformace,  $n$  – exponent deformačního zpevnění materiálu.

(Tento vztah neplatí, když je hodnota deformační rychlosti tak velká, že vznikne *tepelný efekt*.)





Při vysokých teplotách s úplným odpevněním je vliv deformace zanedbatelný:

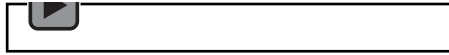
$$\sigma_p = C \quad (\text{MPa}) \quad (1.11)$$

### 1.5.8 Zákon tření

**Definice:** V procesu plastické deformace vzniká na styčných plochách mezi nástrojem a tvářeným materiálem aktivní nebo pasivní tření, které je definováno Coulombovým zákonem.



Audio 1.15 Zákon tření.



*Coulombův zákon:* smykové napětí na kontaktním povrchu:

$$\tau_t = f \cdot \sigma_n \quad (\text{MPa}) \quad (1.12)$$

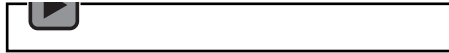
kde jsou  $f$  – součinitel smykového tření (-),  $\sigma_n$  – normálové napětí (MPa).

### 1.5.9 Zákon přídavných napětí

**Definice:** V procesu plastické deformace tělesa, která vede ke zvětšení nebo zmenšení jeho rozměrů, vznikají ve tvářeném tělese přídavná napětí, způsobující naopak zmenšení nebo zvětšení jeho rozměrů.



Audio 1.16 Zákon přídavných napětí.



Přídavná napětí vznikají vlivem nerovnoměrné deformace při tváření.

Jednotlivé vrstvy tvářeného materiálu nemohou měnit rozměry a tvar bez vlivu na vrstvy ostatní. V důsledku toho vznikají v tělese *vzájemně se vyrovnávající napětí*, které nelze zahrnout do okrajových podmínek nebo rovnic rovnováhy.

**Podle objemů, ve kterých se přídavná napětí vyrovnávají, se rozlišují:**

- vyrovnávající se mezi jednotlivými vrstvami tělesa,
- vyrovnávající se mezi jednotlivými krystaly,
- vyrovnávající se mezi jednotlivými elementy uvnitř krystalu.

**Vliv přídavných napětí:**

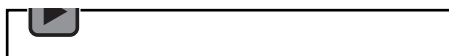
- zvětšují odpor kovu proti deformaci,
- způsobují změnu schémat hlavních napětí,
- mohou porušit celistvost materiálu vytvářením mikrotrhlin i makrotrhlin,
- po skončení deformace mohou zůstat v tělese ve formě zbytkových napětí (ta způsobují snížení tvárnosti, chemické odolnosti, deformaci hotových výrobků).

### 1.5.10 Zákon podobnosti

**Definice:** Při plastické deformaci dvou těles, která splňují podmínky geometrické, mechanické a fyzikální podobnosti platí, že poměr deformačních prací je roven třetí mocnině poměru lineárních rozměrů, poměr deformačních sil je roven druhé mocnině poměru lineárních rozměrů, měrný deformační odpor, tedy měrný tlak, je shodný.



Audio 1.17 Zákon podobnosti.



**Matematické vyjádření zákona:**



$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_1}{V_2} = a^3 \quad (1.13)$$

kde jsou  $A_1$  – deformační práce u prvního tělesa,  $A_2$  – deformační práce u druhého tělesa,  $V_1$  – objem prvního tělesa,  $V_2$  – objem druhého tělesa,  $a$  – lineární rozměr tělesa.

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2} = a^2 \quad (1.14)$$

kde jsou  $F_1$  – deformační síla u prvního tělesa,  $F_2$  – deformační síla u druhého tělesa,  $S_1$  – plocha prvního tělesa,  $S_2$  – plocha druhého tělesa,  $a$  – lineární rozměr tělesa.

#### Geometrická podobnost:

- *poměr objemů* je roven třetí mocnině poměrů lineárních rozměrů

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{b_1}{b_2} \cdot \frac{l_1}{l_2} = a \cdot a \cdot a = a^3 \quad (1.15)$$

kde jsou  $V_1$  – objem prvního tělesa,  $V_2$  – objem druhého tělesa,  $h_1$  – výška prvního tělesa,  $h_2$  – výška druhého tělesa,  $b_1$  – šířka prvního tělesa,  $b_2$  – šířka druhého tělesa,  $l_1$  – délka prvního tělesa,  $l_2$  – délka druhého tělesa,  $a$  – lineární rozměr tělesa.

- *poměr ploch* je roven druhé mocnině poměrů lineárních rozměrů

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{b_1}{b_2} = a \cdot a = a^2 \quad (1.16)$$

kde jsou  $S_1$  – plocha prvního tělesa,  $S_2$  – plocha druhého tělesa,  $h_1$  – výška prvního tělesa,  $h_2$  – výška druhého tělesa,  $b_1$  – šířka prvního tělesa,  $b_2$  – šířka druhého tělesa,  $a$  – lineární rozměr tělesa.

#### Mechanická podobnost:

- stálost poměru odpovídajících sil ke čtverci rozměrů i rovnost odpovídajících měrných tlaků,
- stejnou velikost koeficientu tření na dotkových plochách,
- stejnou velikost a směry hlavních os napětí v odpovídajících bodech srovnávaných těles.

#### Fyzikální podobnost:

- stejné chemické složení, struktura a fázový stav srovnávaných těles,
- stejná deformační rychlost,
- stejná teplota při deformaci tělesa,
- podobně rozložená napětí ve srovnávaných tělesech.



## 2 K JAKÝM ZKUŠEBNÍM OTÁZKÁM SE TATO PŘEDNÁŠKA VZTAHUJE:

1. Pro jaké materiály je vhodná technologie tváření? Jak vzniká polyedrický tvar zrn kovu? V čem spočívá mozaiková struktura krystalů kovů?
2. Jaký je rozdíl mezi jednoduchým a složitým kluzem v krystalových mřížkách? Jaké jsou základní předpoklady pro existenci plastické deformace difúzí?
3. Jaký typ krystalové mřížky má Fe? Jaký je vliv obsahu uhlíku na vlastnosti ocelí? Proč má jemnozrná struktura větší deformační odpor a zpravidla nižší plastičnost než hrubozrná struktura?
4. Jaký je princip zotavení materiálu? Za jakých podmínek a jakým způsobem probíhá rekrytalizace struktury?
5. Jaké jsou základní rozdíly mezi technologiemi tváření zastudena a zatepla? Vysvětlete křivky zpevnění, nakreslete je pro ocel a vysvětlete jejich průběh.
6. Jak ovlivňuje tření na styčných plochách nástroje s materiálem průběh plastické deformace? Rozeberte vliv stavu napjatosti na tváritelnost a deformační odpor, popište mechanická schémata deformací a napětí.
7. Jaký je vliv rychlosti deformace na plastickou deformaci?
8. Uveďte základní zákony plastické deformace a ke každému jeho stručný popis.
9. Uveďte zákon stálosti objemu. Jak se dá zapsat pomocí hlavních logaritmických deformací? Ve kterých případech zákon stálosti objemu neplatí zcela?
10. Objasněte zákon nejmenšího odporu. Jak se zákon nejmenšího odporu uplatňuje při zápusťkovém kování?
11. Vysvětlete zákon závislosti deformace na napět'ovém stavu.
12. V čem je podstata zákona stálosti potenciální energie na změnu tvaru?
13. Vysvětlete zákon smykových napětí.
14. Popište zákon pružného odlehčení.
15. Uveďte zákon zpevnění. Co je jeho příčinou?
16. V čem spočívá zákon tření?
17. Objasněte zákon přídavných napětí. Jaký mají přídavná napětí vliv na deformované těleso? Znáte nějaké způsoby snížení přídavných napětí?
18. Uveďte zákon podobnosti. Jaké podmínky musí být splněny, aby tento zákon při tváření určitého tělesa platil?



### 3 DOPLŇUJÍCÍ ZDROJE – KNIHY, INTERNET, ...

- [1] BŘEZINA, R. Technologie I – část 1: skriptum. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1998. 80 s. ISBN 80-7078-439-3.
- [2] PETRŽELA, Z., KUČERA, J. a BŘEZINA, R. Technologie slévání, tváření a svařování: skriptum. 2. vyd. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1987. 329 s. (bez ISBN).
- [3] BŘEZINA, R. a ČADA, R. Speciální technologie – technologie tváření: skriptum. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě, 1992. 257 s. ISBN 80-7078-122-X.
- [4] SILBERNAGEL, A. Nauka o materiálu I: skriptum. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě, 1982. 331 s. (bez ISBN).
- [5] BLAŠČÍK, F. a kol. Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarania. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1988. 832 s. (bez ISBN).
- [6] KOLLEROVÁ, M. Tvárnenie kovov: skriptum. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1984. 288 s. (bez ISBN).
- [7] ČABELKA, J. a kol. Mechanická technológia. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo SAV, 1967. 1036 s. (bez ISBN).
- [8] STOROŽEV, M. V. a POPOV, J. A. *Teória tvárnenia kovov*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1978. 488 s. (bez ISBN).



## 4 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BŘEZINA, R. Technologie I – část 1: skriptum. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1998. 80 s. ISBN 80-7078-439-3.
- [2] PETRŽELA, Z., KUČERA, J. a BŘEZINA, R. Technologie slévání, tváření a svařování: skriptum. 2. vyd. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1987. 329 s. (bez ISBN).
- [3] BŘEZINA, R. a ČADA, R. Speciální technologie – technologie tváření: skriptum. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě, 1992. 257 s. ISBN 80-7078-122-X.
- [4] SILBERNAGEL, A. Nauka o materiálu I: skriptum. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě, 1982. 331 s. (bez ISBN).
- [5] STOROŽEV, M. V. a POPOV, J. A. *Teória tvárnenia kovov*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1978. 488 s. (bez ISBN).

