

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Změna mechanických vlastností kovaného profilu
Aleš Kejdana

Bakalářská práce

2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Aleš KEJDANA**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**
Název tématu: **Změna mechanických vlastností kovaného profilu**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popis technologie výroby materiálů tvářením, změny mechanických vlastností
2. Metody charakterizace mechanických vlastností, metalografie
3. Příprava vzorků, analýza
4. Závěr

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Ptáček L.: Nauka o materiálu I., II., CERM Brno, 2001
2. Čudakov E. A. a kol.: Technologie strojírenské výroby III. Průmyslové vydavatelství, Praha, 1952
3. Drastík F., Dobrovolný B.: Kovářská abeceda. Práce, Prana, 1952

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Švanda, Ph.D.

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce: **26. února 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2010**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Přelouči dne 15.5.2010

Aleš Kejdana

Poděkování

Na tomto místě bych velice rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Pavlu Švandovi, Ph.D. za jeho ochotný a vstřícný přístup. V neposlední řadě za cenné rady a připomínky, které mi poskytl během konzultací k této bakalářské práci a možnost realizace laboratorních měření v prostorách Univerzity Pardubice.

ANOTACE

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku technologie tváření materiálů a jím doprovázené změny mechanických vlastností. Dále je řešena problematika charakterizace mechanických vlastností a základy metalografie. Cílem práce je posouzení změny mechanických vlastností kovaného profilu, čemuž je věnována poslední kapitola této práce, kde je provedena analýza a rozbor tvrdosti vykováných profilů.

KLÍČOVÁ SLOVA

tváření, mechanické vlastnosti, mechanické zkoušky, metalografie

TITLE

Change of Mechanic Properties of Forged Profile

ANNOTATION

Bachelor's work is focused on forming technology materials and forming materials. Main target is accompanied with changes of mechanical properties. The work is devoted to characterization of mechanical properties and metallography of forming steel profiles. This work is aims to assess changes of the mechanic properties of forged profile as compared to machined profile. The last chapter of this work analyzes (and compares) hardness and microstructures of forged and chip machined profiles.

KEYWORDS

Forging, Mechanic Properties, Mechanical Testing, Metallography

Obsah

Úvod.....	8
1 Technologie tváření kovů.....	9
1.1. Podstata tváření.....	9
1.2. Struktura kovů a poruchy krystalové mřížky.....	9
1.2.1. Stavba atomu a jeho vazby.....	10
1.2.2. Základy krystalografie.....	11
1.2.3. Poruchy krystalové struktury.....	12
1.2.4. Zotavení a rekystalizace.....	14
1.3. Plastická deformace kovů.....	14
1.3.1. Zákony plastické deformace.....	14
1.3.2. Mechanismy plastické deformace.....	15
1.4. Rozdělení technologických tvářecích procesů.....	16
1.4.1. Podle teploty.....	16
1.4.2. Podle tepelného efektu.....	18
1.4.3. Podle stupně deformace.....	18
1.4.4. Podle působení vnějších sil.....	19
1.5. Technologie objemového tváření – přehled.....	19
1.5.1. Válcování.....	19
1.5.2. Kování.....	20
1.5.3. Tažení.....	22
1.5.4. Protlačování.....	23
1.6. Technologie plošného tváření – přehled.....	23
1.6.1. Stříhání.....	23
1.6.2. Ohýbání.....	24
1.6.3. Rovnání.....	24
1.6.4. Tažení.....	25
1.6.5. Nekonenční metody.....	25
2 Metody charakterizace mechanických vlastností, metalografie.....	26
2.1. Mechanické vlastnosti.....	26
2.2. Mechanické zkoušky.....	27
2.2.1. Základní rozdělení mechanických zkoušek.....	27
2.2.2. Zkoušky pevnosti.....	28
2.2.3. Zkoušky tvrdosti.....	33
2.3. Metalografie.....	35
3 Příprava vzorků a analýza.....	38
3.1. Zkoušky mikrotvrdosti.....	39
3.1.1. Zkouška mikrotvrdosti kovaného a broušeného vzorku.....	39
3.1.2. Zkouška mikrotvrdosti žíhaných vzorků.....	41
3.1.3. Zkouška mikrotvrdosti kalených vzorků.....	43
3.2. Ohybová zkouška.....	45
3.3. Analýza struktury.....	47
3.3.1. Kovaný a broušený vzorek bez tepelného zpracování.....	47
3.3.2. Žíhané vzorky.....	48
3.3.3. Kalené vzorky.....	48
Závěr.....	50
Seznam obrázků.....	52
Seznam tabulek.....	54
Použitá literatura.....	55

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá tvářením. Tímto technologickým procesem dokážeme vyrábět velice tvarově i rozměrově přesné výrobky, dosahující vlivem tvářením lepších mechanických a fyzikálních vlastností. Na základě tohoto tvrzení, se kterým se v literatuře často setkáváme, vznikla i tato práce, prostřednictvím které se pokusíme ověřit již zmiňované zlepšení mechanických vlastností tvářeného materiálu.

V úvodu se studie zabývá vlastním popisem tvářením. Je zde nastíněna hlavní podstata tvářením, předpoklady, možnosti rozdělení a v neposlední řadě i popis jednotlivých tvářecích postupů, které se v praxi běžně používají.

Následně se práce zaměřuje na základní mechanické vlastnosti materiálu a metody jejich posuzování. Znalost mechanických vlastností je totiž jedním z rozhodujících faktorů, na základě něhož se rozhodujeme o použití daného materiálu pro řešenou problematiku. Kapitola nastiňuje základní přehled převážně destruktivních mechanických zkoušek (s výjimkou měření tvrdosti), sloužících pro stanovení mechanických vlastností materiálu. Některé popsané metody jsou posléze použity v praktické části práce.

Jak již samotný název napovídá, hlavním úkolem práce je posoudit vliv tvářením na mechanické vlastnosti materiálu. V praktické kapitole se zabýváme především laboratorními měřeními na zkušebních vzorcích. Předmětem měření jsou různě tepelně zpracované vzorky kované a nekované. Z hlediska omezeného počtu zkušebních vzorků provádíme zkoušku ohybovou a mikrotvrdosti. Zkouška mikrotvrdosti je v tomto případě velice efektivní a pro naše měření přesná. Při jednotlivých zkouškách posuzujeme, jak se základní mechanické vlastnosti vzorků mění, případně nemění, z čehož vyvodíme příslušné závěry.

1 Technologie tváření kovů

1.1. Podstata tváření

Technologický proces, jehož základem jsou velké plastické deformace, nazýváme tváření. Tyto deformace umožňují plastické vlastnosti kovů díky své krystalové struktuře a dochází při nich nejen ke změně tvaru a rozměru, ale i ke změnám vlastností výchozího polotovaru. Pro vznik plastické deformace je nutný vnější silový účinek, pomocí něhož vznikne v tělese potřebný stav napjatosti, nutný pro překročení požadované meze kluzu materiálu. Vzniká tak trvalá deformace požadovaného směru a velikosti a to bez porušení soudržnosti materiálu. Tento děj je provázen řadou fyzikálních a strukturních změn, které ovlivňují i mechanické vlastnosti materiálu. Výsledkem je tedy trvalá změna tvaru, rozměrů a vlastností tvářeného materiálu. [6]

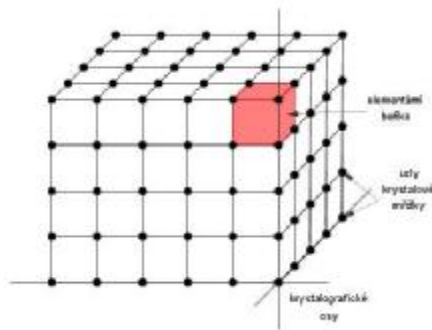
Mezi hlavní přednosti tváření kovů patří možnost výroby většího množství kusů (např. sériová výroba) a vysoká produktivita výrobního procesu. Při tváření kovů se předpokládá, že objem tělesa se nemění, teoreticky tak nedochází ke ztrátám materiálu. Proto mezi další výhody patří také hospodárné využití kovu. Materiál vlivem tváření zlepšuje svou strukturu a vlastnosti. V neposlední řadě lze také uvést, že vlivem tváření se zvýší životnost a sníží hmotnost součástí. Hlavní nevýhodou jsou omezené rozměry konečného výrobku, vysoká cena strojů a nástrojů. [5]

1.2. Struktura kovů a poruchy krystalové mřížky

Tváření kovů spočívá v jejich schopnosti snášet velké plastické deformace bez porušení soudržnosti. Tato vlastnost kovu vyplývá z jeho krystalického uspořádání, resp. z krystalické struktury kovu. Převážná většina kovů (s výjimkou rtuti a vodíku) se při atmosférických podmínkách a teplotě okolí 20 °C vyskytuje v podobě tuhých a krystalických látek.

Krystalické látky jsou charakteristické svou krystalovou strukturou. Strukturou rozumíme uspořádání určitých stavebních jednotek v prostoru. Lze tedy říct, že se jedná o určitý způsob, kterým jsou rozmístěny základní stavební částice krystalu.

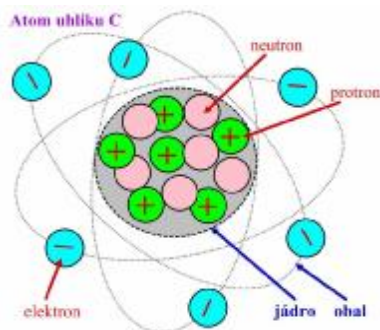
Krystalová struktura kovu je tvořena jednotlivými krystaly, které vznikají při krystalizaci látky. Každý krystal se skládá z v prostoru pravidelně se opakujících základních krystalových buněk, jejichž základem je soubor atomů (viz. Obrázek 1). [5]



Obrázek 1 - Stavba krystalu [12]

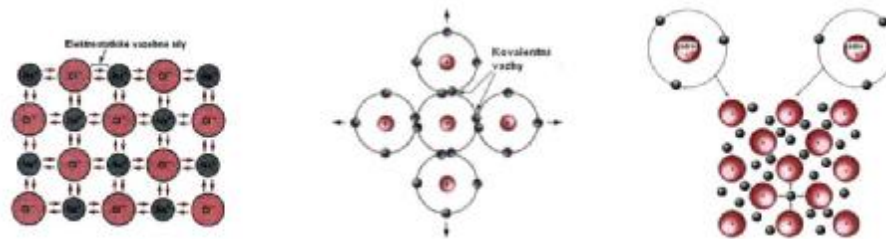
1.2.1. Stavba atomu a jeho vazby

Částičky hmoty, které již nelze pomocí chemických metod dále rozdělit, se nazývají atomy (viz. Obrázek 2). Každý atom je tvořen elektronovým obalem a atomovým jádrem. Uvnitř tohoto jádra se nacházejí částice, které souhrnně označujeme jako nukleony. Jedná se o protony, které nesou kladný náboj a neutrony, které nejsou elektricky nabité. Celkové jádro pak nese kladný elektrický náboj. Další částí atomu je elektronový obal, obklopující atomové jádro. Uvnitř tohoto obalu se pohybují elektricky záporně nabitě částice – elektrony. Celý obal je záporně nabit. Elektrony v elektronovém obalu krouží v několika vrstvách. Tyto vrstvy tvoří tzv. orbity (dráhy), po nichž se elektrony pohybují. Nutno podotknout, že elektrony se při svém krouživém pohybu po orbitu zároveň otáčejí kolem své osy – tj. mají svůj spin.



Obrázek 2 - Stavba atomu [13]

Výskyt volných atomů je velice ojedinělý. V převážné většině případů se atomy seskupují do složitějších útvarů (např. molekul nebo iontů) pomocí soudržných sil, které působí mezi částicemi. Tyto síly se často označují jako vazebné síly elektrostatického původu. Říkáme, že mezi částicemi existuje chemická vazba, která umožní propojení atomů ve složitější útvary. Rozlišujeme tři základní vazby mezi atomy: vazbu iontovou, kovalentní a kovovou.



Obrázek 3 - Iontová, kovalentní a kovová vazba [14]

Iontová vazba

Jedná se o nejjednodušší vazbu mezi atomy, jejíž základem je elektronická přitažlivost mezi elektropozitivními a elektronegativními ionty. Vznikne v případě, kdy jeden nebo více vazebních elektronů přejde do valenční sféry jiného atomu. [5]

Kovalentní vazba

Tato vazba je nejsilnější z chemických vazeb a je založena na sdílení elektronů. Dvojice neutrálních atomů má společné dvojice valenčních elektronů. Atomy své valenční elektrony sdílejí a lze jen velice obtížně určit, kterému atomu v určitém čase elektron náleží. Vznik této vazby lze vysvětlit teorií spočívající v překryvu valenčních orbitalů. [5]

Kovová vazba

Podstatou kovové vazby, nejdůležitější vazby kovů, je představa kationtů obsazujících uzlové body strukturní mřížky. Jejich valenční elektrony se pohybují volně jako plyn a v tomto důsledku vznikají vazebné síly. Pohyb volných elektronů je řízen pomocí přesných kvantových pravidel. [5]

Ostatní druhy chemických vazeb

Existují i další druhy vazeb, které jsou pro kovy a jejich slitiny nepodstatné. Zařazují je jen pro informaci a doplnění. V literatuře se označují jako tzv. vazby sekundární a jedná se o vazbu vodíkovou a van der Waalsovu.

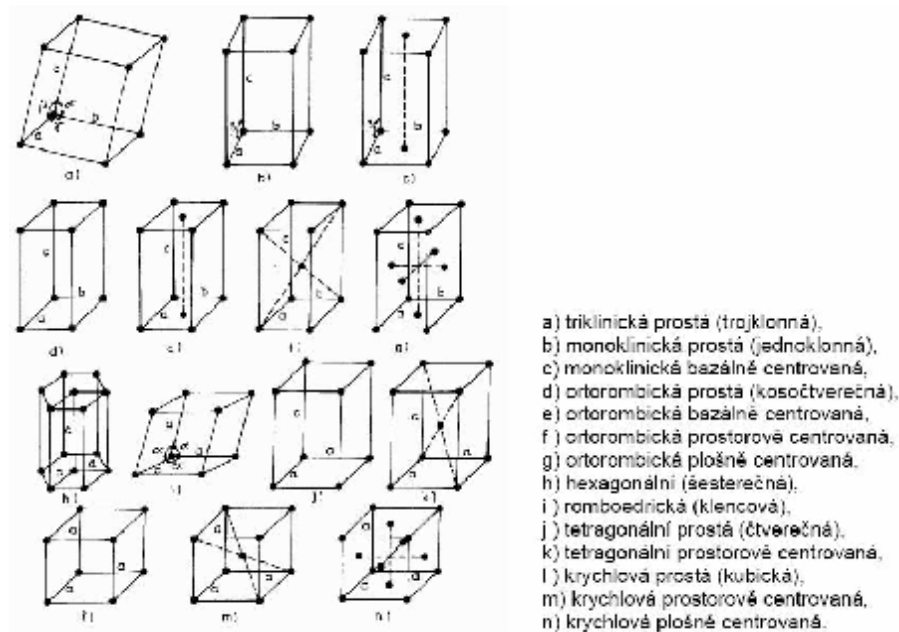
Na závěr této podkapitoly je nutné uvést, že předešlé typy vazeb jsou ideálními mezními případy. V praxi dochází k překrývání jednotlivých vazeb. Skutečné pevné látky jsou tvořeny z více druhů vazeb, jejichž určení a druh lze jen obtížně stanovit.

1.2.2. Základy krystalografie

Základem krystalické struktury technických materiálů jsou krystaly. Každý krystal je složen z krystalových buněk. V literatuře se často uvádí termín elementární buňky. Představit si ji můžeme jako soubor atomů, který se dokáže pro stejnou krystalickou látku

a za stejných termodynamických podmínek poskládat v prostoru stejným způsobem. Tím vzniká stejný prostorový útvar.

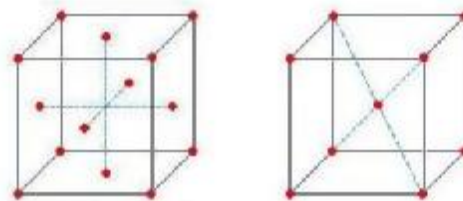
Opakováním elementární buňky v prostoru vznikne krystalická mřížka. Každá látka má svůj charakteristický tvar vycházející ze sedmi krystalografických soustav (trojklonná, jednoklonná, kosočtverečná, čtverečná, krychlová, šesterečná a romboedrická). Pro každou podtřídu existují další podtřídy. Všechny krystalografické třídy mohou mít prostorově, bazálně a plošně centrované podtřídy (viz Obrázek 4). [5]



Obrázek 4 - Krystalografické struktury [15]

Převážná většina technicky používaných kovů krystalizuje v soustavě (viz.Obrázek 5):

- krychlově plošně středěné,
- krychlově prostorově středěné.



Obrázek 5 - Soustava krychlová plošně a prostorově středěná [15]

1.2.3. Poruchy krystalové struktury

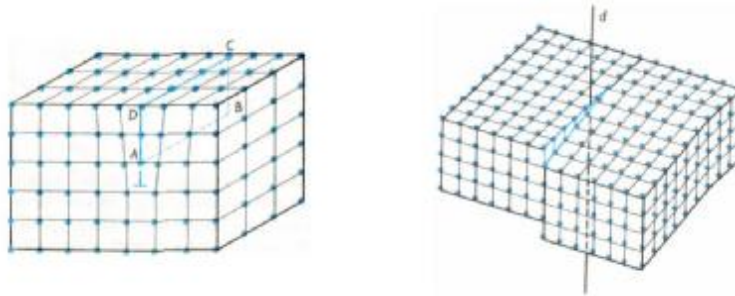
V reálných kovech není stavba krystalové mřížky ideální (dokonalá). Ve skutečnosti mají reálné krystaly řadu odchylek od přísné pravidelnosti uspořádání své struktury. Každá nedokonalost v krystalické mřížce ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti kovu.

Rozlišujeme následující mřížkové poruchy:

- bodové poruchy (vakance, interstice, substituce),
- čárové poruchy (hranové, šroubové, kombinované) (viz.Obrázek 6),
- plošné poruchy (vrstvené vady, hranice zrn, subzrn, dvojčatní),
- prostorové poruchy (hranice krystalů, vměšky, amorfni částice). [10]

Čárové poruchy – Dislokace

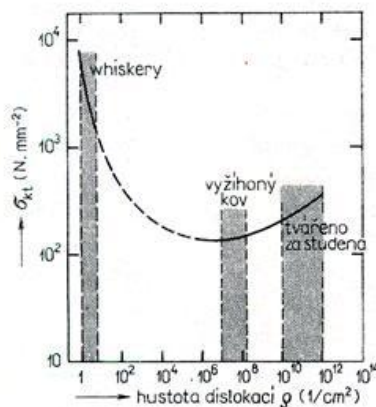
Čárové poruchy se netýkají jednoho bodu mřížky, ale celé roviny a mají největší vliv a význam z hlediska teorie plastických přetvoření. Proto jim bude v následujícím textu věnována větší pozornost. Dislokace rozlišujeme hranové nebo šroubové, resp. kombinované.



Obrázek 6 - Hranová a šroubová dislokace [16]

Dislokace vznikají v ideálním krystalu vlivem vnějších podmínek. V podstatě se jedná o posun jedné atomové roviny vůči ostatním rovinám a definována je jako porucha krystalového rozhraní mezi posunutou a neposunutou částí krystalu.

Pevnost kovu je ovlivněna hustotou dislokací. Silným tvářením dochází ke zvyšování počtu těchto dislokací, hustota tedy roste a s ní i odpor proti deformaci. Materiál dosahuje vyššího zpevnění. S čistotou kovu počet dislokací výrazně klesá (viz.Obrázek 7). [10]



Obrázek 7 - Hustota dislokací [10]

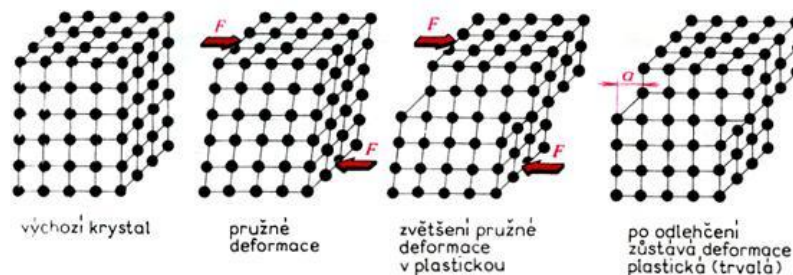
1.2.4. Zotavení a rekrytalizace

V problematice tváření se setkáváme s termíny zotavení a rekrytalizace. Zotavením rozumíme zánik mřížkových deformací a napětí. Zvýšením teploty materiálu s určitou texturou se zrna materiálu snaží natočit do původního stavu. Výsledkem je snížení vnitřního pnutí. Pod pojmem rekrytalizace se skrývá vznik nových zárodků a růstových zrn s rostoucí teplotou. Struktura materiálu je pak bez vnitřního pnutí a deformačního zpevnění. Oba zmíněné děje nastávají po tváření kovu za studena, kdy je kov značně strukturně nestálý. [10]

Teplota, při níž k rekrytalizaci dochází, se pohybuje v rozmezí 35 až 40 % teploty tání tvářeného kovu. Rekrytalizaci můžeme rozdělit do dvou fází. První fází je primární rekrytalizace, při níž vznikají zárodky nových krystalů. Druhou fází je sekundární rekrytalizace, při níž zárodky nových krystalů rostou a zpevnění zaniká. [10]

1.3. Plastická deformace kovů

Pokud vystavíme těleso působení vnější síly, může dojít k jeho deformaci. Deformací rozumíme změnu tvaru jeho krystalové mřížky. Rozlišujeme deformaci pružnou a plastickou (viz. Obrázek 8). Pružná deformace umožní návrat materiálu do původního stavu v případě, že zatěžující síla přestane působit. V naší problematice tváření kovů má však větší význam deformace trvalá (plastická), kdy těleso zůstane v požadovaném tvaru i v případě, že deformační síla přestala působit. V obou případech mluvíme o deformacích, při kterých nedochází k porušení soudržnosti materiálu. Překročením určité meze dojde ke vzniku trhlin a poškození tělesa – mluvíme o porušení. [10]



Obrázek 8 - Pružná a plastická deformace [10]

1.3.1. Zákony plastické deformace

Velikost plastické deformace je závislá na řadě faktorů (teplota, povaha zatěžování, chemické složení) a řídí se určitými zákony.

Zákon stálosti objemu

„Těleso pod vlivem vnější síly mění svůj tvar, tzn. tváří se. Pokud po odlehčení silového účinku získá opět původní tvar, jde o pružnou (vratnou) deformaci. Nestane-li se tak, je to plastická (trvalá) deformace. Celkovou deformaci lze pak vyjádřit součtem pružné a plastické deformace.“ [2]

Zákon nejmenšího odporu

„Částice kovu se při tváření přemísťují ve směru nejmenšího odporu, neboť je to energeticky nejvýhodnější.“ [2]

Zákon přídavných napětí

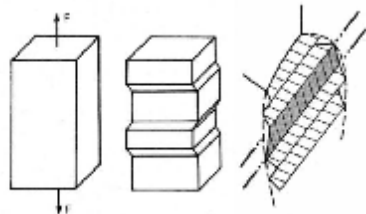
„Při každé plastické deformaci tělesa vznikají v oblastech zvětšujících své rozměry nad určitou střední hodnotu přídavná napětí tlaková a v oblastech zmenšujících své rozměry pod určitou střední hodnotu vznikají přídavná napětí tahová.“ [2]

Ve skutečnosti však k jistým objemovým změnám v tělese dochází. Tyto změny jsou natolik malé a nemají zásadní vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu, proto se mohou při určování rozměrů tělesa zanedbat. Zákon nejmenšího odporu říká, že největší deformace tělesa nastane ve směru, kde většina přemísťujících se bodů narazí na nejmenší odpor. Zákon přídavných napětí si můžeme vysvětlit tak, že vlivem tvárné deformace vzniknou v tělese přídavná napětí, která se vzájemně vyruší. Přídavná napětí ovlivňují hlavní napětí, zvyšují odpor proti deformacím a mnohdy napomáhají vzniku křehkosti.

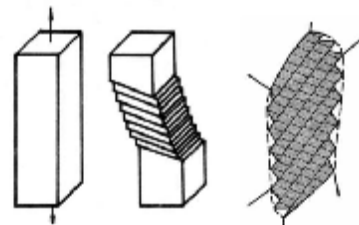
1.3.2. Mechanismy plastické deformace

Ke vzniku tvárné deformace dochází:

- skluzem,
- dvojčatěním.



Obrázek 9 – Skluz [10]



Obrázek 10 – Dvojčatění [10]

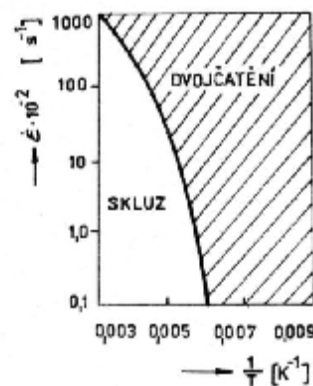
Plastická deformace se pokaždé rozvíjí mechanismem na základě zákona nejmenšího odporu, tedy mechanismem, jenž vyžaduje nejmenší napětí.

Skluz

Ke skluzu dochází pohybem dislokací ve skluzovém systému a to většinou v rovině nejhustěji obsazené atomy. Druh krystalové mřížky a počet poruch následně ovlivňuje rychlost tohoto pohybu. Jedná se o nejnámější a nejčastější mechanismus vzniku plastické deformace. Uvádí se, že velikost napětí, potřebného pro vznik pohybu dislokace, je přímo úměrná počtu poruch bránících pohybu. [10]

Dvojčatění

Dalším mechanismem, který vede ke vzniku plastické deformace, je dvojčatění. Ve starší literatuře se také uvádí termín mechanismu tvoření dvojníku. Hlavní uplatnění tohoto mechanismu se nachází zejména u kovů, jejichž krystalová mřížka je kubická plošně středěná a hexagonální těsně uspořádaná. Hlavními předpoklady výskytu mechanismu jsou vysoká rychlost deformace a nízká teplota (viz. Obrázek 11). [10]



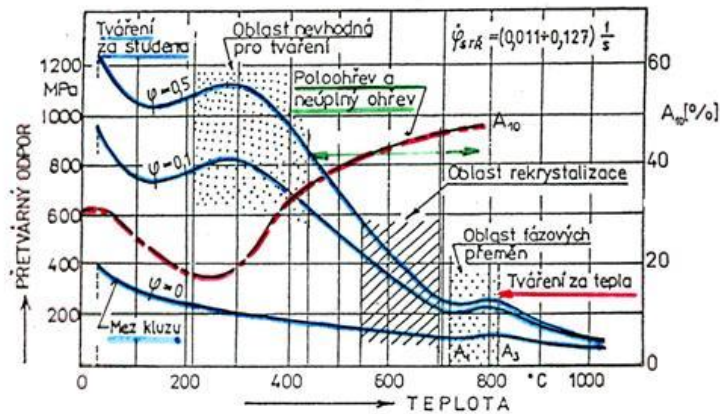
Obrázek 11 - Předpoklady výskytu mechanismu dvojčatění [10]

Podstata dvojčatění spočívá v otočení uzlů mřížky jedné části krystalu do polohy souměrné k druhé části krystalu. Jedna část krystalu se tak stává zrcadlovým obrazem jeho druhé části. Rovina zrcadlení se nazývá rovinou tvoření deformačního dvojčete. Pro vznik deformačního dvojčete je pak nutné v této rovině vytvořit napětí. Velikost tohoto napětí je závislá především na povaze krystalu, teplotě a rychlosti deformace.

1.4. Rozdělení technologických tvářecích procesů

1.4.1. Podle teploty

Každý kov klade určitý odpor vůči plastické deformaci. Tento odpor materiálu nazýváme přetvárným odporem, jehož velikost závisí na řadě parametrů. Jedním z těchto parametrů je teplota. Obecně platí, že se zvyšující se teplotou se zvyšují také plastické vlastnosti kovů, klíčové pro jejich tvařitelnost.



Obrázek 12 - Rozdělení tvářecích procesů dle teploty [10]

Rozdělením tvářecích procesů podle teploty je v podstatě myšleno rozdělení v závislosti teploty tvářeného materiálu a teploty rekrystalizace, při které dochází k obnově deformovaných zrn, která vznikají při tváření za studena, bez změny krystalové mřížky. Poté tedy rozlišujeme tváření za studena, polotepla a tepla (viz. Obrázek 12). [5]

Tváření za studena

Probíhá zpravidla pod teplotami uzdravovacích procesů. V literatuře se uvádí přibližně v okolí teploty 0.2 až $0.3 T$ (teploty tání tvářeného kovu). Na zmíněnou teplotu se tvářený materiál zahřeje vlivem deformací a tření mezi materiálem a nástrojem. Při tomto způsobu tváření vzniká v materiálu strukturní textura, kdy se zrna deformují ve směru tváření (viz. obr). Dochází také k navýšení vnitřní energie, hustoty čárových poruch (dislokací) a počtu mřížkových poruch. Výsledkem je zvýšení pevnosti a tvrdosti (roste mez pevnosti a kluzu) a snížení plasticity a houževnatosti (klesá tažnost). Opětovné tváření kovu je možné pouze po opakovaném zahřátí, kterým docílíme obnovy deformační schopnosti materiálu. Jako hlavní výhody tváření kovů za studena se uvádí vysoká přesnost rozměrů, kvalitní povrch a zlepšené mechanické vlastnosti materiálu. Hlavní nevýhodou jsou vysoké tvářecí síly a omezená tvárnost materiálu. Velikost deformace za studena je mnohem nižší a dosahuje maximálně $30 - 50 \%$ deformace materiálu jako u tváření za tepla. [5]

Tváření za polotepla

Způsob tváření za polotepla je určitým mezistupněm tváření za studena a za tepla. Probíhá v teplotním rozmezí od $0,3$ do $0,6 T$. Kloubí některé výhody obou metod. Materiál má pak lepší mechanické a fyzikální vlastnosti. Snižují se přetvárné odpory. Zvyšuje se přesnost a jakost povrchu materiálu. Nutno podotknout, že výsledkem tváření kovu za poloohřevu je také do jisté míry specifická struktura. (rekrystalizovaná a vláknitá) [5]

Tváření za tepla

Pro tvařitelnost za tepla jsou rozhodující deformační charakteristiky, které vyjadřují velikost odporu materiálu proti deformaci a schopnost měnit tvar přetvářeného materiálu, aniž by došlo k porušení soudržnosti v závislosti na teplotě a stupni deformace. Pomocí těchto deformačních charakteristik určujeme optimální rozmezí tvářecích teplot, při kterých je dosaženo maximální plasticity. Jak již název napovídá, tento způsob tváření probíhá při vysokých teplotách. Zpravidla při teplotách nad 0,6 až 0,7 T. Jedním z hlavních rozdílů, oproti tváření za studena, je potřeba mnohem menší působící síly. Tváření probíhá nad hodnotou rekrystalizační teploty, rychlost rekrystalizace je vysoká a zpevnění způsobené tvářením mizí. Materiál se tedy nezpevňuje a ke tváření stačí mnohem menší síly. Dalším charakteristickým znakem je vznik vláknité struktury, která výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu a anizotropii. [5]

1.4.2. Podle tepelného efektu

Tvářecí proces vyžaduje určité množství přivedené energie. Přivedená energie se však nevyužije celá pro tváření. V závislosti na odporu materiálu vůči deformaci a rychlosti deformace se určitá část přemění v teplo. Na základě odvodu vzniklého tepla můžeme tvářecí procesy rozdělit následovně:

- ***polytropické tváření*** (část tepla zůstává v materiálu a zbytek se odvede do okolí – jedná se o nejčastější způsob),
- ***adiabatické tváření*** (zvyšuje se teplota tvářeného kovu, neboť teplo zůstává v materiálu),
- ***izotermické tváření*** (teplota tvářeného kovu se nemění, protože se veškeré teplo odvádí do okolí). [10]

1.4.3. Podle stupně deformace

Tvářecí procesy lze mimo jiné také rozdělit z hlediska velikosti tlaku mezi nástrojem a materiálem. Jednoduše řečeno dle toho, jak velkou sílu je potřeba vytvořit pro dosažení požadované deformace:

- celkový tlak pro přetvoření mezi nástrojem a materiálem je malý, je potřeba malé síly pro dosažení deformace (volné kování),
- celkový tlak pro přetvoření mezi nástrojem a materiálem je velký, je potřeba velké síly pro dosažení deformace (zápustkové kování),

- celkový tlak pro přetvoření mezi nástrojem a materiálem je velmi vysoký, je potřeba značně velká síla pro dosažení deformace (protlačování). [10]

1.4.4. Podle působení vnějších sil

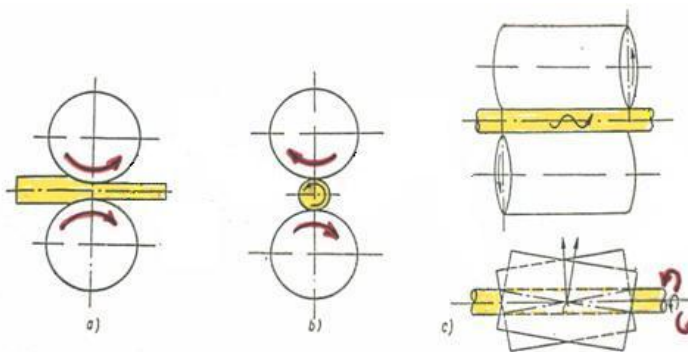
Tento způsob rozdělení tvářecích procesů je spíše praktického hlediska. Rozhodujícím faktorem je směr deformace. Pokud vzniká deformace ve směru všech tří os souřadného systému, mluvíme o objemovém tváření. Druhou možností je plošné tváření, kdy dochází k deformaci v rovině (ve dvou směrech).

1.5. Technologie objemového tváření – přehled

1.5.1. Válcování

Válcování je jedním ze způsobů objemového tváření, který se provádí jak za tepla, tak za studena. Tímto způsobem se zpracovává až 85 % oceli. Vznikají buď polotovary, určené pro kovárny a tažírny nebo vzniká přímo výrobek, popřípadě součást pro výrobu konstrukce. Tváření materiálu se provádí pomocí otáčejících se válců. Válce vytvářejí prostřednictvím tlaku na materiál tvářecí sílu, která způsobí deformaci – kov se tváří.

Vstupním polotovarem pro válcování je tzv. valcářský ingot, odlitý do kokily nebo kontislitek, který vzniká při kontinuálním (nebo polokontinuálním) lití. Polotovar se mezi otáčejícími válci, vlivem působící síly, deformuje – tváří. Hlavními znaky jsou snížení výšky a prodloužení doprovázené rozšířením.



Obrázek 13 - Válcování podélné (a), příčné (b) a kosé (c) [10]

Pro rozdělení způsobů válcování je rozhodující směr, kterým válcovaný materiál prochází pracovními válci. Z hlediska tohoto směru pak rozlišujeme válcování podélné, příčné a kosé (viz. Obrázek 13). [10]

1.5.2. Kování

Dalším způsobem tváření, kdy deformace tělesa probíhá ve všech třech směrech souřadného systému, je kování. Kování je jednou z nejstarších metod objemového tváření. V historii se setkáváme již po několik tisíc let s výrobou kovaných výrobků. Jelikož se praktická část této práce bude zabývat především výkovky, tvářeními právě metodou ručního kování, bude mu zde věnována větší pozornost.

Kování je technologický proces, prováděný za vysoké teploty. Jedná se o objemové tváření, kdy se zahřátý materiál tváří úderem nebo klidně působící silou. Při kování dochází k odstranění hrubé lící struktury a vad, které mají negativní vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu. Výkovek požadovaného tvaru je charakteristický pro svou příznivější mikro a makro strukturu. V neposlední řadě se zlepšují jeho mechanické a fyzikální vlastnosti. [10]

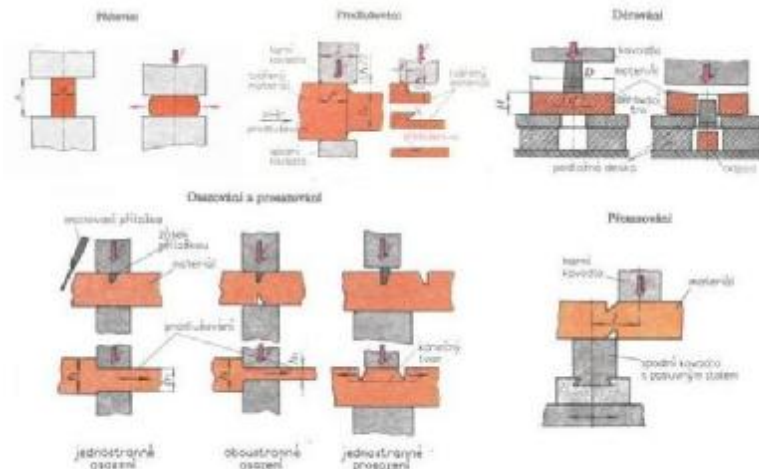
Rozlišujeme dva základní druhy kování – volné a zápustkové. Volné kování se provádí většinou na kovadlině (různého druhu) a materiál se nejvíce šíří ve směru kolmém k působící síle. Naopak při zápustkovém kování je tvar výkovku přesně ohraničen zápustkou. Můžeme si ji představit jako určitou formu, nejčastěji dvoudílnou, do níž se kovaný materiál tlakem vtlačuje. [3]

Volné kování

Volné kování lze dále rozdělit na strojní kování pomocí tvarových nebo rovných kovadel, která se upevní v bucharu nebo lisu, a na kování ruční, kdy je vrchním kovadlem kovářské kladivo a spodním kovadlem kovadlina.

Ruční kování

Tímto způsobem se tváří především menší části. S kovaným kusem se dá snadno manipulovat a pro tváření kovu postačí kovářem ovládané kladivo (popřípadě dvě). Při ručním kování jsou rozhodující především zkušenosti a zručnost kováře. Tvářet materiál lze často jen jednou a po provedené operaci již nedokážeme vzniklé změny vrátit. Proto je velice důležitá znalost základních zákonů kování a užívání základních kovářských operací.



Obrázek 14 - Přehled základních kovářských operací [10]

Kovář tváří materiál, zahřátý v kovářské výhni, na kovadlině. Kovadlina musí být uložena na pevném podkladu. Existuje řada druhů kovadlin (anglická, německá, či francouzská). Nejpoužívanější je u nás kovadlina s jedním rohem kulatým a druhým čtyřhranným. Kovář pracuje s kladivem, které drží v jedné ruce. Pomocí nástrojů pak provádí základní kovářské operace (viz. Obrázek 14) (kování do délky, osazování, sekání, děrování, přechování, svařování, ohýbání). [3]

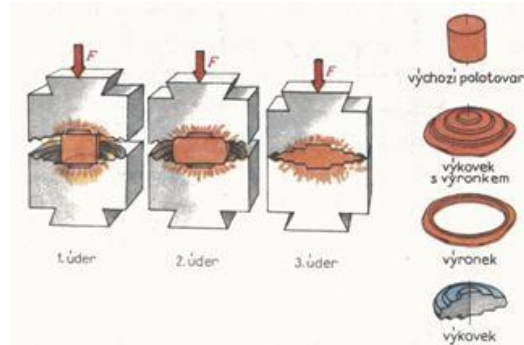
Strojní kování

Pro strojní kování se používá především bucharů, které působí na materiál pomocí rázů, a lisů, působících na materiál rovnoměrným tlakem. Výkovek bucharu je prokovan do určité hloubky, na rozdíl od výkovku lisu, který se přetvoří v celém svém průřezu. Kovací operace jsou analogické s ručním kováním s tím rozdílem, že kování provádí stroje – lisy nebo buchary. [3]

Zápustkové kování

Na rozdíl od volného kování, umožňuje zápustkové kování sériovou výrobu. Jedná se tedy o způsob, jakým můžeme kovat velké množství tvarově stejných součástí. Ke tváření dochází v dutině zápustky (viz. Obrázek 15). Zápustka má totožný tvar s tvarem výkovku. Vlivem zmenšení chladnouceho výkovku jsou však její rozměry zvětšeny. Výchozí polotovár se zahřeje, vloží do dutiny zápustky a následně se tváří vlivem působení tvářecího stroje. Jako tvářecí stroje se používají buchary a lisy. Základní rozdíl je v silovém působení (jak již bylo zmíněno v předchozím textu), buchar působí prostřednictvím rázů. Zápustka je zaplňována postupně, prostřednictvím několika úderů beranu. Lis naopak působí klidným tlakem a výkovek tak vzniká při jednom zdvihu. Nejčastěji se takto kovají velké série výkovků

jednoduššího tvaru. Při kování složitějších tvarů se používá postupová zápusťka. Pro dokonalé vyplnění dutiny zápusťky a pojmání přebytečného materiálu pak slouží výronek, který se následně odstraňuje odstřížením. [10]



Obrázek 15 - Princip zápusťkového kování [10]

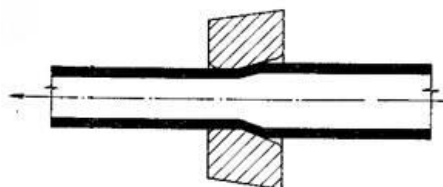
Mezi hlavní výhody zápusťkového kování tedy patří hromadná výroba, vysoká výkonnost a snadná obsluha.

Speciální způsoby kování

V současné době existuje řada speciálních způsobů kování, jejichž použití přináší řadu výhod. Přesné kování umožňuje, jak již název napovídá, kovat výkovky s minimálními přídávky. Vysoké přesnosti se také dosahuje pomocí vícecestného kování. Na materiál v zápusťce působí tlak z více směrů. Další metodou je kování na vodorovných kovacíh strojích, která zajistí do jisté míry úplnou automatizaci výrobního procesu. [10]

1.5.3. Tažení

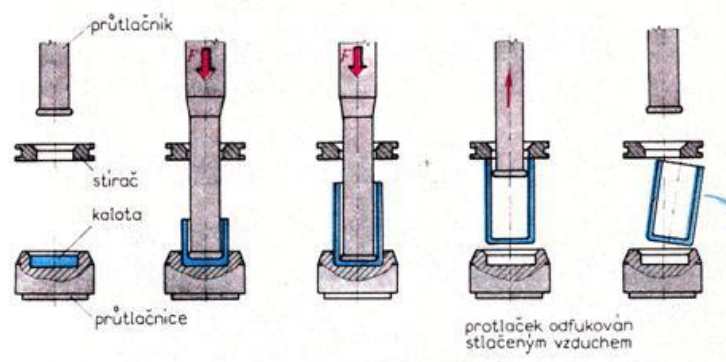
Rozhodujícím faktorem pro tento způsob objemového tváření je pevnost daného materiálu. Výchozím polotovarem jsou např. tyče válcované za tepla. Tažení se provádí za studena a dochází při něm k výraznému prodloužení materiálu ve směru zatěžování. Ve smyslu platnosti zákona o stálosti objemu se zmenšuje průřez materiálu. Hlavní podmínkou pro tažení je mazání. Prostřednictvím maziva se snižuje součinitel tření, odděluje polotovár od průvlaku, odvádí teplo a zajišťuje hladký povrch. Celkovým efektem je pak snížení vnitřního pnutí. Tímto způsobem se vyrábějí především dráty a tyče dutého i plného průřezu. (viz. Obrázek 16) [10]



Obrázek 16 - Princip objemového tažení [10]

1.5.4. Protlačování

Při této tvářecí technologii se nástroj označuje jako tváředlo a výrobek protlaček. Jedná se o poslední technologii objemového tváření, která může být prováděna za tepla, polotepla a i studena. Materiál se vlivem působící síly deformuje do předem stanoveného směru. Získává lepší mechanické vlastnosti. Protlačky jsou rozměrově velice přesné a nemusí se dále již upravovat (viz. Obrázek 17). [10]



Obrázek 17 - Princip objemového protlačování [10]

Dle směru pohybu materiálu můžeme protlačování rozdělit na několik druhů:

- dopředné protlačování (Pohyb průtlačníku je stejný jako pohyb tvářeného materiálu. Tímto způsobem se vyrábí především součásti s proměnlivým průřezem, např. čepy a šrouby.),
- zpětné protlačování (Materiál se pohybuje v opačném směru. Výroba především dutých součástí.),
- kombinované protlačování (Kombinuje předešlé dva způsoby. Materiál se pohybuje v obou směrech. Používá se především pro výrobu velice namáhaných součástí.),
- stranové a radiální protlačování (V případě, kdy se tvářený materiál pohybuje kolmo na směr pohybu průtlačníku, mluvíme o stranovém protlačování. Při radiálním protlačování se části nástroje i materiál pohybují kolmo k ose materiálu, v radiálním směru.). [10]

1.6. Technologie plošného tváření – přehled

1.6.1. Stříhání

Tento způsob se od ostatních trochu odlišuje. Princip spočívá v žádoucím porušení materiálu (viz. Obrázek 18) Jedná se o velice používaný způsob pro výrobu polotovarů (tabulí a profilů), pro další technologie (ohýbání, protlačování) i pro výrobu součástek ke konečnému

použití. Stříhání může probíhat za studena (měkkí oceli a plechy) a nebo za tepla (tvrdší materiály). Nástrojem pro stříhání je střížník (nůž) a podle jeho konstrukce můžeme stříhání rozdělit na stříhání rovnoběžnými, skloněnými, kotoučovými noži a noži na profily a tyče. [10]



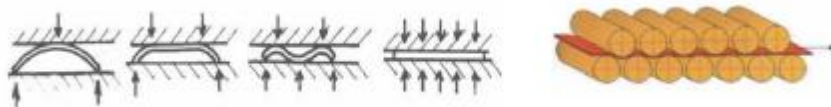
Obrázek 18 - Princip stříhání [10]

1.6.2. Ohýbání

Proces, kdy materiál záměrně deformujeme do požadovaného úhlu, nazýváme ohýbání. Jedná se o metodu plošného tváření, kde hlavním nástrojem pro ohýbání je tzv. ohýbadlo. Ohýbadlo se skládá z ohybnice a ohybníku. Výrobek nazýváme ohybkem. Pro tuto metodu je rozhodující mez kluzu materiálu. Při překročení této meze vzniká plastická deformace a těleso je tak možno ohnout do požadovaného tvaru. Z hlediska použitého stroje můžeme ohýbání rozdělit na ruční, pomocí lisů a nebo na válcích. Další způsoby rozdělení jsou např. podle poloměru zakřivení (malý a velký poloměr) nebo podle technologického způsobu výroby. [10]

1.6.3. Rovnání

Na rozdíl od ohýbání, kde se materiál záměrně deformoval do požadovaného úhlu, u rovnání je situace jiná. Při rovnání se naopak deformovaný materiál snažíme vyrovnat a odstranit tak vzniklou deformaci. Nejčastěji se rovnání provádí pomocí lisu. Lis vyvodí na deformovaný materiál určitý tlak prostřednictvím čelistí nebo válců (princip opakovaného prohýbání) (viz. Obrázek 19). Pro rovnání velice tenkých materiálů se používá bodové nebo bradavkové rovnání. Nepůsobí se tak na celý objem tělesa, ale pouze na určité pravidelně rozložené části (viz. Obrázek 20). [10]



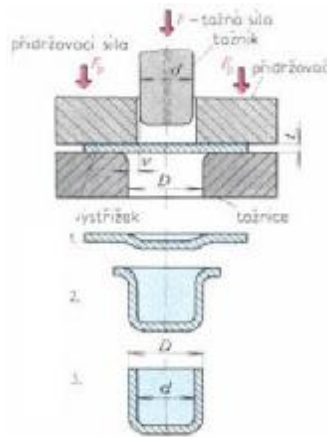
Obrázek 19 - Princip rovnání materiálu pomocí čelistí (a) a válců (b) [10]



Obrázek 20 - Bradavkové rovnání materiálu [10]

1.6.4. Tažení

Při tažení je nástrojem tažidlo, skládající se z tažníku a tažnice (viz. Obrázek 21). Výstupem při tažení je výtáček. Charakterizovat výtáček můžeme jako duté těleso, vyrobené tažením z rovinného plechu. Jelikož v mnohých případech dochází k velkému přetvoření, provádí se tažení většinou ve více krocích. [10]



Obrázek 21 - Plošné tažení materiálu [10]

1.6.5. Nekonenční metody

Stejně jako ve všech oblastech i v oblasti tváření kovů vznikají metody, které se od ostatních nějakým způsobem odlišují. Opírají se o nové poznatky a zkušenosti a jejich použití s sebou přináší řadu výhod. Jako první bych zmínil tváření výbuchem. Na tvářený materiál se působí prostřednictvím tlakové vlny, která vzniká při explozi. Dosahuje se tak až deseti násobné rychlosti tváření. Hlavní výhodou je v tomto případě velice přesný tvar vylisku a teoreticky neomezená velikost. V neposlední řadě možnost použití velice obtížně tvařitelných materiálů.

Elektromagnetické tváření využívá pro svou funkci vlastnosti magnetického pole. Magnetické pole cívky a pole tvářeného materiálu na sebe působí odpuzivým účinkem. Vzniklou sílu lze využít pro tváření. Hlavní výhodou je možnost přesně ovládat tvářecí energii.

Posledními metodami v oblasti nekonvenčního tváření jsou frekvenční a termální tváření. První zmiňovaná metoda využívá pro tváření kovů kmitání o určité frekvenci. Nejvíce používaným je ultrazvuk. Touto metodou se nejčastěji vyrábí tyče, dráty a trubky. Metoda termálního tváření je založena na ohřevu materiálu na vysoké teploty. Podmínkou je, že by měla být zachována pevnost materiálu při vysokých teplotách. Takovýchto materiálů je však nedostatek. [10]

2 Metody charakterizace mechanických vlastností, metalografie

V této kapitole bude věnována pozornost důležitým vlastnostem materiálů a metodám, kterými tyto vlastnosti zjišťujeme a srovnáváme. Některé metody a postupy budou posléze použity při přípravě a analýze zkušebních vzorků pro praktickou část této práce.

2.1. Mechanické vlastnosti

Technický materiál je charakterizován řadou vlastností, podle kterých se posuzuje jeho kvalita a vhodnost použití. Rozlišujeme vlastnosti tepelné, magnetické, elektrické, optické a fyzikální. Podskupinou fyzikálních vlastností jsou mechanické vlastnosti, kterými materiál odporuje mechanickým silám, a právě posuzováním těchto vlastností se budeme zabývat. [4]

Existuje řada mechanických vlastností, které můžeme měřit a definovat. Pro charakteristiku materiálů se v praxi používají jen ty, které poskytnou odpovídající optimální kvalitu a množství informací při přiměřených finančních prostředcích. Nejčastěji se v praxi setkáváme s následujícími mechanickými vlastnostmi.

Pevnost

Vystavením materiálu silovému působení může nastat několik situací. Může se deformovat nebo se porušit. K porušení dojde při překročení určité meze, která se pro každý materiál liší.

Pevnost je definována jako maximální zatížení, které je daný materiál za daných podmínek schopen přenést, aniž by došlo k jeho porušení nebo deformaci. Nejčastěji se zjišťuje pomocí tahové zkoušky. [4]

Plastičnost a tvárnost

Tyto mechanické vlastnosti charakterizují schopnost materiálu plasticky se deformovat a nejčastěji je vyhodnocujeme prostřednictvím tažnosti a kontrakce při zkoušce tahem. [4]

Houževnatost

Houževnatost je měřítkem energie potřebné pro lom součásti. Často se jako ukazatel houževnatosti volí vzdornost ve vrubu. Tuto vzdornost si můžeme představit jako odpor kladený zkušební tyčinkou, opatřenou vrubem, při přeražení rázem. Vrubová houževnatost se nejčastěji stanovuje zkouškou Charpyho kyvadlovým kladivem a nebo pomocí Izodovy zkoušky. Čím je výsledek zkoušky vyšší, tím je odolnost materiálu vůči přeražení náhlým nárazem vyšší. [4]

Tvrlost

Další velice důležitou mechanickou vlastností kovů je tvrdost. Definovat ji můžeme jako odpor kladený materiálem proti vnikajícímu cizímu tělesu. Ze všech mechanických vlastností je její zjištění nejrychlejší a nejlevnější. Velice důležitým faktorem je, že se jedná o nedestruktivní metodu. V mnohých případech se nemusí odebírat vzorky a vyrábět zkušební tělesa. [4]

Tento výčet znázorňuje pouze přehled nejčastěji používaných a nejdůležitějších mechanických vlastností. Dále by bylo vhodné uvést ještě další významné vlastnosti jako jsou odolnost vůči cyklickému zatěžování (mez únavy) a například žáruvzdornost.

2.2. Mechanické zkoušky

Vlastnosti materiálů se určují pomocí zkoušek ve zkušebnách materiálů. Většinu zkoušek provádí výrobce pro ověření kvality a výrobních postupů. Na základě jejich výsledků lze posléze zdokonalovat výrobní proces a materiál samotný. Princip zkoušek spočívá v popisu chování materiálu, vystavenému nejčastěji se vyskytujícím druhům namáhání. Na základě těchto namáhání se potom provádějí jednotlivé zkoušky materiálu. V praxi se můžeme setkat s tzv. základními mechanickými vlastnostmi, pomocí kterých rozhodujeme o vhodnosti použití materiálu pro různý účel. Tyto vlastnosti se velice často posuzují pomocí zkoušky tahem za normální okolní teploty. Další odvětví tvoří mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů za zvýšených teplot. Pro tento účel se provádí zkoušky tečení za odpovídající teploty, dlouhodobé pevnosti a relaxace. V případech, kdy je nutné určit mez kluzu, pevnosti, případně tažnost a kontrakci materiálu při teplotě různé od teploty okolí, se provádí opět zkouška tahem do lomu při stanovené teplotě. Pro charakterizaci materiálu, zatěžovaného při vyšších rychlostech a nižší teplotách, popřípadě materiálů s vruby a trhlinami, se používají zkoušky rázové v ohybu, zkoušky statické a dynamické lomové houževnatosti. V neposlední řadě jsou tu zkoušky tvrdosti a například zkoušky pro charakterizaci materiálů vystavených opakovanému cyklickému namáhání. K jednotlivým zkouškám si uvedeme základní popis a metody v následujícím textu. [4, 8]

2.2.1. Základní rozdělení mechanických zkoušek

dle teploty zkoušky:

- za okolní teploty (udává se pokojová, 20°C),
- za snížené teploty,
- za zvýšené teploty.

dle rychlosti deformace:

- statické (rychlost zatěžování je malá),
- dynamické (zatěžování probíhá cyklicky pravidelně nebo náhodně),
- dynamické rázové (při tzv. střední rychlosti zatěžování),
- zkoušky při vysokých rychlostech.

dle napětového stavu:

- při jednoosé napjatosti,
- při rovinné napjatosti,
- při prostorové napjatosti. [4]

2.2.2. Zkoušky pevnosti

Při zkoušení materiálu, jehož pevnost chceme stanovit, postupujeme následovně. Zhotovíme zkušební tyč určitého tvaru a velikosti. Takto zhotovená zkušební tyč se upne do zkušebního stroje. Zkušební stroj působí na zkušební tyč silou a napodobuje tak namáhání, jakému je v praxi strojní součást vystavena. Namáhání se zvyšuje až do doby, kdy se překoná pevnost zkušební tyče. Na závěr se změří silový účinek a celá zkouška se vyhodnotí.

Příprava zkušební tyče se provádí odříznutím (případně odštipnutím) menšího kusu od posuzovaného materiálu. Z tohoto kusu se následně vyrobí pomocí obrábění. Rozměry a tvar zkušební tyče nejsou libovolné, jsou normovány (ČSN EN 10002-1), z hlediska porovnávání výsledků zkoušek. Zkušební tyč se nemusí vyrábět jen pomocí obrábění. Často může být kována anebo válcována. V tomto případě je ale nutné rozlišovat zkoušky příčné a podélné, protože výsledky zkoušek se od sebe výrazně liší. [8]

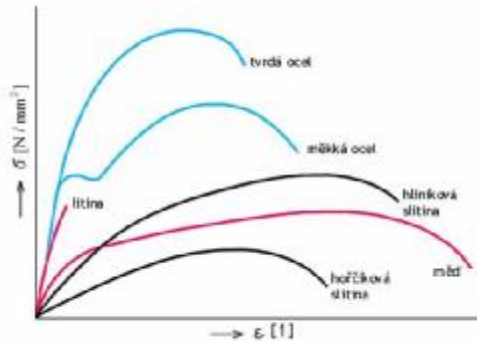
Zkouška statické pevnosti

Všechny zkoušky statické pevnosti jsou založeny na principu působící síly, která se zvyšuje až do doby, kdy zkušební tyč praskne. Prostřednictvím zkoušecího stroje se vyvíjí síla, kterou zkušební tyč natahujeme, stlačujeme, ohýbáme – zkušební tyč záměrně deformujeme. V závislosti na způsobu zatěžování pak rozlišujeme statickou pevnost v tahu, tlaku, ohybu, v kroucení a střihu. Ve starší literatuře se uvádí také statická zkouška ve vzpěru, která se v dnešní době již často nepoužívá a zařazují ji tedy jen pro úplnost.

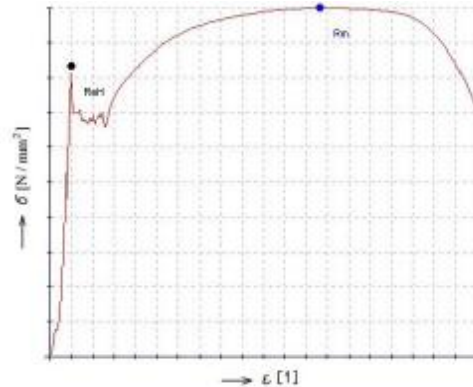
Zkouška statické pevnosti v tahu

Nejběžněji prováděnou zkouškou, za účelem získání znalosti základních mechanických vlastností, je zkouška tahem. Provádí se na zkušební tyči kruhového, nebo obdélníkového průřezu, který se v celé délce tyče nemění. Zkušební tyč upevněnou do čelistí

zkušebního zařízení zatěžíme klidnou, spojitě se měnící silou. Působením této síly se zkušební tyč natahuje a prodlužuje. Závislost mezi zatěžovací silou a prodloužením vyjadřujeme pomocí smluvního diagramu. Smluvní diagram představuje tzv. trhací (tahová) křivka. Pro různé materiály rozlišujeme různý tvar křivky (viz. Obrázek 22). [8]



Obrázek 22 - Trhací křivky [17]

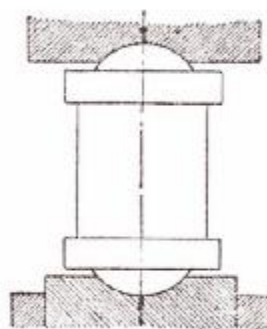


Obrázek 23 - Trhací křivka [18]

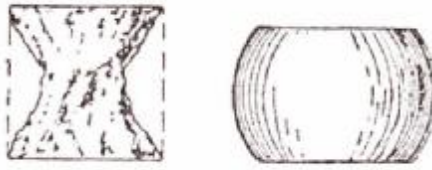
Na základě této zkoušky jsme schopni stanovit horní a dolní mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a kontrakci materiálu. Dále také modul a součinitel pružnosti.

Zkouška statické pevnosti v tlaku

Při této zkoušce je velice důležitý tvar zkušebního tělesa. Mělo by být zcela rovné, aby se tlak mohl co nejlépe a hlavně stejnoměrně rozdělit do celého průřezu tělesa. Tvar je také důležitý i z hlediska porovnávání výsledků zkoušky. Pro kovy se nejčastěji používá tvar válce s průměrem podstavy d (volíme) a výškou l , kde $l = 0,88d$. Zkušební těleso je namáháno osově prostřednictvím přesně obroběných desek, opatřených kulovitými výstupky (viz. Obrázek 24).



Obrázek 24 - Princip zkoušky tlakem [8]

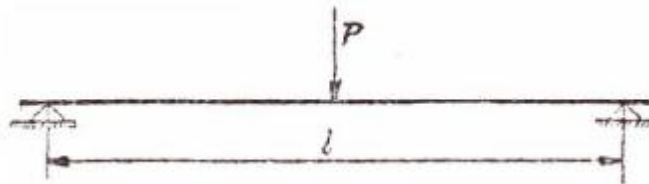


Obrázek 25 - Rozdrcení a soudkovitá deformace materiálu [8]

Výsledkem namáhání houževnatých materiálů (měkká ocel) je soudkovitá deformace. Zkušební těleso se stlačí, ale nedojde k deformaci. Naopak je tomu u křehkých materiálů, které se vlivem zatížení rozdrtí. Na základě výsledku zkoušky pak stanovíme mez kluzu v tlaku. Charakterizovat si toto napětí můžeme jako napětí, při kterém se houževnaté zkušební těleso začne stlačovat. [8]

Zkouška statické pevnosti v ohybu

Tato zkouška se provádí zejména u materiálů křehkých, které vlivem zatížení prasknou (šedá litina). Zkoušku provádíme na zkušebních tělesech ve tvaru válcovitých tyčí, normou předepsaných rozměrů. Příprava se provádí ulitím v samostatné formě a následným očištěním. Takto připravená zkušební tyč se podepře na dvou podporách o určité vzdálenosti a uprostřed se zatěžuje silou (viz. Obrázek 26). Pevnost stanovíme ze vztahu (viz vzorec). [8]



Obrázek 26 - Princip ohybové zkoušky - tříbodový ohyb [8]

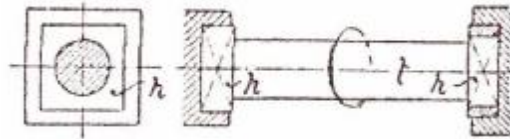
Zkouška statické pevnosti na vzpěr

Na vzpěr jsou namáhány součásti jako ojnice, táhla, případně sloupy. K namáhání na vzpěr dochází v případě, kdy jsou dlouhá tělesa namáhána tlakem. Logicky pak pravděpodobněji dojde k ohnutí než k rozdrcení. Pevnost ve vzpěru závisí na upevnění. Čím dokonaleji tyč upevníme, tím je menší riziko, že dojde k ohnutí. V praxi se vyskytují dva způsoby uchycení zkušební tyče. V prvním případě zkušební přístroj působí na zkušební tyč přímo, prostřednictvím rovných koncových ploch. V druhém případě se na zkušební tyč nasunou tzv. ocelové příložky s kuličkami, opírající se o hlavy zkoušecího stroje. [8]

Výsledkem zkoušky je síla, kterou se tyč ohne. Dosazením této síly do příslušných vzorců, získáme modul pružnosti E, potřebný pro další výpočty. Dnes se tato hodnota stanovuje spíše výpočetně na základě poznatků z oboru pružnosti a pevnosti.

Zkouška statické pevnosti v kroucení

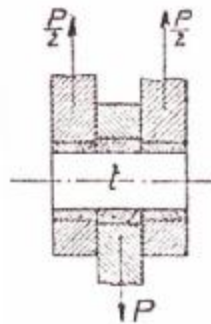
Do zkoušecího stroje se upíná zkušební tyč kruhového průřezu, která se zatěžuje kroučícím momentem. Ze znalosti průřezu a velikosti kroučícího momentu se pak stanoví velikost pevnosti v krutu (případně úhel zkroucení). [8]



Obrázek 27 - Princip zkoušky na krut [8]

Zkouška statické pevnosti ve stříhu

Pevnost ve stříhu se určuje přestřížením válcovité zkušební tyče ve dvou rovnoběžných místech (viz. Obrázek 28). Tato zkouška má význam zejména u součástí jako jsou nýty.



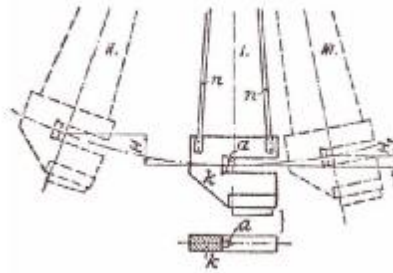
Obrázek 28 - Princip zkoušky ve stříhu [8]

Zkoušky dynamické pevnosti

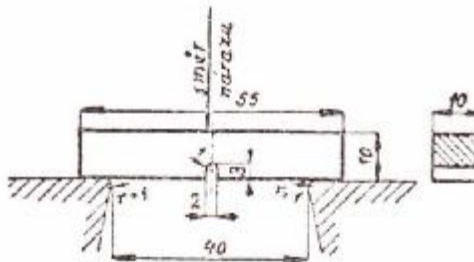
Působí-li zatěžující síla nárazem (krátkodobě), nedojde k ohnutí, ale k přeražení. Veliký vliv na nárazovou pevnost má teplota. Čím vyšší je teplota, tím větší je nárazová pevnost. Velikost nárazové pevnosti je dána prací, kterou je nutno vykonat pro porušení materiálu. Rozlišujeme dynamické zkoušky nárazové pevnosti v tahu, tlaku a ohybu. Z hlediska rozsahu této práce budu věnovat pozornost pouze nejvýznamnější zkoušce – nárazové pevnosti v ohybu. [8]

Zkouška nárazové pevnosti v ohybu

Při této zkoušce dopadá beran na předmět, uložený na dvou podložkách. Tyto podložky jsou uloženy v určité vzdálenosti. Po dopadu beranu se předmět zkontroluje, jestli nevznikly trhliny. Zkouška se opakuje do té doby, dokud se zkoušený předmět nezlomí nebo neprohne. Na závěr se určí práce všech nárazů beranu. Každý předmět má stanoveno, kolik nárazů beranu a jaké minimální prohnutí musí bez poruchy snést.



Obrázek 29 - Hlavní součást Charpyho přístroje [8]



Obrázek 30 - Možný tvar zkušební vzorku [8]

Většího významu se při této zkoušce dosahuje, opatří-li se zkušební těleso zářezem – vrubem. Takto provedenou zkouškou posuzujeme stejnorodost a houževnatost materiálu. Pro realizaci zkoušky se používají dva stroje – Charpyho a Izodův. Pevnost materiálu, zjištěnou touto zkouškou, označujeme jako vrubovou práci a charakterizovat ji lze jako specifickou práci spotřebovanou k přeražení zkušební tyče v místě vrubu. [8]

Zkoušky meze únavy

V praxi jsou součásti zatěžovány silami, jejichž velikost se pravidelně mění. Dochází k rozkmitání pulsujícím nebo střídavým zatížením. Pokud je součást vystavena takovému zatížení, které se periodicky opakuje, může dojít k porušení i při hodnotách napětí mnohem menších, než jsou hodnoty mezních napětí, zjištěné při statických zkouškách. V případě porušení není na součástce vidět žádné změny tvaru. Tento jev si vysvětlujeme tzv. únavou materiálu.

V praxi nás zajímá napětí, kterému může být materiál nekonečně mnohokrát vystaven, aniž by došlo k prasknutí. Toto napětí je označováno jako mez únavy a zjišťuje se dlouhodobými zkouškami. [8]

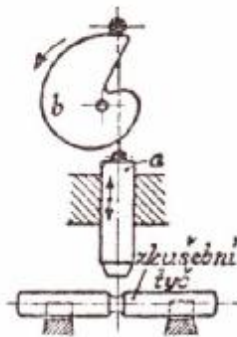
Dlouhodobá zkouška nárazová

Při této zkoušce se neurčuje napětí, ale počet nárazů určité velikosti, kterých je třeba vykonat pro prasknutí zkušební tyče. Zkouška se provádí Kruppovým přístrojem, který si můžeme představit opět jako menší beran (cca 4kg), zdvihaný do určité výše. Z této výše

pak padá na zkoušenou válcovou tyč s vrubem. Počet nárazů počítá počítadlo a pohybuje se mezi 60 – 120 údery za minutu.

Dlouhodobá zkouška statická

Princip této zkoušky je poněkud odlišný. Zkušební tyč se zatěžuje kmitavým napětím o určité velikosti, dokud nepraskne. Následuje ten samý postup zkoušení další zkušební tyče kmitavým napětím o menší hodnotě. Tento postup se opakuje až do doby, kdy nalezneme napětí, při kterém zkušební tyč odolá 10 milionům změn namáhání. Toto napětí je mezi únavy daného materiálu a materiál při něm odolá nekonečně velkému počtu změn namáhání.



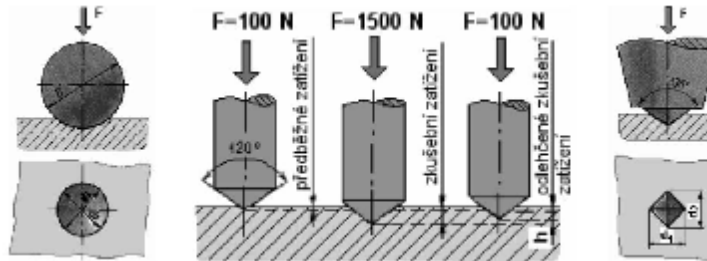
Obrázek 31 - Dlouhodobá zkouška nárazová [8]

2.2.3. Zkoušky tvrdosti

Velice často prováděnými jsou zkoušky tvrdosti. Jak již z názvu vyplývá, provádějí se za účelem zjištění tvrdosti materiálu. Dají se zařadit mezi jednoduché a cenově příznivé zkoušky, při kterých nedochází k destrukci zkoušeného vzorku. Rozlišuje se mnoho způsobů provádění těchto zkoušek (vrypové, vnikací, nárazové a odrazové), dále pak například zkoušky statické a dynamické.

Nejčastějším způsobem je zkoušení materiálu vlačováním tělíska určitého tvaru a rozměrů přímo do materiálu. Pokud je vlačovaným tělískem kalená ocelová kulička ze slinutých karbidů, jedná se nejčastěji o Brinellův způsob. Při zkoušení kalených předmětů, kdy by mohlo dojít k prasknutí ocelové kuličky, se používá způsob pomocí Rockwellova a Vickersova přístroje. Pro vlačování se používá kuželovitě nebo jehlanovitě obroušené diamantové zrnko. V případě Rockwellova přístroje má diamant tvar kužele s vrcholovým úhlem 120°. Tvrdost materiálu se pak posoudí na základě hloubky vymáčknutého dolíčku, přeměřené měřidlem. V případě měření tvrdosti pomocí Vickersova přístroje má diamantový hrot tvar čtyřbokého jehlanu. Protější strany tohoto jehlanu spolu svírají úhel 136°. Dalším

způsobem měření tvrdosti může být měření prostřednictvím odrazu, kdy se tvrdost posoudí na základě odrazu válcového tělíska, dopadajícího z určité výšky na zkoušený předmět. [4]



Obrázek 32 - Brinellův, Rockwellův a Vickersův princip zkoušky tvrdosti [19]

Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Tato zkouška je jednou z nejpoužívanějších metod pro měření tvrdosti materiálu. V praktické části této bakalářské práce budeme tuto metodu také používat a proto bude vhodné věnovat jí větší pozornost. Princip spočívá v měření velikosti (resp. úhlopříček) vtisku. Tento vtisk nám na povrchu materiálu vytvoří diamantový hrot tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° . Diamantový hrot je do materiálu tlačěn přesně definovanou silou určité velikosti a po stanovený časový interval. Z naměřených hodnot úhlopříček jehlanu následně vypočítáme jejich střední hodnotu (vzorec 1), kterou použijeme pro dosažení do vztahu (Rovnice 1). Tento vztah nám charakterizuje velikost tvrdosti materiálu, nazývanou tvrdost materiálu podle Vickerse.

Výpočtové vztahy

$$HV = \frac{2F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2}, \text{ kde}$$

Rovnice 1

$$\left\{ d = \frac{d_1 + d_2}{2} \right\}$$

d.....střední hodnota úhlopříček vtisku,

F.....zatěžující síla,

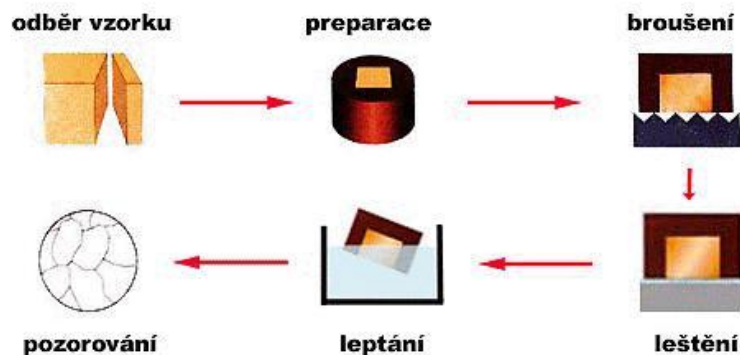
HV....tvrdost dle Vickerse.

Většinou je $F = 294 \text{ N}$ a působí po dobu cca 10 – 15 s. V praktické části budeme Vickersovu metodu používat pro měření mikrotvrdosti materiálu. Při této zkoušce mikrotvrdosti je diamantový hrot do povrchu materiálu tlačěn silou $F = 4,9035 \text{ N}$ po dobu 15 – 20 s. Výsledkem jsou mikrovtrisky v povrchu materiálu, které přeměříme pomocí mikroskopu. Následný postup je analogický pro měření tvrdosti dle Vickerse. [4]

2.3. Metalografie

Vlastnosti kovů souvisí s jejich strukturou. Studium této struktury se zabývá metalografií, pomocí níž se snažíme strukturu kovu zviditelnit a studovat. Při tomto sledování nás nejvíce zajímají strukturní fáze obsažené v materiálu, jejich množství, rozložení a tvar. Pozorováním vzorku můžeme také odhalit vady materiálu a výskyt příměsí, které vlastnosti materiálu také výrazně ovlivňují. V případě, kdy dojde k porušení součásti, lze pomocí metalografického rozboru určit příčinu porušení a vysvětlit tak důvod selhání zařízení, vyrobeného z tohoto kovu. [7]

Nejčastější a nejrozšířenější metodou je přímé pozorování pomocí optického mikroskopu v režimu odrazu. Nejlepšího odrazu dosáhneme, pokud je plocha pozorovaného vzorku co nejdokonaleji rovná a hladká. Kvalita a možnosti rozboru jdou tedy přímo úměrně kvalitě přípravy vzorku – metalografického výbrusu.



Obrázek 33 - Postup přípravy metalografického výbrusu [11]

Postup pro přípravu a vyhodnocení struktury metalografické vzorku

Odběr vzorku

Rozhodující pro odběr vzorku je povaha zkoušeného materiálu, jeho velikost a tvar. Odebíraný vzorek by měl maximálně charakterizovat daný materiál. Při následném odběru nesmí dojít k narušení, případně ovlivnění struktury. Vzorek odebíráme nejčastěji destruktivně (např.: řezáním, stříháním). Mnohdy k charakterizaci nestačí pouze jeden vzorek. Musíme tedy odebrat vzorků více. Podobná situace nastává v případě zkoumání tvářených materiálů, kdy je nutné odebrat vždy dva vzorky. Jeden ve směru rovnoběžném a druhý ve směru kolmém na osu kování. Hlavním požadavkem je, aby vzorek nebyl příliš velký, ale ani příliš malý. Optimální velikost vzorku se v literatuře udává 20 x 20 mm. [7,11]

Příprava vzorku

Odebraný vzorek se následně upravuje pomocí broušení. V tomto případě se snažíme, prostřednictvím odebírání hmoty z povrchu, dosáhnout co nejrovinnatější plochy s malou drsností. Broušení lze provádět buď ručně a nebo jako mechanizované. Na úvod se provádí broušení pomocí brusky (brusných a leštících strojů). Pro jemnější broušení se používá ruční broušení. Jedná se o brusné papíry o určité zrnitosti. Postupuje se od nejhrubší až po nejjemnější zrnitost (cca 10 μ m).

Dalším důležitým krokem je leštění. Existují tři způsoby leštění vzorku: mechanické, elektrolytické a chemické. Cíl je pro všechny druhy stejný, na rozdíl od předchozího kroku se zde nesnažíme odstranit vrstvu materiálu, ale pouze odstranit rýhy po broušení. V případě mechanického leštění je princip velice podobný broušení. Na vzorek působíme tlakem rotujícího kotouče, na němž je upevněn leštící materiál. Nejčastěji se používá jemný prášek, rozpuštěný ve vodní suspenzi. Nejpoužívanější jsou leštící prostředky Al₂O₃, Cr₂O₃, MgO a diamantové pasty. [7,11]

U některých vzorků se provádí ještě preparace, zejména u součástí malých rozměrů. Preparace nám tak umožní lepší manipulaci s výbrusem a zároveň se zvětší jeho plocha.

Leptání - zviditelnění struktury

Vlivem broušení materiálu se na povrchu vzorku objevuje nežádoucí souvislá vrstva deformovaného materiálu. Této vrstvě říkáme Beilbyho vrstva, která zakrývá strukturní součásti a je jí potřeba odstranit. Nejběžnějším způsobem zviditelnění, odstranění Beilbyho vrstvy, je chemické leptání vyleštěného povrchu.

Leptání provádíme ponořením vzorku do leptacího činidla. Rozhodující je teplota a doba působení leptadla. Pro zobrazení makrostruktury, odhalující větší nestejnorodosti, se leptadlo nechává působit do větší hloubky. V případě zobrazení mikrostruktury je tomu naopak a leptadlo se nechává působit do malé hloubky. Z hlediska působícího činidla a pracovní teploty, lze leptání rozdělit na leptání na hranici zrna, plošné leptání a selektivní leptání. [7]








Vyhodnocení

Kovy jsou neprůhledné a jejich strukturu lze sledovat pouze pomocí odrazu světla. Pro pozorování struktury se používají mikroskopy, skládající se z objektivu a okuláru. Pozorovaný vzorek zvětšíme pomocí objektivu (až 100x). Následuje zvětšení pomocí okuláru (až 20x). Výsledné zvětšení je pak dáno součinem zvětšení okuláru a objektivu. Jakostním

parametrem mikroskopu však není výsledné zvětšení, ale jeho rozlišovací schopnost, tzn. při jaké nejmenší vzdálenosti dvou bodů dokáže mikroskop rozlišit jejich obrazy rozdělené. [7]

Základní metalografické struktury ocelí

Druh struktury má velký vliv na celkové mechanické vlastnosti materiálu. Samotná struktura je závislá především na složení a tepelném zpracování oceli. Při pozorování mikroskopem se můžeme setkat s následujícími metalografickými strukturami (viz. Obrázek 34).

Název	Definice	Vlastnosti	Struktura
ferit	železo α	měkký, tvárný, malá pevnost v tahu	
austenit	tuhý roztok uhlíku v železe γ	za tepla tvárný, za studena zpevňuje, pevný a houževnatý	
perlit	eutektoid soustavy karbidové, vzniklý rozpadem austenitu při Ar1 a skládající se z feritu a cementitu (lamelární nebo zrnitý)	lamelární - málo tvárný, velká pevnost a tvrdost; globulární - houževnatý, měkčí	
martenzit	nestabilní tuhý roztok uhlíku v železe α , vzniklý z austenitu prudkým ochlazením při rychlosti větší než je kritická rychlost ochlazení	nejvyšší tvrdost	
troostit	struktura vznikající zrychleným ochlazením při rychlosti nižší než je martenzitická transformace, nebo jako první stupeň rozpadu martenzitu při jeho mírném ohřevu	vlastnosti podobné bainitu	
sorbit	přechod mezi troostitem a zrnitým perlitem, vzniklý mírným ohřevem troostitu	vlastnosti mezi troostitem a zrnitým perlitem	
bainit	nodulární struktura, vznikající rozpadem austenitu mezi teplotou asi 500° a teplotou vzniku martenzitu	tvrdý, tvárný, houževnatý a feromagnetický	

Obrázek 34 - Základní metalografické struktury [8,9]

3 Příprava vzorků a analýza

Výchozím materiálem zkušebních vzorků pro naše laboratorní měření byl materiál ČSN 19191. Mechanické vlastnosti, chemické složení a technologické údaje materiálu jsou uvedeny v tabulce (viz. Obrázek 35). Z této oceli ve tvaru kulatiny (d = 30 mm) byly následně vykovány a vybroušeny polotovary, z kterých jsme odebírali zkušební vzorky pro naše měření.

ČSN 41 9191		Nástrojová uhlíková houževnatá		OCEL	
STN 41 9191		tvrdá ocel první jakostní skupiny		19 191	
Chemické složení [hm. %]					
C	Mn	Si	P	S	Cr
0,95-1,09	0,20-0,35	0,15-0,30	max 0,025	max 0,030	max 0,15
Polotovary					
[1] tyče kované nebo válcované za tepla		[3] plechy válcované za tepla			
[2] výkovky		[4] volné výkovky			
Mechanické vlastnosti⁽¹⁾					
Polotovar		[1]			
Rozměr d [mm]		20			
Stav		kalený a popouštěný			
Mez kluzu R _e 0,2 [MPa]		1 100-2 600 (při HRC 37-54)			
Mez pevnosti R _m [MPa]		1 180-2 100 (při HRC 37-54)			
Táhnost A ₅ [%]		4-10 (při HRC 54-37)			
Kontrakce Z [%]		19-22 (při HRC 54-37)			
Vrúbková houževnatost KCU 2 [J.cm ⁻²]		8-35 (při HRC 61-37)			
Tvrdost HRC		50-66 (R. t. 780 °C/voda, P t. 300-100 °C/2h)			
Mez kluzu za zvýšených teplot R _e 0,2 [MPa]		700-1 700 (při t = 400-200 °C, R _m = 2 000 MPa)			
Mez kluzu v tlaku R _m [MPa]		2 000-3 000 (při HRC 59-66)			
Technologické údaje					
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ					
normalizační žhání 750-810 °C ochlázovat na vzduchu, tvrdost 225-310 HB					
žhání na měkko 680-710 °C prožhát min 4 h a pak pomalu ochlázovat v peci, tvrdost max 200 HB					
žhání ke snížení pruhů 660-650 °C prožhát 1-2 h, pomalu ochlázovat v peci					
kalení 750-770 °C ochlázovat ve vodě, pro malé a hrozné složité nástroje min 64 HRC					
780-750 °C ochlázovat ve vodě, pro velké a hrozné jednoduché nástroje					
790-620 °C ochlázovat v oleji, nástroje do Ø 3 mm					
tepelné přeměny A _{e1} ~ 725-750 °C M _s ~ 220 °C					
prokalitelnost při kalení do vody v oleji průřezu do 8 mm, hloubka 2-3 mm při kalení průřezu 10-60 mm ve vodě					
popouštění 100-300 °C HRC 65-54					
dekové změny po kalení a popouštění 0,22%					
Závislost tvrdosti na popouštěcí teplotě					
teplota [°C]	100	150	200	250	300
tvrdost HRC	66	64	62	58	54

Obrázek 35 - Výchozí materiál [20]

Možnosti použití pro:

- řezné nástroje (pro obrábění dřeva, gumy a plastů; např. nože, frézy),
- nástroje pro stříhání za studena (menší namáhání a menší výkony; např. průstřížnice),
- nástroje pro tváření za studena (lisovadla, nástroje pro tváření, ražení a protlačování),
- formy (jednoduché formy pro tváření plastů a pryže),
- nástroje pro pneumatické nářadí,
- ruční nástroje (pro opracování nejrůznějších materiálů),
- upínací nářadí pro nejrůznější účely,
- ostatní nástroje (nože, sekáčky, razidla, štípací kleště atd.).

Zatímco v předchozích kapitolách jsme si nastínili problematiku tváření materiálů, jednotlivé způsoby a metody určení mechanických vlastností, jak již z názvu práce vyplývá, naším cílem je posoudit změny mechanických vlastností materiálu vlivem tváření. Všeobecně se uvádí, že tvářením získává materiál lepší mechanické vlastnosti. V této praktické části bakalářské práce se toto tvrzení pokusíme ověřit, tj. jej potvrdit nebo vyvrátit.

Pro měření jsme zvolili dva druhy mechanických zkoušek, prostřednictvím nichž jsme provedli porovnání mechanických vlastností kovaných a nekovaných profilů. Z hlediska tvaru a rozměrů vzorků jsme zvolili zkoušku mikrotvrdomosti a zkoušku ohybovou.

Zkoušky mikrotvrdomosti jsme realizovali na třech dvojicích vzorků srovnatelného průřezu. Předmětem prvního měření byl vzorek kovaný a broušený. Druhé a třetí měření bylo provedeno na vzorcích kovaných a broušených, ale tentokrát tepelně upravených pomocí žhání (v prvním případě) a kalení (v druhém případě). Za tímto účelem jsme si ověřili, zda tepelně zpracovaný kovaný vzorek dosahoval lepších nebo horších mechanických vlastností než vzorek broušený, tepelně zpracovaný.

Ohybovou zkoušku jsme provedli na dvou dvojicích zkušebních vzorků po tepelném zpracování (kalení), kdy jsme posoudili porovnání vzorku kovaného a vzorku broušeného. Výsledkem jsou nejen hodnoty maximálních ohybových napětí, ale i pozorování chování jednotlivých vzorků při zatěžování.

3.1. Zkoušky mikrotvrdomosti

Pomocí této zkoušky proměříme tvrdosti jednotlivých vzorků a posoudíme, zda má kování vliv na tvrdost, či nikoliv. Samotná zkouška mikrotvrdomosti je jednou z nejlepších metod pro rychlé a relativně přesné posouzení změny mechanických vlastností materiálu.

Pro měření byla zvolena metoda měření mikrotvrdomosti dle Vickerse (viz. kapitola 2.2.3 Zkoušky tvrdosti na str. 33) a provedli jsme ji pomocí mikrotvrdoměru Zwick/Roel ZHV 10 v laboratoři Univerzity Pardubice. Prostřednictvím mikroskopu, nastaveného na šestisetnásobné zvětšení (10x okulár a 60x objektiv), jsme přeměřovali velikosti vtisků. Tyto hodnoty bylo nutné převést do správných jednotek a příslušnými vztahy dopočítat hodnoty mikrotvrdomosti.

3.1.1. Zkouška mikrotvrdomosti kovaného a broušeného vzorku

Pro realizaci měření jsme měli k dispozici dva druhy zkušebního materiálu. Jeden byl pouze broušený a druhý byl kovaný. Následujícím postupem jsme získali informace o jejich

tvrdosti, na základě nichž jsme byli schopni stanovit, jaký vliv má kování na změnu mikrotvrdosti (mechanických vlastností) materiálu.

Příprava vzorků

Z posuzovaných materiálů (z kovaného a broušeného) bylo nutné oddělit menší vzorky, vhodného tvaru a velikosti pro pozorování pod mikroskopem, s jehož pomocí provedeme samotnou zkoušku mikrotvrdosti. Oddělení jsme provedli pomocí metalografické pily Mikron 110. Tato bruska pracuje s řeznou emulzí, která při řezání neustále ochlazuje brusný kotouč a místo řezu a brání tak ovlivnění struktury vlivem vysoké teploty. V případě, kdy by se teplota zvýšila nad určitou mez, došlo by tepelnému ovlivnění struktury. Takto oddělené vzorky jsme preparovali do Dentacrylu (plexiskla).

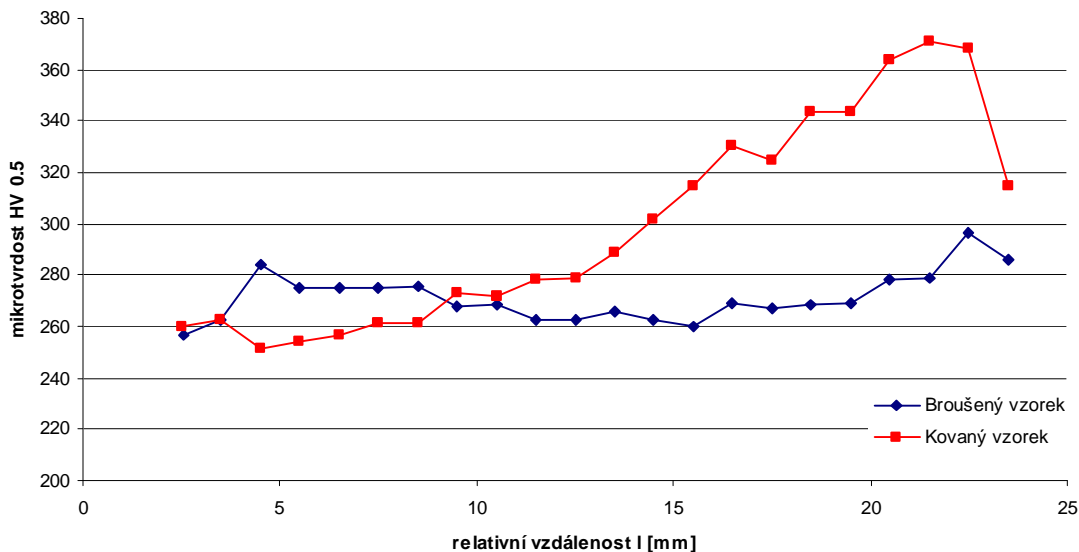
Na ploše řezu budeme provádět samotné měření a pozorování prostřednictvím metalografického mikroskopu. Je tedy nutné pomocí broušení vytvořit co nejdokonaleji rovinnou a hladkou plochu bez škrábanců. To jsme provedli pomocí broušení na metalografické brusce. Postupovali jsme od brusného papíru s velkou zrnitostí až k brusným papírům o nejmenší zrnitosti. Broušení se opět provádělo v přítomnosti vody. Jakmile zmizely veškeré rýhy a škrábance, přešlo se do fáze leštění povrchu. Leštění jsme provedli pomocí metalografické brusky, v níž jsme vyměnili brusný kotouč za leštící kotouč. Samotná fáze leštění se provádí v nevodném prostředí (v ethanolu), z důvodu ochrany vzorku před korozí. Vybroušené a vyleštěné vzorky jsme vysušili pomocí fénu (horkovzdušné pistole). Takto připravené vzorky jsme již mohli použít pro měření mikrotvrdosti.

Tabulka 1 - Měření mikrotvrdosti – vzorky tepelně neupravené

Kovaný vzorek				Broušený vzorek			
d1 [mm]	d2 [mm]	d [mm]	HV0,5	d1 [mm]	d2 [mm]	d [mm]	HV0,5
0,0594	0,0601	0,0597	259,85	0,0604	0,0597	0,0601	257,00
0,0594	0,0594	0,0594	262,74	0,0594	0,0594	0,0594	262,74
0,0601	0,0614	0,0607	251,44	0,0573	0,0569	0,0571	284,43
0,0604	0,0604	0,0604	254,20	0,0581	0,0581	0,0581	274,82
0,0597	0,0604	0,0601	257,00	0,0584	0,0578	0,0581	274,82
0,0604	0,0587	0,0596	261,29	0,0584	0,0578	0,0581	274,82
0,0601	0,0591	0,0596	261,29	0,0578	0,0582	0,0580	275,60
0,0574	0,0591	0,0582	273,26	0,0587	0,0589	0,0588	267,93
0,0581	0,0587	0,0584	271,72	0,0594	0,0581	0,0587	268,68
0,0581	0,0574	0,0578	277,97	0,0594	0,0594	0,0594	262,74
0,0574	0,0579	0,0577	278,77	0,0594	0,0594	0,0594	262,74
0,0564	0,0569	0,0567	288,59	0,0587	0,0594	0,0591	265,68
0,0554	0,0554	0,0554	301,62	0,0592	0,0596	0,0594	262,74
0,0548	0,0538	0,0543	314,59	0,0601	0,0594	0,0597	259,85

Kovaný vzorek				Broušený vzorek			
d1 [mm]	d2 [mm]	d [mm]	HV0,5	d1 [mm]	d2 [mm]	d [mm]	HV0,5
0,0528	0,0531	0,0530	330,46	0,0589	0,0584	0,0587	269,43
0,0528	0,0541	0,0535	324,37	0,0584	0,0594	0,0589	267,18
0,0518	0,0521	0,0520	343,17	0,0581	0,0594	0,0587	268,68
0,0515	0,0525	0,0520	343,17	0,0586	0,0587	0,0587	269,43
0,0505	0,0505	0,0505	363,66	0,0578	0,0578	0,0578	277,97
0,0505	0,0495	0,0500	370,89	0,0578	0,0576	0,0577	278,77
0,0502	0,0502	0,0502	368,46	0,0558	0,0561	0,0559	296,30
0,0541	0,0545	0,0543	314,59	0,0568	0,0571	0,0569	286,08

Zdroj: Autor



Obrázek 36 - Mikrotvrdość tepelně neupravovaných vzorků [autor]

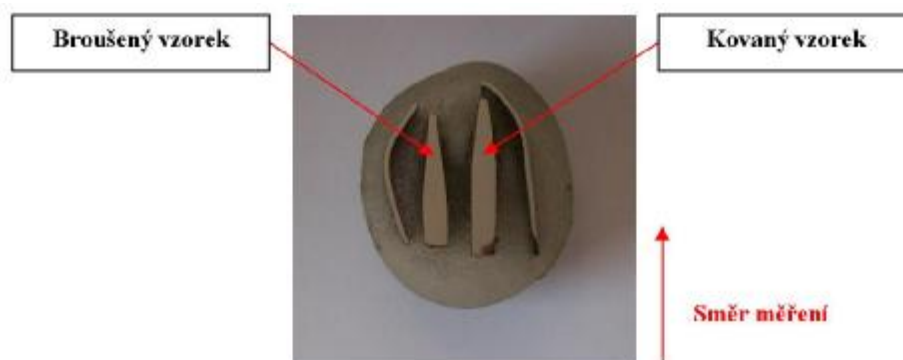
Zhodnocení

Z grafu je zřejmé, že tvrdost obou vzorků je v zadní části se stejným stupněm prokování stejná. Jakmile se začneme přibližovat do oblasti většího prokování (břítu) kovaného vzorku, tvrdost začíná výrazně růst. Na rozdíl broušený vzorek má tvrdost po celé délce téměř stejnou. S rostoucím prokováním tedy roste tvrdost materiálu a zvyšuje se i jeho pevnost.

3.1.2. Zkouška mikrotvrdości žíhaných vzorků

Další zkouška byla provedena na normalizačně žíhaných vzorcích. Při tomto tepelném zpracování by se měla zrna struktury zjemnit a vzniknout rovnoměrná struktura. Celkovým

efektem by mělo být dosažení stejnoměrných mechanických vlastností v celém průřezu vzorku a odstranění zpevnění po tváření.



Obrázek 37 - Kovaný a broušený vzorek (preparace) [autor]

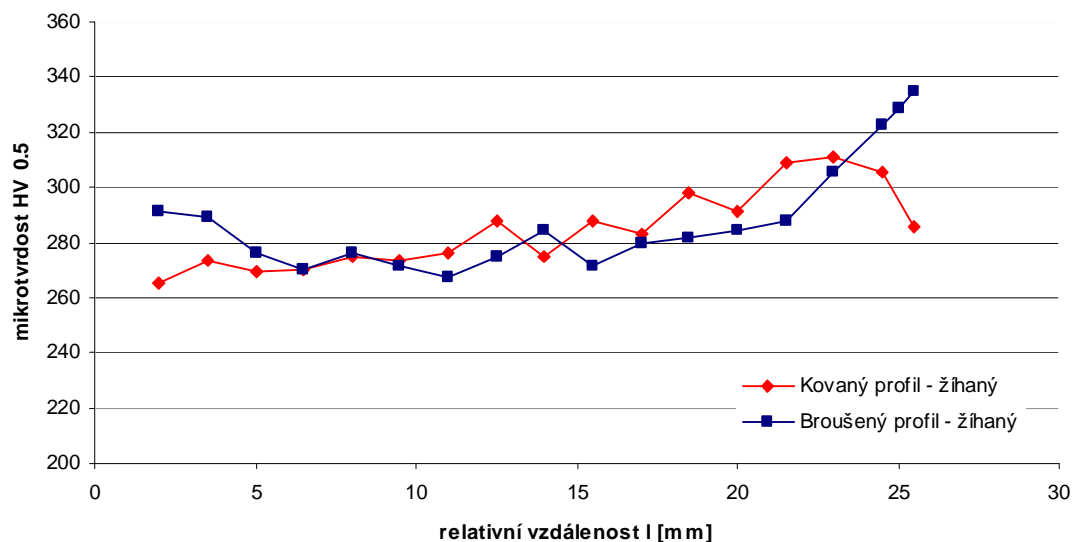
Příprava vzorků

V první fázi přípravy bylo nutné provést normalizační žíhání zkušebního materiálu. Vlastní žíhání jsme provedli v laboratoři Univerzity Pardubice v elektrické odporové peci. Zkušební materiál jsme rovnoměrně zahřívali na teplotu 800°C. Jakmile bylo této teploty dosaženo, následovala výdrž na teplotě cca po dobu 2 h a poté ochlazení na vzduchu. Další fáze spočívala v odříznutí, preparaci, broušení a leštění (viz. předchozí kapitola).

Tabulka 2 - Měření mikrotvrdoti – vzorky tepelně upravované žíháním

Kovaný vzorek – normalizačně žíhaný				Broušený vzorek – normalizačně žíhaný			
d1 [mm]	d2 [mm]	d [mm]	HV0,5	d1 [mm]	d2 [mm]	d [mm]	HV0,5
0,0594	0,0587	0,0591	265,68	0,0561	0,0568	0,0564	291,13
0,0578	0,0587	0,0582	273,26	0,0561	0,0571	0,0566	289,43
0,0582	0,0591	0,0587	269,43	0,0584	0,0574	0,0579	276,39
0,0581	0,0591	0,0586	270,19	0,0594	0,0578	0,0586	270,19
0,0571	0,0591	0,0581	274,82	0,0581	0,0578	0,0579	276,39
0,0591	0,0574	0,0582	273,26	0,0584	0,0584	0,0584	271,72
0,0587	0,0571	0,0579	276,39	0,0591	0,0587	0,0589	267,18
0,0564	0,0571	0,0568	287,75	0,0587	0,0574	0,0581	274,82
0,0584	0,0578	0,0581	274,82	0,0564	0,0578	0,0571	284,43
0,0561	0,0574	0,0568	287,75	0,0591	0,0578	0,0584	271,72
0,0568	0,0578	0,0573	282,80	0,0578	0,0574	0,0576	279,56
0,0571	0,0545	0,0558	298,06	0,0564	0,0582	0,0573	281,98
0,0564	0,0564	0,0564	291,13	0,0568	0,0574	0,0571	284,43
0,0545	0,0551	0,0548	308,93	0,0571	0,0564	0,0568	287,75
0,0545	0,0548	0,0546	310,80	0,0545	0,0558	0,0551	305,24
0,0558	0,0545	0,0551	305,24	0,0545	0,0528	0,0536	322,38
0,0568	0,0571	0,0569	286,08	0,0535	0,0528	0,0531	328,41
-	-	-	-	0,0535	0,0518	0,0526	334,62

Zdroj: Autor



Obrázek 38 - Mikrotvrdość žháných vzorků [autor]

Zhodnocení

Tvrdości obou vzorků jsou téměř stejné. Na průběhu se vyskytuje řada odchylek, které si můžeme vysvětlit jako vliv nehomogenity struktury materiálu. Žháním jsme dosáhli odstranění vnitřního pnutí a stejnorodé struktury. Důkazem tohoto tvrzení je téměř konstantní tvrdość obou vzorků od zadní části až po vrchol břitu. V tomto případě nepozorujeme žádný výrazný rozdíl mezi tvářeným a broušeným vzorkem a proto můžeme tvrdit, že tu žádná závislost není. Zajímavá je situace v břitu vzorků. Tvrdość broušeného vzorku roste, zatímco tvrdość kovaného vzorků se naopak výrazně snižuje. Tento jev si můžeme vysvětlit jako vliv několikanásobného ohřátí, které vedlo k oduhlčení a následnému poklesu tvrdości kovaného vzorku. Celkový nárůst tvrdości ve směru k břitu je patrně způsoben rychlejším ochlazováním tenčího profilu a tedy vznik jemnějšího perlitu s vyšší tvrdości.

3.1.3. Zkouška mikrotvrdości kalených vzorků

Pro poslední měření mikrotvrdości jsme vzorky (kovaný i broušený vzorek) tepelně upravili a to kalením. Vlivem této tepelné úpravy bychom naopak měli dosáhnout největší tvrdości materiálu. Opět posoudíme, jaký vliv má na tuto výslednou tvrdość fakt, zda se jedná o kovaný nebo broušený vzorek.

Příprava vzorků

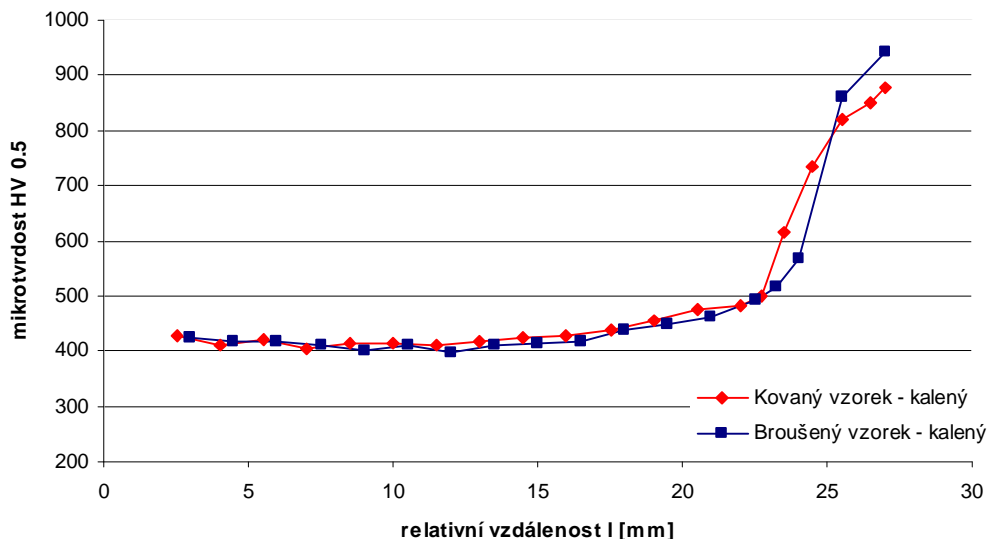
Kalení vzorků jsme provedli v oleji. Vzorky se ohřály na austenitizační teplotu (810°C) a následně se rychle ochladily ponořením do studeného oleje, aby se předešlo jejich popraskání. Vzhledem k tomu, že pro danou ocel je vhodnější ochlazování do vody, bylo možno očekávat spíše bainitickou strukturu než martenzitickou. Další příprava vzorků byla analogická jako v předchozích dvou případech (odříznutí, preparace, broušení a leštění).

Tabulka 3 - Měření mikrotvrlosti - vzorky tepelně upravované kalením

Kovaný vzorek – kalený			
d1 [mm]	d2 [mm]	d [mm]	HV0,5
0,0469	0,0462	0,0465	428,19
0,0475	0,0475	0,0475	410,53
0,0475	0,0462	0,0469	422,18
0,0479	0,0479	0,0479	404,89
0,0472	0,0475	0,0474	413,40
0,0475	0,0472	0,0474	413,40
0,0479	0,0472	0,0475	410,53
0,0475	0,0469	0,0472	416,29
0,0465	0,0470	0,0468	423,67
0,0467	0,0462	0,0464	429,71
0,0459	0,0462	0,0460	437,45
0,0447	0,0455	0,0451	455,22
0,0439	0,0446	0,0442	474,09
0,0442	0,0436	0,0439	481,25
0,0422	0,0439	0,0431	499,86
0,0370	0,0406	0,0388	616,59
0,0343	0,0368	0,0356	733,23
0,0337	0,0337	0,0337	818,22
0,0327	0,0333	0,0330	851,28
0,0327	0,0323	0,0325	877,41

Broušený vzorek - kalený			
d1 [mm]	d2 [mm]	d [mm]	HV0,5
0,0465	0,0469	0,0467	425,17
0,0479	0,0462	0,0470	419,22
0,0465	0,0479	0,0472	416,29
0,0475	0,0475	0,0475	410,53
0,0482	0,0479	0,0480	402,11
0,0475	0,0475	0,0475	410,53
0,0488	0,0479	0,0483	396,64
0,0469	0,0482	0,0475	410,53
0,0475	0,0472	0,0474	413,40
0,0469	0,0472	0,0470	419,22
0,0462	0,0459	0,0460	437,45
0,0452	0,0459	0,0455	447,01
0,0452	0,0442	0,0447	463,65
0,0432	0,0436	0,0434	492,29
0,0419	0,0429	0,0424	515,55
0,0406	0,0403	0,0404	567,28
0,0327	0,0330	0,0328	859,86
0,0317	0,0310	0,0314	943,25
-	-	-	-
-	-	-	-

Zdroj: Autor



Obrázek 39 - Mikrotvrdość kalených vzorků [autor]

Zhodnocení

Na první pohled můžeme konstatovat, že kalení splnilo naše očekávání a celková tvrdost obou materiálů se zvětšila. V zadní části vzorků dosáhla hodnoty cca o 160 HVm vyšší (400 HVm) a v přední části břitu se tvrdost zvýšila výrazněji až na hodnotu okolo 900 HVm než u původních vzorků. Na druhou stranu můžeme z průběhů závislostí vyčíst, že tvrdost kaleného kovaného i kaleného broušeného vzorku je téměř stejná a kování tedy žádný výrazný vliv na pevnosti materiálu nemá. Nižší tvrdost kovaného vzorku v oblasti špičky břitu si můžeme vysvětlit jako vliv několikanásobného ohřátí, které vedlo k oduhlčení a následnému poklesu tvrdosti. Další příčinou mohla být i rychlost ochlazování, kdy vlivem pomalejšího chladnutí došlo ke zvýšení obsahu bainitu a tím i výsledné tvrdosti struktury broušeného vzorku.

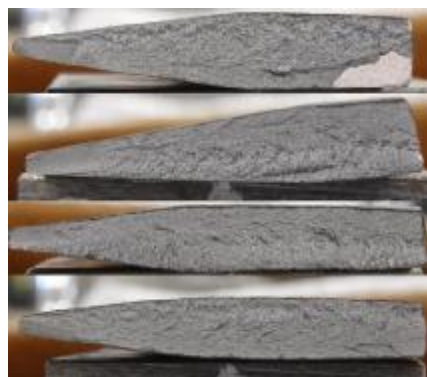
3.2. Ohybová zkouška

Jako další zkouška, která nám pomůže posoudit, jaký vliv má tváření na mechanické vlastnosti kovu, byla zvolena zkouška ohybová – 3 bodový ohyb. Předmětem zkoumání byly dvě dvojice vzorků. První dvojice vzorků kovaných a druhá dvojice vzorků nekovaných – broušených. Na základě výsledků zkoušek v ohybu každého vzorku pak budeme schopni stanovit velikost maximální síly, potřebné pro zlomení vzorku a maximální ohybové napětí příslušných vzorků.

Zkoušku jsme prováděli pomocí upraveného trhacího zařízení opět v laboratoři Univerzity Pardubice. Každý vzorek jsme uložili na dvě podpory o určité vzdálenosti a pomocí hlavy trhacího ústrojí zatěžovali stále rostoucí silou uprostřed mezi podporami (viz. Obrázek 40). Podpory i hlava trhacího zařízení byly opatřeny válečkovými ložisky.



Obrázek 40 - Uložení zkušební vzorku [autor]



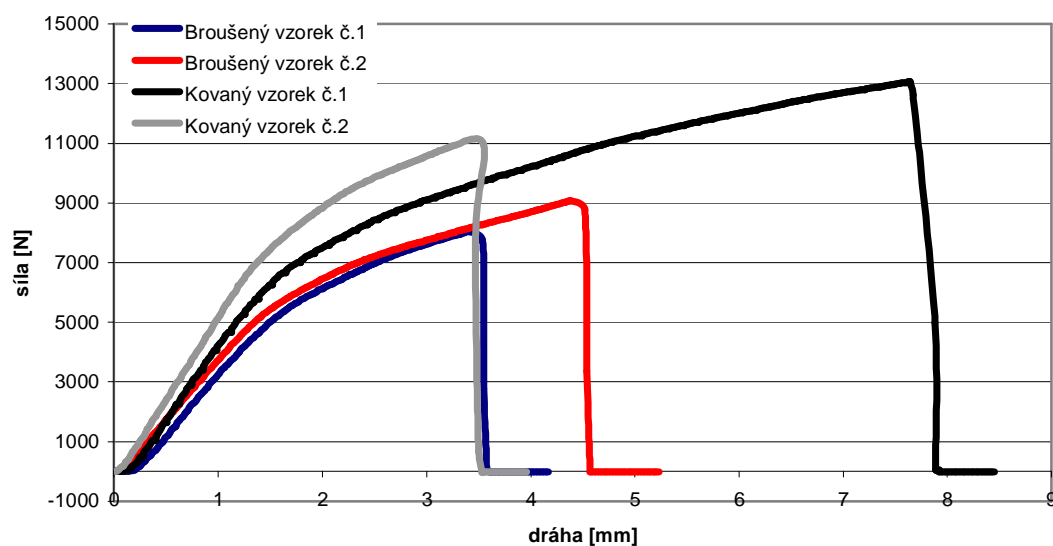
Obrázek 41 – Lomové plochy (sestupně: nekovaný č.1, č.2; kovaný č.1, č.2) [autor]

Tabulka 4 - Ohybová zkouška (naměřené hodnoty)

	F_{max} [N]	S_o [mm ²]	l_{red} [mm]	σ^* [MPa]
Nekovaný vzorek č.1.	8045	95,92	25,3	83,87
Nekovaný vzorek č.2.	9068	96,63	25,5	93,84
Kovaný vzorek č.1.	13065	117,89	29,8	110,82
Kovaný vzorek č.2.	10940	118,77	30,6	92,11

Zdroj: Autor

* σ - napětí vztažené na průřezovou plochu vzorku



Obrázek 42 - Průběh ohybové zkoušky [autor]

Zhodnocení

Nejvýraznější změnu můžeme spatřit porovnáním zkušebního broušeného vzorku č.1 a kovaného vzorku č.1. V tomto případě je změna velice zřejmá. Broušený vzorek se přelomil již při hodnotě maximálního zatížení $F_{\max} = 8045$ N. Oproti tomu kovaný vzorek se přelomil až na hodnotě $F_{\max} = 13065$ N. Velice důležité je uvědomit si, že k porušení broušeného vzorku došlo při průhybu cca 3,5 mm, na rozdíl od kovaného, který se porušil až na hodnotě průhybu necelých 8 mm. Z těchto hodnot můžeme jednoznačně vyvodit, že kování se může výrazně zvýšit houževnatost materiálu. Naopak velmi nízká tažnost (ohyb) kovaného vzorku č. 2 může být spjata s nedokonalostmi povrchu vzniklými při kování, které mohly sloužit jako iniciátor vzniku trhliny, či koncentrátor napětí.

3.3. Analýza struktury

V této kapitole jsme se zaměřili na zkoumání struktury vzorků. Pro toto zkoumání byl použit inverzní metalografický mikroskop a zkušební vzorky z předešlých zkoušek. Tyto vzorky bylo však nutné přebrousit a vyleštit. Vyleštění jsme provedli nadvakrát, nejdříve hrubším leštícím kotoučem a následně ještě jemnějším kotoučem v přítomnosti ethanolu a diamantové leštící pasty. Pro pozorování strukturních fází je totiž velice důležitá příprava povrchu bez sebemenších rýh a škrábanců. Takto upravené vzorky jsme naleptali pomocí Nitalu, pro lepší zviditelnění struktur, a vysušili.

3.3.1. Kovaný a broušený vzorek bez tepelného zpracování

Na snímku (viz. Obrázek 43) vidíme feriticko-perlitickou strukturu s obsahem uhlíku cca eutektoidního bodu. Feritu je na snímku velice málo, proto budeme považovat strukturu za perlitickou. Porovnáme-li snímky (Obrázek 43 a Obrázek 44) můžeme si všimnout, že zrno v méně prokované části je mnohem větší než zrno v břitu. Na základě tohoto pozorování si můžeme vysvětlit větší tvrdost tepelně nezpracovaného kovaného vzorku v místě břitu.



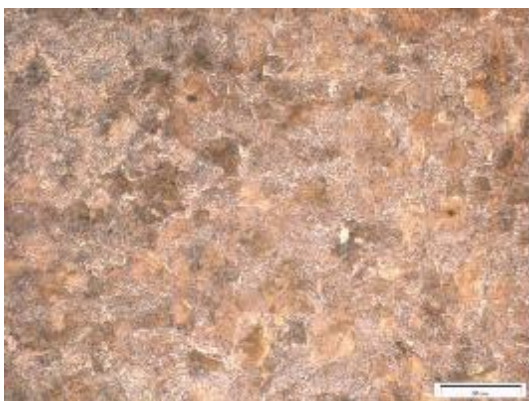
Obrázek 43 - Kovaný vzorek (zvětšení 800x)-zákl -(perlit) [autor]



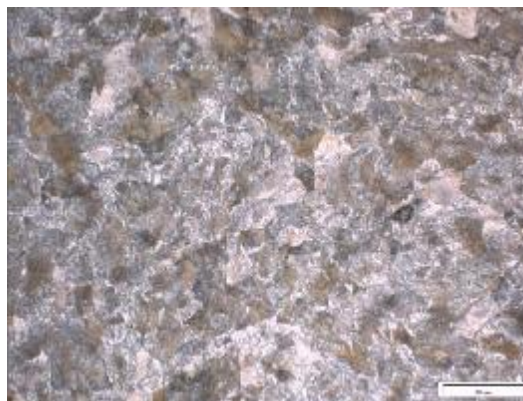
Obrázek 44 - Kovaný vzorek (zvětšení 800x)-břit -(perlit) [autor]

3.3.2. Žíhané vzorky

Kovaný vzorek podrobený normalizačnímu žíhání se vyznačuje feriticko-perlitickou strukturou (viz. Obrázek 45). Na rozdíl od prvního vzorku je patrné, že na snímku je feritické síťoví. Broušený vzorek má naopak základní strukturu obdobně perlitickou pouze s náznakem přítomnosti feritu (viz. Obrázek 46).



Obrázek 45 - Kovaný vzorek žíhaný (zvětšení 400x) -(feriticko-perlitická struktura) [autor]



Obrázek 46 - Broušený vzorek žíhaný (zvětšení 400x) -(perlit) [autor]



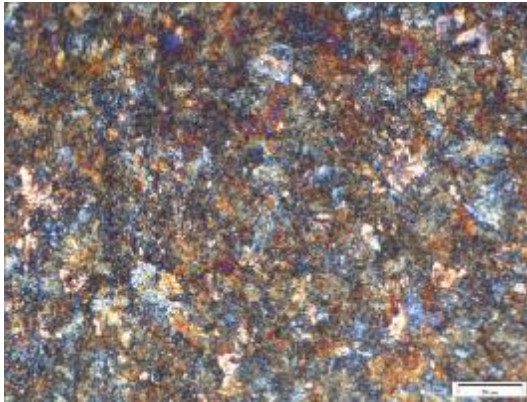
Obrázek 47 - Kovaný vzorek žíhaný (zvětšení 800x) -(feriticko-perlitická struktura) [autor]



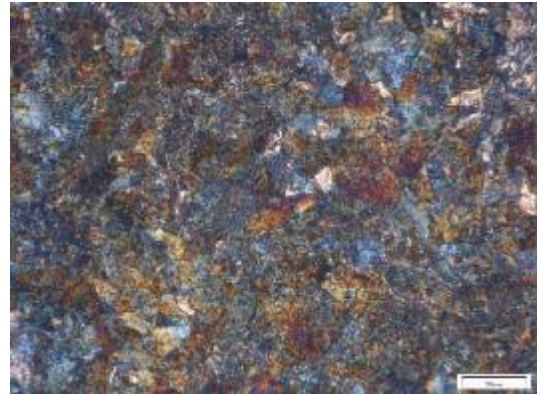
Obrázek 48 - Broušený vzorek žíhaný (zvětšení 800x) -(perlit) [autor]

3.3.3. Kalené vzorky

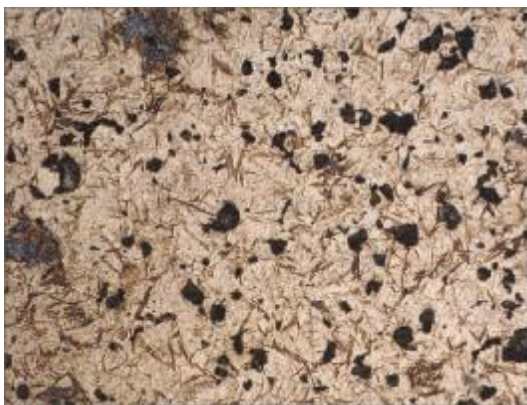
Kalený kovaný vzorek se vyznačuje bainitickou strukturou v místě menšího rozkování (viz. Obrázek 49), která přechází přes bainit a troostit až do martenzitu v místě břítu (viz. Obrázek 51). Vzorek broušený charakterizuje v základní části bainitická struktura (viz. Obrázek 50), která opět přechází v martenzitickou v místě břítu (viz. Obrázek 52). Prostřednictvím této struktury si můžeme vysvětlit výrazné zvýšení tvrdosti vzorků. Barevné skvrny jsou způsobeny nerovnoměrností leptání.



Obrázek 49 - Kovaný vzorek kalený (800x) - zákl. (bainit) [autor]



Obrázek 50 - Broušený vzorek kalený (800x) - zákl. (bainit) [autor]



Obrázek 51 - Kovaný vzorek kalený (800x) –břit (martenzit s ostrůvky bainitu) [autor]



Obrázek 52 - Broušený vzorek kalený (zvětšení 800x)- břit (martenzit s ostrůvky bainitu) [autor]

Závěr

Tato práce se zabývá vlivem tváření na mechanické vlastnosti materiálu. V literatuře se často uvádí, že vlivem tohoto technologického procesu výroby dojde ke zlepšení mechanických vlastností. Tato práce by měla posloužit pro ověření nebo vyvrácení tohoto tvrzení.

Struktura studie je rozčleněna do dvou částí, teoretické a praktické. V první části se zabýváme teoretickou přípravou nutnou pro pochopení dané problematiky. Praktická část je zaměřena na laboratorní měření a zkoušky, které nám poslouží jako nástroj pro posouzení charakteru změn.

Z výsledků zkoušky mikrotvrdomosti tepelně neupravovaných vzorků bylo zjištěno, že tvrdost (resp. pevnost) materiálu, přibližně stejného průřezu, je stejná až do místa většího prokování, kde vlivem tváření dochází k výraznému navýšení tvrdosti materiálu. Tento jev nám napomohla vysvětlit i analýza struktury. V místě menšího prokování byla zrna struktury mnohonásobně větší než zrna v místě většího prokování. Vlivem tváření tedy došlo ke zhuštění a provázání struktury a tím k navýšení její tvrdosti. Naopak u zkoušek tepelně zpracovaných vzorků nebylo pozorováno žádné výraznější zlepšení a proto v těchto dvou případech žádná výraznější závislost není. Naopak v případech pevnosti a tvrdosti obou kovaných vzorků v místě břitu dosáhla dokonce menší pevnosti než u vzorků broušených. Tváření zde patrně ovlivnilo pevnost materiálu negativně vlivem vícenásobného ohřátí při tepelném zpracování, kdy mohlo dojít k oduhlíčení a poklesu tvrdosti kovaných vzorků. Další možnou příčinou, kterou jsme odvodili na základě pozorování snímků ze strukturní analýzy, by mohlo být i pomalejší chladnutí po tepelném zpracování broušeného vzorku, které vedlo ke zvýšení obsahu bainitu a tím ke zvýšení tvrdosti.

Při ohybové zkoušce se vliv tváření projevil poněkud výrazněji. Při zatížení zkušebního broušeného vzorku zatěžovací silou došlo k jeho okamžitému přelomení s určitou hodnotou průhybu. Zatímco pro přelomení kovaného vzorku bylo zapotřebí zatěžující síly téměř 1,5 krát větší při dvojnásobném průhybu vzorku. Na základě tohoto pozorování můžeme konstatovat, že vlivem tváření lze dosáhnout zvýšení houževnatosti materiálu.

Z výsledků jednotlivých měření můžeme vyvodit, že tvářecí proces skutečně mechanické vlastnosti ovlivňuje. Zdaleka ale ne do takové míry, jak jsme očekávali a jak se v literatuře uvádí. Některé provedené zkoušky odhalily zvýšení pevnosti vlivem rostoucího prokování a možné navýšení houževnatosti. V ostatních případech nebyl pozorován výraznější vliv, případně tváření ovlivnilo mechanické vlastnosti materiálu negativně (pokles

pevnosti vlivem vícenásobného ohřevu). Můžeme tedy prohlásit, že vlivem tváření došlo u zkoumaného vzorku ke změnám statických mechanických vlastností, jeho vliv však není natolik výrazný, jak se v literatuře uvádí.

Závěrem práce je nutné upozornit, že pro potvrzení výsledků práce by bylo zapotřebí provést větší počet zkoušek, mít k dispozici větší množství zkušebních vzorků a výsledky těchto zkoušek podrobit statistické analýze, což by nás mohlo dovést k nepatrně odlišným poznatkům. Navíc jsme se v práci nezabývali únavovými vlastnostmi materiálu, které by byly nepochybně výrazně lepší vzhledem k výhodnějšímu průběhu deformačních vláken – viz. např. vyšší životnost kované klikové hřídele proti hřídeli vyrobené třískovým obráběním.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Stavba krystalu [12].....	10
Obrázek 2 - Stavba atomu [13].....	10
Obrázek 3 - Iontová, kovalentní a kovová vazba [14].....	11
Obrázek 4 - Krystalografické struktury [15].....	12
Obrázek 5 - Soustava krychlová plošně a prostorově středěná [15].....	12
Obrázek 6 - Hranová a šroubová dislokace [16]	13
Obrázek 7 - Hustota dislokací [10].....	13
Obrázek 8 - Pružná a plastická deformace [10]	14
Obrázek 9 – Skluz [10]	15
Obrázek 10 – Dvojčatní [10].....	15
Obrázek 11 - Předpoklady výskytu mechanismu dvojčatění [10].....	16
Obrázek 12 - Rozdělení tvářecích procesů dle teploty [10].....	17
Obrázek 13 - Válcování podélné (a), příčné (b) a kosé (c) [10].....	19
Obrázek 14 - Přehled základních kovářských operací [10]	21
Obrázek 15 - Princip zápuštěného kování [10]	22
Obrázek 16 - Princip objemového tažení [10]	22
Obrázek 17 - Princip objemového protlačování [10]	23
Obrázek 18 - Princip stříhání [10].....	24
Obrázek 19 - Princip rovnání materiálu pomocí čelistí (a) a válců (b) [10]	24
Obrázek 20 - Bradavkové rovnání materiálu [10].....	24
Obrázek 21 - Plošné tažení materiálu [10].....	25
Obrázek 22 - Trhací křivky [17].....	29
Obrázek 23 - Trhací křivka [18].....	29
Obrázek 24 - Princip zkoušky tlakem [8]	29
Obrázek 25 - Rozdrcení a soudkovitá deformace materiálu [8].....	30
Obrázek 26 - Princip ohybové zkoušky - tříbodový ohyb [8].....	30
Obrázek 27 - Princip zkoušky na krut [8].....	31
Obrázek 28 - Princip zkoušky ve stříhu [8]	31
Obrázek 29 - Hlavní součást Charpyho přístroje [8]	32
Obrázek 30 - Možný tvar zkušební vzorku [8].....	32
Obrázek 31 - Dlouhodobá zkouška nárazová [8].....	33
Obrázek 32 - Brinellův, Rockwellův a Vickersův princip zkoušky tvrdosti [19].....	34
Obrázek 33 - Postup přípravy metalografického výbrusu [11].....	35
Obrázek 34 - Základní metalografické struktury [8,9]	37
Obrázek 35 - Výchozí materiál [20]	38
Obrázek 36 - Mikrotvrdost tepelně neupravovaných vzorků [autor]	41
Obrázek 37 - Kovaný a broušený vzorek (preparace) [autor].....	42
Obrázek 38 - Mikrotvrdost žíhaných vzorků [autor].....	43
Obrázek 39 - Mikrotvrdost kalených vzorků [autor].....	45
Obrázek 40 - Uložení zkušební vzorku [autor]	46
Obrázek 41 – Lomové plochy (sestupně: nekovaný č.1, č.2; kovaný č.1, č.2) [autor].....	46
Obrázek 42 - Průběh ohybové zkoušky [autor].....	46
Obrázek 43 - Kovaný vzorek (zvětšení 800x)-zákl -(perlit) [autor].....	47
Obrázek 44 - Kovaný vzorek (zvětšení 800x)-břit -(perlit) [autor].....	47
Obrázek 45 - Kovaný vzorek žíhaný (zvětšení 400x) -(feriticko-perlitická struktura) [autor] 48	
Obrázek 46 - Broušený vzorek žíhaný (zvětšení 400x) -(perlit) [autor].....	48
Obrázek 47 - Kovaný vzorek žíhaný (zvětšení 800x) -(feriticko-perlitická struktura) [autor] 48	

Obrázek 48 - Broušený vzorek žíhaný (zvětšení 800x) -(perlit) [autor].....	48
Obrázek 49 - Kovaný vzorek kalený (800x) - zákl. (bainit) [autor].....	49
Obrázek 50 - Broušený vzorek kalený (800x) - zákl. (bainit) [autor]	49
Obrázek 51 - Kovaný vzorek kalený (800x) –břit (martenzit s ostrůvky bainitu) [autor].....	49
Obrázek 52 - Broušený vzorek kalený (zvětšení 800x)- břit (martenzit s ostrůvky bainitu) [autor].....	49

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Měření mikrotvrdosti – vzorky tepelně neupravované	40
Tabulka 2 - Měření mikrotvrdosti – vzorky tepelně upravované žháním.....	42
Tabulka 3 - Měření mikrotvrdosti - vzorky tepelně upravované kalením	44
Tabulka 4 - Ohybová zkouška (naměřené hodnoty).....	46

Použitá literatura

- [1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001. 516 s. ISBN 80-7204-193-2.
- [2] ČUDAKOV, E.A. *Strojírnoství: Technologie strojírenské výroby III. díl*. 1. vyd. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1952. 340 s. č.p. 301-05-53.
- [3] DRASTÍK, František; DOBROVOLNÝ, Bohumil. *Kovářská abeceda*. 1. vyd. Brno: ROH – Práce, 1952. 174 s. č.p. 16-55.
- [4] FIALA, Jaroslav; MENTL, Václav. *Struktura a vlastnosti materiálů*. 1. vyd. Praha: Akademie věd České republiky, 2003. 572 s. ISBN 80-200-1223-0.
- [5] MICHNA, Štefan; NOVÁ, Iva. *Technologie a zpracování materiálů*. 1. vyd. s.r.o. Prešov: Adin, 2008. 326 s. ISBN 978-8089244-38-6.
- [6] PROCHÁZKA, Jiří; ZAHRADNÍK, Miroslav. *Technologie slévání, tváření a svařování*. 1.vyd. Praha: ČVUT, 1982. 343 s. č.p. 42-18.
- [7] MACHEK, Václav; SODOMKA, Jaromír. *Nauka o materiálu: Kovy a kovové materiály 2.část*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2002. 213 s. ISBN 80-01-02568-3.
- [8] BĚLOVSKÝ, Vladimír; OTÁSEK, Josef. *Technologie: materiál*. 6. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1953. 159 s. č.p. 47-44-10.
- [9] KORECKÝ, Jan. *Přehled technických materiálů*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954. 454 s. č.p. 301-05-50.
- [10] *Technologie II – tváření kovů* [online]. [cit. 19.04.2010]. Dostupné na WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm>.
- [11] *Metalografie I- příprava vzorků pro pozorování mikroskopem* [online]. [cit. 20.04.2010]. Dostupné na WWW: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm>.
- [12] *Krystalografické soustavy* [online]. [cit. 15.04.2010]. Dostupné na WWW: <http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=595>.
- [13] *Částicová stavba látek* [online]. [cit. 15.04.2010]. Dostupné na WWW: <http://www.zsharcov.cz/Predmety/F/ucivo/6/1_07.html>.
- [14] *Fyzikální základy vědy o materiálu* [online]. [cit. 15.04.2010]. Dostupné na WWW: <<http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/index.htm>>.
- [15] *Krystalografie* [online]. [cit. 15.04.2010]. Dostupné na WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/bum/03-Krystalografie%20studijni%20opora.pdf>>.
- [16] *Odborná práce – deformace pevného tělesa* [online]. [cit. 15.04.2010]. Dostupné na WWW: <<http://deformacepevnéholesa.kvalitne.cz/struktura.htm>>.
- [17] *Sigma_epsilon.gif* [online]. [cit. 20.04.2010]. Dostupné na WWW: <http://www.ateam.zcu.cz/sigma_epsilon.gif>.
- [18] *ZPS-Slévárna, a.s. – Mechanická zkušebna* [online]. [cit. 20.04.2010]. Dostupné na WWW: <<http://www.sl.zps.cz/zkusebna1.htm>>.
- [19] *Jednotky-fyzikální jednotky a jiné jednotky na webu conVERTER* [online]. [cit. 20.04.2010]. Dostupné na WWW: <<http://www.converter.cz/jednotky/index.htm>>.
- [20] FÜRBAACHER, Ivan; MACEK, Karel. *Lexikon technických materiálů*. Praha: Verlas Dashöfer, 1999. ISBN 80-86229-02-5.