VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

ENERGETICKÉ POROVNÁNÍ DYNAMICKÉHO A STATICKÉHO PORUŠENÍ MATERIÁLU

ENERGETIC COMPARISON OF DYNAMIC AND STATIC FRACTURE OF MATERIAL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE JIŘÍ MAREČEK

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. JIŘÍ BURŠA, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Mareček

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Energetické porovnání dynamického a statického porušení materiálu

v anglickém jazyce:

Energetic comparison of dynamic and static fracture of material

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Je známo, že s rychlostí zatěžování se mění mezní hodnoty napětí i přetvoření materiálů a někdy významně i energie potřebná k porušení vzorku. Téma je zaměřeno na porovnání energie spotřebované na porušení materiálu (vznik lomové plochy) při pomalém zatěžování (zkouška tahem nebo ohybem) a při zatěžování rázovém (Charpyho zkouška).

Cíle bakalářské práce:

- Provést rešerši dostupných údajů o lomovém chování u mosazi a plastů.
- Získat experimentální podklady, tj. výsledky zkoušek materiálů ohybem a Charpyho zkoušek, pro aspoň jeden z uvedených materiálů a vyhodnotit energii spotřebovanou na porušení vzorku při zkoušce ohybem.
- Porovnat energie spotřebované na porušení vzorku při kvazistatickém a rázovém zatěžování a pokusit se popsat závislost této veličiny na rychlosti zatěžování pro vyšetřovaný materiál.

Seznam odborné literatury:

1) Ondráček, Vrbka, Janíček, Burša: Mechanika těles - pružnost a pevnost II. Skriptum VUT Brno, FSI, 2006.
2) Pospíšil B. Aplikovaná nauka o mezních stavech materiálu a konstrukcí. Výzkumná zpráva VUEZ Brno, 1987.
3) Holzmann, Klesnil: Křehký a únavový lom materiálů a konstrukcí. SNTL Praha, 1972.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jiří Burša, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce obsahuje popis vlivu rychlosti zatěžování na mechanické vlastnosti. Dále popisuje závislost lomové práce na rychlosti zatěžování pro mosaz CuZn40Pb2. Vztah popisující tuto závislost byl experimentálně určen z výsledků statické zkoušky tříbodovým ohybem a rázové zkoušky v ohybu (Charpyho zkouška).

KLÍČOVÁ SLOVA

rychlost zatěžování, lomová práce, statická zkouška tříbodovým ohybem, rázová zkouška v ohybu, mosaz

ABSTRACT

This work describes the effects of strain rate on mechanical properties. It also describes the dependence of fracture work on strain rate for brass CuZn40Pb2. The relationship describing this dependence was experimentally determined from the results of static three-point bending tests and impact bending tests (Charpy).

KEYWORDS

strain rate, fracture work, static three-point bending test, impact bending test, brass

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAREČEK, J. Energetické porovnání dynamického a statického porušení materiálu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 36 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Burša, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Burši, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2011 ……..……..

Jiří Mareček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Buršovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

OBSAH

Seznam použitých zkratek a symbolů 9
Úvod 11
1 Lomové chování materiálu 12
2 Mechanické vlastnosti 14
2.1 Houževnatost 14
2.2 Vlivy na mechanické vlastnosti kovových materiálů 14
2.2.1 Vlivy na tahový diagram 14
2.3 Konstitutivní rovnice 16
2.3.1 Johnson – Cookova rovnice 16
3 Zkoušky mechanických vlastností 17
3.1 Statická zkouška tříbodovým ohybem 17
3.2 Rázová zkouška v ohybu 18
4 Výsledky mechanických zkoušek 21
4.1 Popis zkoušeného materiálu 21
4.2 Zkušební vzorek 22
4.3 Statická zkouška tříbodovým ohybem 22
4.3.1 Korekce diagramu 23
4.3.2 Výpočet práce potřebné k přelomení zkušební tyče 25
4.4 Rázová zkouška v ohybu 27
4.5 Statistické zpracování výsledků 29
4.6 Závislost práce na rychlosti zatěžování 29
4.7 Závislost maximální síly a průhybu na rychlosti zatěžování 31
Závěr 33
Použité informační zdroje 34
Seznam příloh 36

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[J]	lomová práce
a	[mm]	délka hrany zkušebního vzorku
A_{10}	[%]	tažnost
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
F	[N]	síla
F_{max}	[N]	maximální působící síla
G	[N]	tíha kladiva
h_1	[m]	výška zdvihu kladiva
h_2	[m]	výška překmitu kladiva
J	[mm^4]	kvadratický moment
K	[J]	nárazová práce
l	[mm]	konečná délka zkušební tyče; vzdálenost podpor
l_0	[mm]	počáteční délka zkušební tyče
M_{Omax}	[N.m]	maximální ohybový moment
r	[m]	délka závěsu
R^2	[-]	hodnota spolehlivosti
R_m	[MPa]	mez pevnosti
s	[J]	směrodatná odchilka
s^2	[J^2]	rozptyl
v	[$m.min^{-1}$]	rychlost zatěžování
w	[J]	houževnatost
W_O	[mm^3]	modul průřezu v ohybu
W_{P1}	[J]	potenciální energie před přeražením zkušebního vzorku
W_{P2}	[J]	potenciální energie po přeražení zkušebního vzorku
$\bar{x}$	[J]	aritmetický průměr
y	[mm]	průhyb mosazi po korekci
y_0	[mm]	naměřený průhyb oceli LV5B
y_f	[mm]	průhyb v okamžiku lomu
y_m	[mm]	naměřený průhyb mosazi
y_{max}	[mm]	maximální naměřený průhyb
y_T	[mm]	teoretický průhyb oceli LV5B
α	[°]	úhel zdvihu kladiva

β	[°]	úhel překmitu kladiva
Δ	[mm]	korekční hodnota
ε	[-]	deformace
ε'	[s^{-1}]	rychlost deformace
$\dot{\varepsilon}$	[s^{-1}]	rychlost délkového přetvoření
ε_f	[-]	deformace v okamžiku lomu
σ	[MPa]	napětí
σ_{Ko}	[MPa]	mez kluzu v ohybu
σ_{Po}	[MPa]	mez pevnosti v ohybu

ÚVOD

Energetickou náročnost porušení materiálu resp. jeho schopnost absorbovat energii před porušením můžeme obecně definovat jako houževnatost. Z inženýrského hlediska je houževnatost významnou vlastností konstrukčních materiálů. Dalšími důležitými pojmy v této problematice jsou vrubová houževnatost, statická a dynamická lomová houževnatost. Lomovou a vrubovou houževnatost lze stanovit pouze experimentálně, i když jsou prováděny pokusy jak je modelovat numericky ze znalosti jiných materiálových charakteristik. Z důvodu vysoké náročnosti zkoušek statické a dynamické lomové houževnatosti je žádoucí nalézt korelaci s vrubovou houževnatostí, kterou lze zjistit mnohem snáze.

Jak dobře víme, chování materiálu při statickém namáhání v laboratorních podmínkách se může výrazně lišit od skutečného zatěžování během provozu. Proto se v dnešní době klade důraz na uplatnění korelace mezi hodnotami získanými ze statických a dynamických mechanických zkoušek.

Podkladem pro tuto práci byl projekt analýzy velikosti deformace a porušení krytu ventilu tlakové láhve při jejím pádu. Další částí bylo stanovení deformační práce pohlcené ventilem při statické zkoušce tříbodovým ohybem. Z tohoto testu vyvstala otázka, jak moc se liší deformační práce získaná ze statické zkoušky od hodnoty, která by byla získána ze zkoušky rázové. [1], [2]

1 LOMOVÉ CHOVÁNÍ MATERIÁLU

Konstrukční součásti jsou během provozu podrobeny různým druhům namáhání – statickému, cyklickému, rázovému – a to za normálních, snížených nebo zvýšených teplot. Příslušný rozvoj teorií a laboratorních zkušebních metod byl a je zaměřen především na poznání podstaty vlastností při jednotlivých způsobech namáhání a na určování objektivních a reprodukovatelných parametrů mezních stavů umožňujících racionální navrhování konstrukcí.

Jednotlivým způsobům namáhání uskutečňovaným do porušení odpovídají typické mikro- a makromechanizmy vzniku a růstu trhlin. Ty se také projevují ve specifických mikro- a makromorfologiích lomu. Charakteristickým rysem je tvar faset – elementárních plošek na lomových plochách. Významnou pomocí při těchto fraktografických vyšetřováních je užití elektronové mikroskopie.

Je důležité rozlišovat mezi tímto morfologickým přístupem a přístupy založenými na jiných kriteriích především při hodnocení křehkého a houževnatého lomu, kdy dochází velmi často k záměnám. Při statickém namáhání se stalo zvykem užívat jako kritéria velikost energie na vytvoření lomu (vyjadřované velikostí vrubové houževnatosti nebo nárazové práce). Lomy s nízkými hodnotami energie se pak označovaly jako křehké, lomy s vysokými hodnotami energie jako houževnaté.

V posledních desetiletích se metodou elektronové fraktografie podařilo dokázat, že existují dva základní mikromechanismy porušení a to:

a) štěpné porušení,
b) tvárné porušení

a to jak transkrystalické, tak interkrystalické. V klasické podobě se tyto mikromechanismy uplatňují při přetížení – tedy při statickém a rázovém namáhání.

Při klasifikaci lomů z makroskopického hlediska bereme v úvahu rozsah plastické deformace, potřebu dodávání energie, vliv spotřeby energie pro porušení. V této souvislosti je možné konstatovat:

- vzniká-li lom v makroskopickém měřítku křehkým způsobem, je charakterizován nízkou spotřebou energie do porušení,
- makroskopicky houževnatý lom se vyznačuje vysokou spotřebou energie do porušení.

Toto energetické kriterium se také využívá k rozlišení makroskopicky křehkých a houževnatých lomů, které se vytvářejí mikromechanismem tvárného porušení. Křehké lomy tohoto druhu vznikají procesem nízkoenergetického roztržení, zatím co všechny makroskopicky houževnaté lomy procesem vysokoenergetického roztržení. Je tedy zřejmé, že nelze paušálně přiřadit definovanému pásmu energií porušení určitý mikromechanismus porušení (i když v mnohých případech – a to právě vyvolalo nesprávnou interpretaci – se takový postup zdá jednoznačný a logický). [3]

HOUŽEVNATÝ LOM

Houževnatý (tvárný) lom je vždy předcházen rozsáhlou plastickou deformací. To vede např. při tahovém zatěžování k zúžení zkušební tyče v určitém místě. V tomto silně

zdeformovaném objemu se objevují dutiny, které se následně spojují v makroskopickou poruchu vedoucí k lomu. [4]

KŘEHKÝ LOM

Křehký lom je porušení materiálu bez doprovodu rozsáhlých plastických deformací. Na lomové ploše můžeme pozorovat i silně zdeformovaná místa, ta se však nachází jen v nejbližším okolí čela šířící se trhliny. [4]

2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Mechanické vlastnosti patří k nejdůležitějším vlastnostem kovových materiálů, protože jsou rozhodující při navrhování strojních součástí a bezprostředně ovlivňují dobu jejich funkce. Mechanické vlastnosti v podstatě vyjadřují, jak se materiál chová při určité teplotě za působení vnějších sil. Pro jejich určování jsou zavedeny konvenční zkoušky, které se dělí především podle časového průběhu zatěžující síly a které umožňují stanovit základní pevnostní a lomové charakteristiky materiálu. [5]

2.1 HOUŽEVNATOST

Houževnatost vyjadřuje odolnost materiálu vůči lomu, zpravidla je charakterizována velikostí mechanické práce, potřebné k lomu. V případě tahové zkoušky je houževnatost w dána obecně integrálem

$$w = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma \cdot d\varepsilon \tag{1}$$

kde ε_f je deformace v okamžiku lomu. Tahová houževnatost je tedy dána velikostí plochy pod tahovým diagramem.

Dalším důležitým pojmem je vrubová houževnatost. Ta je definována jako práce potřebná k přeražení zkušební tyče opatřené vrubem při rázové zkoušce v ohybu. Vrubová houževnatost se zjišťuje zejména Charpyho nebo Izodovou zkouškou rázem. U Charpyho zkoušky se spotřebovaná energie vztahuje na nejmenší průřez zkušební tyče v místě vrubu. Hodnota vrubové houževnatosti je tedy dána jako podíl nárazové práce potřebné k přeražení tyče k průřezu tyče v místě vrubu. [6]

Materiály, které mají malou tažnost (keramika, zvonovina, litina, některé oceli), mají i malou houževnatost a říkáme, že jsou křehké. Naproti tomu materiály s vysokými hodnotami napěťových i deformačních charakteristik např. konstrukční svařitelné oceli mají vysokou hodnotu houževnatosti a říkáme, že jsou houževnaté. [7]

2.2 VLIVY NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

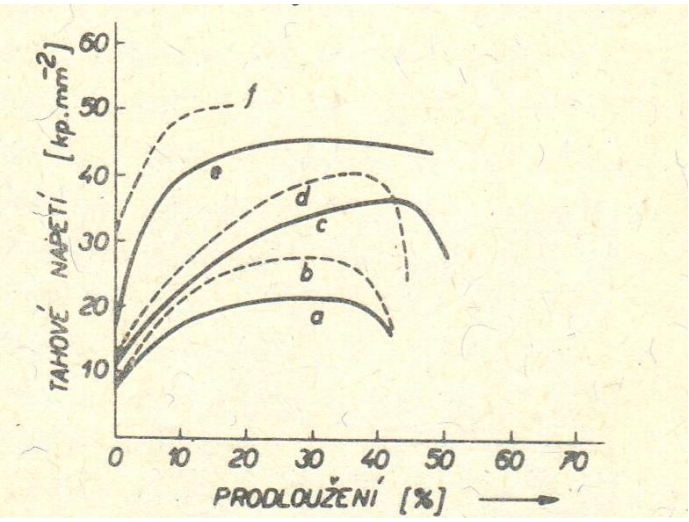
Mechanické vlastnosti kovových materiálů jsou závislé na celé řadě různých faktorů. Mezi nejdůležitější patří druh materiálu, teplota a rychlost zatěžování, vlastnosti prostředí zatížené součásti, velikost součásti, historie zatěžování. Některé faktory ovlivňují diagram σ (ε) materiálu jen nepatrně, jiné způsobují výrazné změny v chování materiálu. [8]

2.2.1 VLIVY NA TAHOVÝ DIAGRAM

Zkušební tyč je zatěžována monotónně rostoucím zatěžováním. Charakteristikou materiálu při tomto zatěžování je diagram σ (ε), který je ovlivněn řadou faktorů. V této práci se zaměříme především na vliv rychlosti zatěžování. [8]

VLIV RYCHLOSTI ZATĚŽOVÁNÍ

Bylo dokázáno, že existuje úzká souvislost vlivu teploty a rychlosti zatěžování na hodnoty mechanických vlastností. Růst rychlosti zatěžování má obdobný vliv na průběh tahového diagramu jako pokles teploty. Obr. 1 nám ukazuje vliv rychlosti zatěžování u polykrystalické mědi při teplotě 20°C (křivky a, b) a při teplotě -196°C (křivky c, d). Z dvojic křivek ab, cd lze vypozorovat, že rychlost deformace má značný vliv na zpevňování (míra zpevnění je vyjádřena úhlem sklonu počáteční části křivky) a zanedbatelný vliv na mez kluzu (počáteční hodnota křivky na svislé ose, neboť velikost elastické deformace je tak malá že ji v daném měřítku nelze zaznamenat). U kovu s mřížkou prostorově středěnou (Wolfram) je z křivek ef zřejmé, že rychlost deformace má jen velmi malý vliv na zpevňování i při teplotě -250°C. V porovnání s Cu je zde jasně patrný vliv rychlosti na růst meze kluzu, který je podmíněn růstem kluzových napětí. Tyto výsledky prokazují dobrý soulad vlivu rychlosti zatěžování a vlivu teploty na pevnostní vlastnosti. Avšak tažnost, jež se při změnách teploty u Cu nemění, je u W za nízké teploty změnou rychlosti zatěžování výrazně ovlivněna. Obdobně je tomu i u jiných kovů s prostorově středěnou mřížkou (např. Fe). [5]



Obr. 1 Vliv rychlosti deformace na tahové diagramy polykrystalické mědi (abcd) a polykrystalického wolframu (ef); a) T=20°C, ε'=4·10^{-4}; b) T=20°C, ε'=80; c) T=-196°C, ε'=4·10^{-4}; d) T=-196°C, ε'=80; e) T=-250°C, ε'=9,8·10^{-6}; f) T=-250°C, ε'=9,8·10^{-4}. (převzato z [5])

Rychlost zatěžování je u tahové zkoušky charakterizována rychlostí délkového přetvoření $\dot{\varepsilon}$. Tuto hodnotu můžeme snadno vyjádřit pomocí rychlosti pohybu upínacích čelistí v zkušebního stroje. [8]

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d}{dt}(\varepsilon) = \frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{l - l_0}{l_0}\right) = \frac{dl}{dt} \cdot \frac{1}{l_0} = \frac{v}{l_0}\ , [s^{-1}] \qquad (2)$$

2.3 KONSTITUTIVNÍ ROVNICE

Konstitutivní rovnice vyjadřují závislost mezi deformací a napjatostí v bodě tělesa. Matematicky lze tuto závislost vyjádřit vztahy mezi složkami tenzoru napjetí a tenzoru přetvoření. Tyto rovnice jsou ovlivňovány i dalšími parametry jako je například teplota a rychlost deformace. Můžeme je tedy využít k popisu chování materiálu při dané velikosti deformace, teplotě a rychlosti zatěžování. [9]

Rovnice mohou být čistě empirické, poloempirické, fyzikální. Patří sem například tyto vztahy: [10]

- Johnson – Cookova rovnice
- Steinberg – Cochran – Guinan – Lundova rovnice
- Zerilli – Armstrongova rovnice
- Mechanical threshold stress (MTS)
- Preston – Tonks – Wallaceova rovnice

2.3.1 JOHNSON – COOKOVA ROVNICE

Jedná se o jednu z nejrozšířenějších rovnic. Řadí se do skupiny čistě empirických vztahů. Data potřebné pro určení materiálových konstant jsou získávány z torzních zkoušek, tahové zkoušky a Hopkinsonova testu za normální a zvýšené teploty. [11], [12]

Johnson – Cookova rovnice je vyjádřena vztahem

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n)\left(1 + C \cdot \ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)(1 - T^{*m}) \tag{3}$$

kde A, B, C, n, m je pět materiálových konstant a T^* je homologická teplota vyjádřená jako

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \tag{4}$$

A… mez kluzu [MPa]
B… pevnostní parametr
C… koeficient určující citlivost na rychlost deformace
n… koeficient zpevnění
m… teplotní koeficient odpevnění
T… teplota materiálu [K]
T_0… referenční teplota (teplota okolí) při statické mezi kluzu [K]
T_m… teplota tavení [K]
ε… efektivní logaritmická rychlost deformace (rychlost deformace) [s^{-1}]
ε_0… referenční rychlost deformace[s^{-1}]

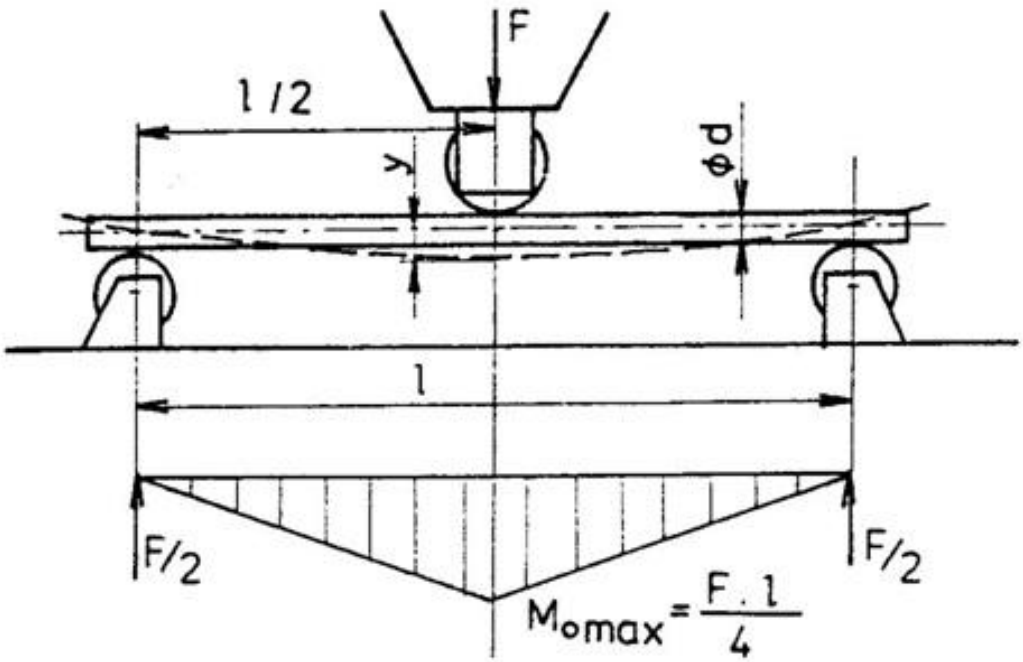
3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Mechanické zkoušky slouží ke zjišťování mechanických vlastností, které mají mimořádný význam při použití materiálu pro konstrukční účely. Zkoušky rozdělujeme podle povahy působících sil na statické a dynamické. Pro tuto práci jsou důležité zejména statická a dynamická (rázová) zkouška v ohybu.

3.1 STATICKÁ ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM [13]

Tato zkouška má pro tvárné materiály malý význam, jelikož u zkušebních tyčí dochází k velkým průhybům a často se vůbec nezlomí. Používá se však pro křehké materiály, u nichž je průhyb měřítkem deformační schopnosti.

Zkušební těleso se zatíží osamělou silou F, která působí uprostřed mezi dvěma podporami. Ohybový moment vyvolaný silou F způsobí v horních vláknech průřezu tlakové napětí, ve spodních napětí tahové. Výhodou této zkoušky je, že můžeme změnou vzdálenosti podpor dosáhnout velkých ohybových momentů i při malé zatěžující síle.



Obr. 2 Schéma statické zkoušky tříbodovým ohybem [14]

Maximální ohybový moment dosažený v průběhu zkoušky M_{Omax} je dán vztahem

$$M_{Omax} = \frac{F_{max}}{4} \cdot l \quad [Nm] \tag{5}$$

Mez pevnosti v ohybu se pak určí jako

$$\sigma_{Po} = \frac{M_{Omax}}{W_O} = \frac{F_{max} \cdot l}{4 \cdot W_O} \quad [MPa] \tag{6}$$

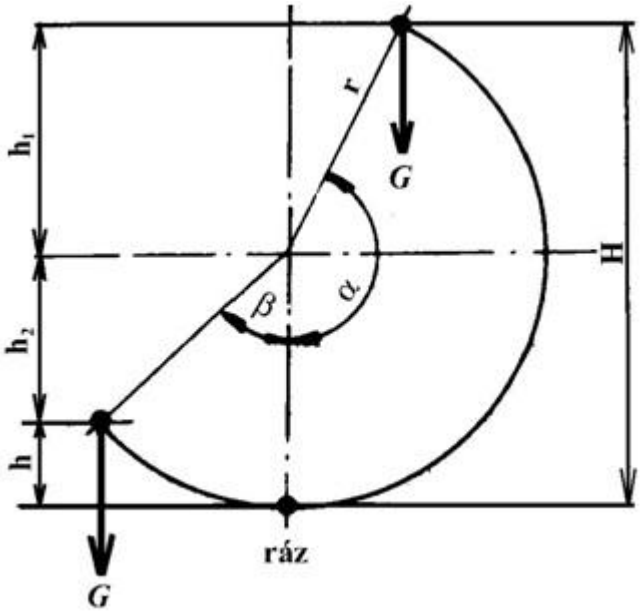
Při zkoušce v ohybu měříme závislost zatěžující síly F na velikosti průhybu y. Z těchto naměřených hodnot lze následně sestrojit ohybový diagram a stanovit pro něj příslušné meze (σ_{Ko}, σ_{Po}) a Youngův modul pružnosti E.

Modul pružnosti se stanoví dle vztahu

$$E = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot J \cdot y} \quad [MPa] \tag{7}$$

3.2 RÁZOVÁ ZKOUŠKA V OHYBU

Při této zkoušce je vzorek předepsaných rozměrů namáhán tříbodovým ohybem na rázovém kladivu (Charpyho kladivo). Zkouška tedy spočívá v přeražení jednostranně vrubovaných tyčí rázem beranu Charpyho kladiva. Výstupní hodnotou je velikost nárazové práce spotřebované pro přeražení vzorku.



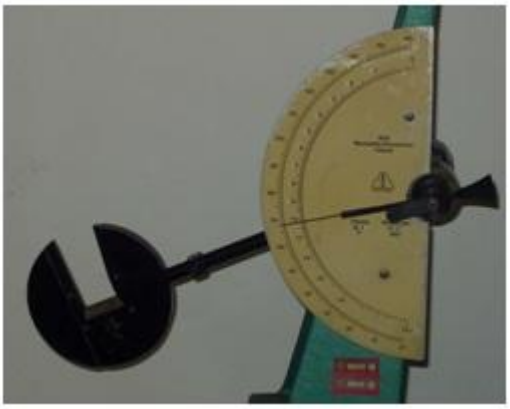
Obr. 3 Princip měření nárazové práce Charpyho kladiva [1]

Nárazová práce K je dána rozdílem potenciálních energií před a po přeražení zkušebního vzorku.

$$K = W_{P1} - W_{P2} = G(H - h) = G[(r + h_1) - (r - h_2)] \tag{8}$$

$$K = G[r(1 - \cos\alpha) - r(1 - \cos\beta)] = G \cdot r(\cos\beta - \cos\alpha) \tag{9}$$

Konstrukce kladiva nám jednoznačně určuje velikost počáteční hodnoty potenciální energie W_{P1}. Výsledná nárazová práce je tedy funkcí výšky „h“ překmitu beranu kladiva. Starší kladiva jsou vybavena vlastní stupnicí, na které nám vlečená ručička přímo ukáže velikost spotřebované práce.

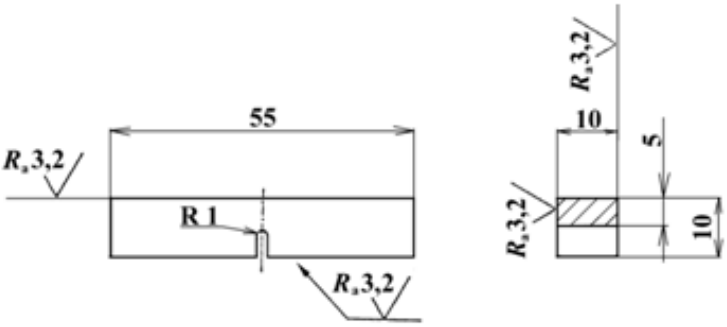


Obr. 4 Beran kladiva vychýlený o úhel β [1]

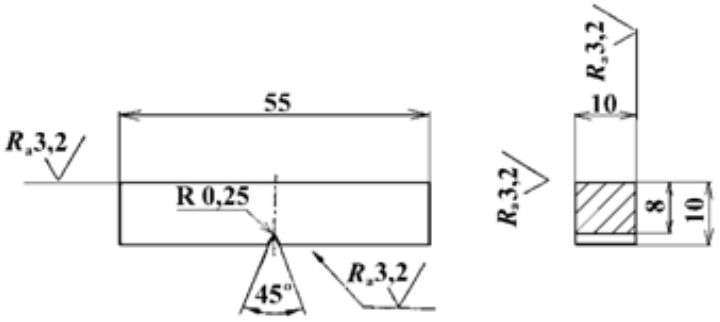
Moderní způsoby určování nárazové práce využívají tzv. instrumentovaná kladiva. U této metody je ve velmi krátkých časových intervalech zaznamenávána závislost zatěžující síly na průhybu. Plocha pod křivkou nám následně určí velikost nárazové práce. [5], [15]

ZKUŠEBNÍ TĚLESA

Zkušební tyč je čtvercového průřezu 10 x 10 mm a délce 55 mm. Uprostřed tělesa je vytvořen vrub tvaru U nebo V.



Obr. 5 Zkušební tyč s U vrubem [15]

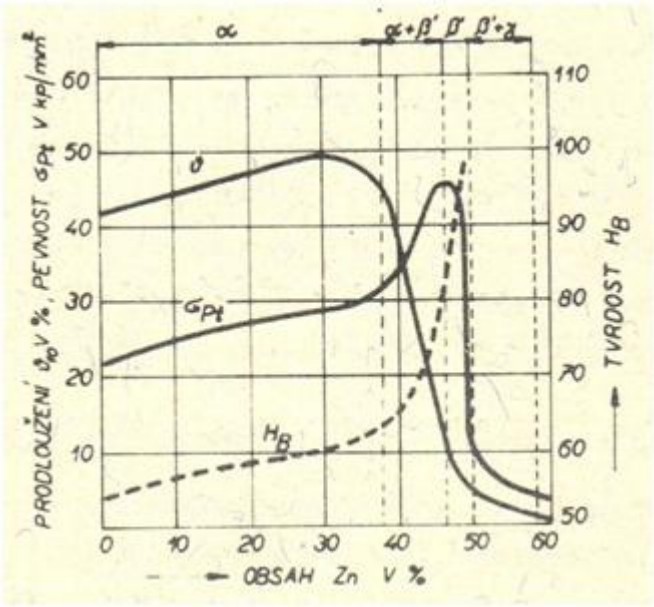


Obr. 6 Zkušební tyč s V vrubem [15]

4 VÝSLEDKY MECHANICKÝCH ZKOUŠEK

4.1 POPIS ZKOUŠENÉHO MATERIÁLU

Z hlediska rozsahu výroby jsou mosazi největší skupinou slitin Cu. Základem pro určení výsledné struktury mosazi je binární diagram Cu-Zn. Množství obsahu Zn ve struktuře výrazně ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti dané slitiny. S nárustem obsahu Zn vzrůstá i hodnota pevnosti v tahu. Pevnost v tahu trvale vzrůstá a dosahuje maxima přibližně při množství 45% Zn. Při koncentracích vyšších je pokles této hodnoty velmi prudký (obr. 7). Je zajímavé, že s růstem obsahu Zn vzrůstá také tažnost, jež dosahuje maxima při 32% Zn.



Obr. 7 Vliv Zn na mechanické vlastnosti [5]

Soustava Cu-Zn je základem mosazí, které však obsahují i další příměsi. Velikost jejich obsahu zpravidla vzrůstá s obsahem Zn a jejich vliv je podobný jako u čisté mědi. Rozdíl je v tom, že není rozhodující jejich vliv na elektrickou vodivost, ale na mechanické vlastnosti. Bi a S zhoršují zejména tvárnost mosazí za tepla. Podobně působí také Pb, které však zlepšuje obrobitelnost. U heterogenních mosazí se užívá až do 2%.

Zkoušený materiál CuZn40Pb2 (MS 58) patří do skupiny tvářených mosazí. Značný obsah Zn nám zaručuje vysokou pevnost a tvrdost, ale taky velkou křehkost. Přísada olova ve struktuře nám zlepšuje obrobitelnost. Tato mosaz se často označuje jako šroubová nebo automatová. [5]

Hodnoty mechanických vlastností CuZn40Pb2:

Mez pevnosti v tahu:	R_m=343 ÷ 440 MPa
Tažnost:	A_{10}=20 %
Tvrdost:	70 ÷ 100 HB
Modul pružnosti v tahu:	E=91000 ÷ 102000 MPa

Tab. 1 Chemické složení CuZn40Pb2 dle ČSN 423223

	Cu	Fe	Pb	Sn	Zn
min [%]	56,5	-	1,0	-	zbytek
max [%]	60,0	0,5	2,5	0,3	

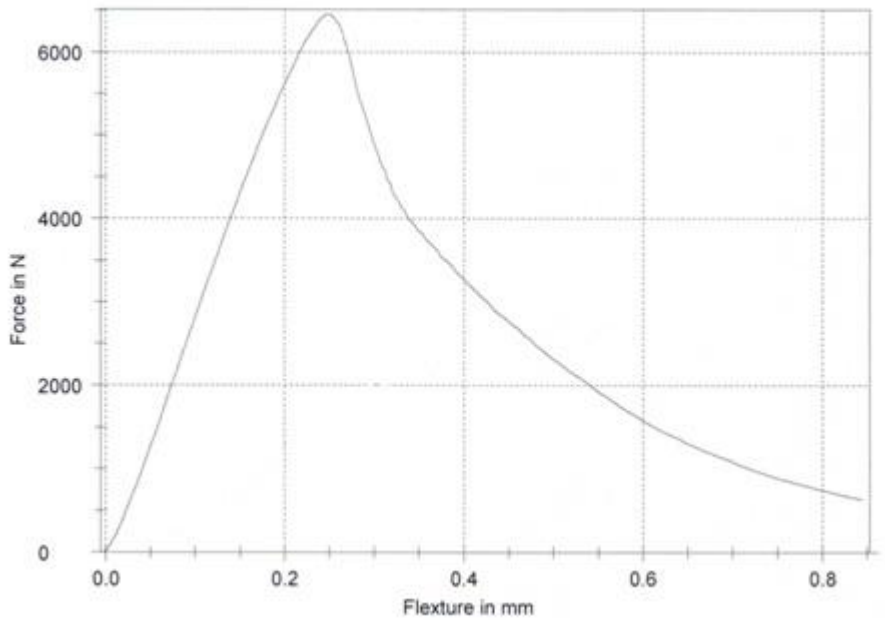
4.2 ZKUŠEBNÍ VZOREK

Oba typy zkoušek, jak statická tříbodovým ohybem tak dynamická na Charpyho kladivu, se prováděli na normalizovaných zkušebních vzorcích pro rázovou zkoušku v ohybu vyrobených z materiálu CuZn40Pb2. Zkušební vzorky byly opatřeny vrubem tvaru V viz obr. 6.

4.3 STATICKÁ ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM

Zkoušky se prováděli na univerzálním zkušebním stroji Zwick/Roell Z050. Měření byly prováděny pro 2 různé rychlosti zatěžování v_1=2 mm/min (4 měření) a v_2=1 m/min (3 měření). Výstupem této zkoušky byl diagram závislosti síly na průhybu.

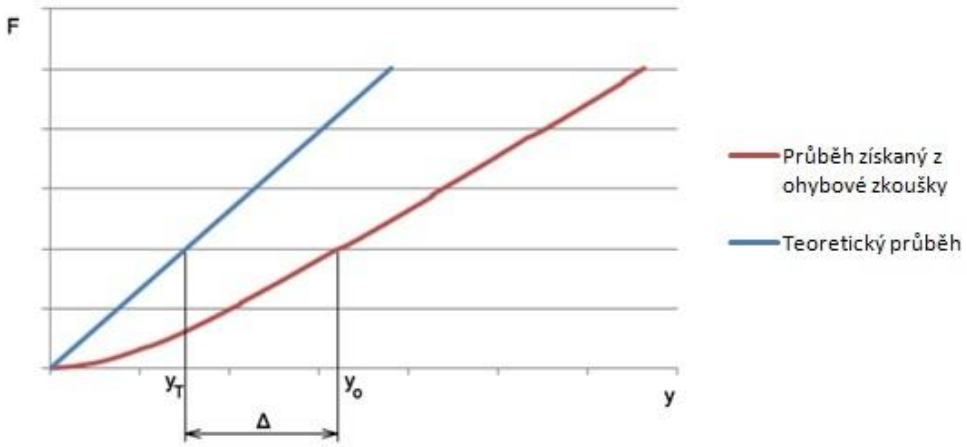
Obr. 8 Zwick/Roell Z050 [16]



Obr. 9 Diagram závislosti síly na průhybu získaný z ohybové zkoušky

4.3.1 KOREKCE DIAGRAMU

Pro zpřesnění výsledků zkoušky bylo nutné provést korekci výstupních parametrů o vůle ve stroji a jeho poddajnost. Hodnotu korekce jsem získal za pomoci oceli LV5B, pro kterou jsem znal přesnou hodnotu modulu pružnosti v tahu E=211,21 GPa. Pro tuto ocel byla provedena statická ohybová zkouška na hladkém vzorku o rozměrech 10 x 10 x 55 mm.



Obr. 10 Ohybová zkouška oceli LV5B

Hodnota teoretického průhybu y_T dané oceli se stanoví jako funkce zatěžující síly F z rovnice pro výpočet modulu pružnosti v tahu.

$$E = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot J \cdot y_T} \Longrightarrow y_T$$

$$y_T = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot J \cdot E} \tag{10}$$

Kde J je kvadratický moment

$$J = \frac{1}{12} a^4 \tag{11}$$

Rovnici pro výpočet teoretického průhybu oceli pak dostaneme ve tvaru

$$y_T = \frac{12 \cdot F \cdot l^3}{48 \cdot a^4 \cdot E} = \frac{12 \cdot 40^3}{48 \cdot 10^4 \cdot 211210} \cdot F$$

$$y_T = 7{,}5754 \cdot F \quad [mm] \tag{12}$$

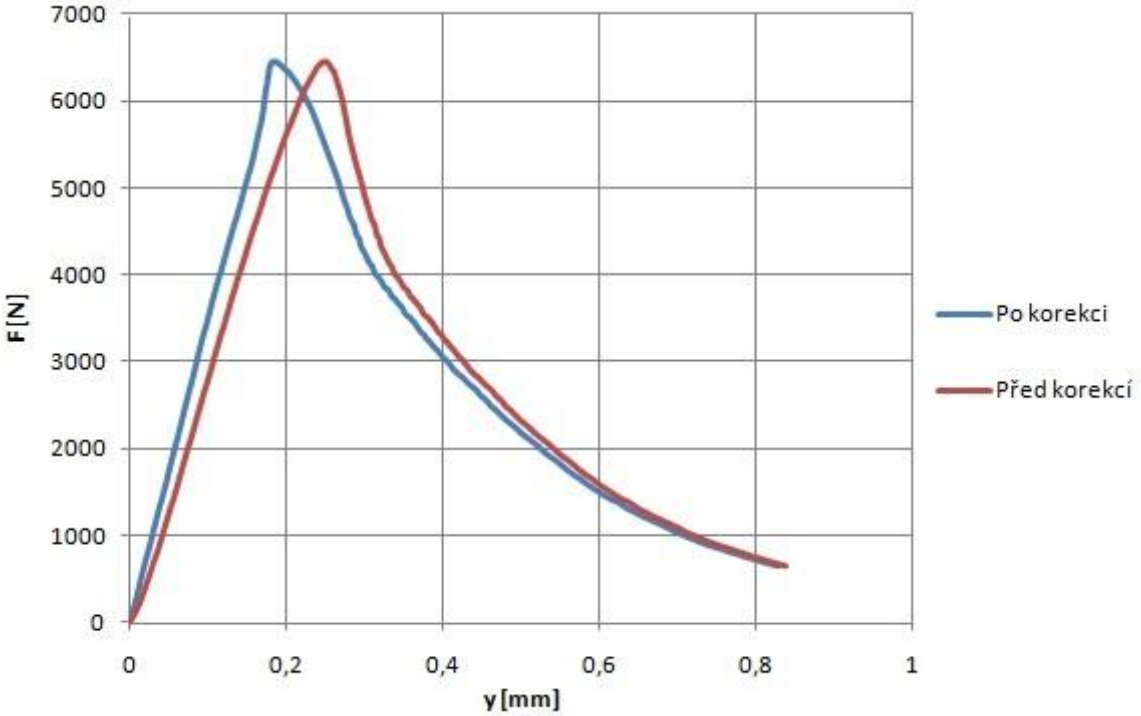
Dosazením konkrétních hodnot síly do rovnice (10) získáme velikost teoretického průhybu y_T. Hodnota korekce průhybu se poté spočítá jako rozdíl průhybu naměřeného a teoretického při dané zatěžující síle.

$$\Delta = y_O - y_T \quad [mm] \tag{13}$$

KOREKCE ZKOUŠENÉ MOSAZI

Skutečná hodnota průhybu u zkoušených vzorků mosazi se následně spočítá jako rozdíl naměřeného průhybu mosazi a korekční hodnoty.

$$y = y_m - \Delta \quad [mm] \tag{14}$$



Obr. 11 Graf závislosti zatěžující síly na průhybu před a po korekci

4.3.2 VÝPOČET PRÁCE POTŘEBNÉ K PŘELOMENÍ ZKUŠEBNÍ TYČE

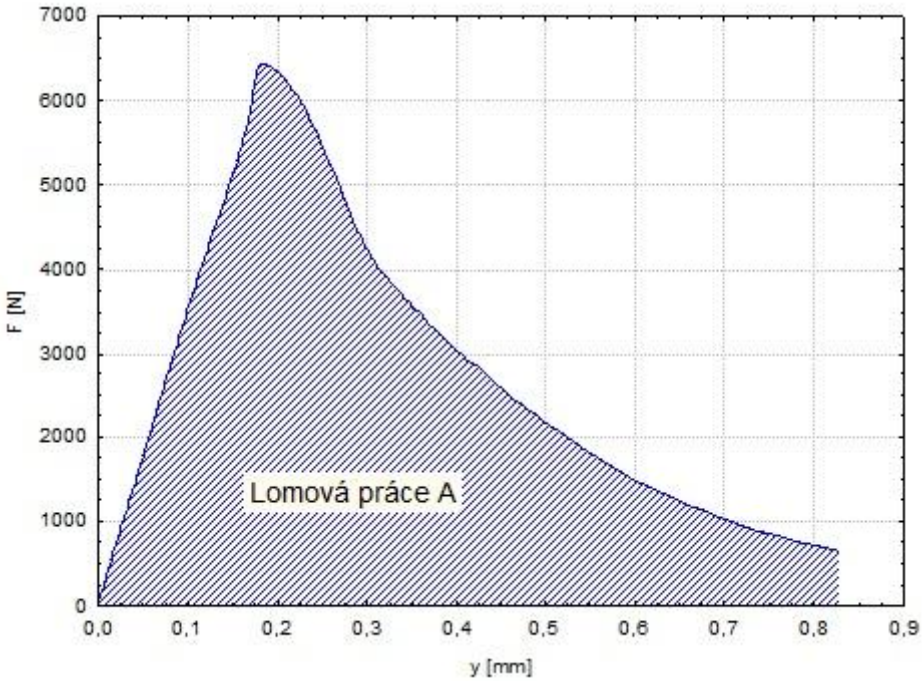
Hodnota práce potřebné k přelomení zkušební tyče odpovídá ploše pod křivkou závislosti F-y. Velikost této plochy a tím i výsledná práce A se spočítá jako integrál

$$A = \int_0^{y_f} F \cdot dy \tag{15}$$

kde y_f je průhyb v okamžiku lomu.

Numerickou integrací, podle následujícího vztahu, byla pro jednotlivá měření spočtena výsledná hodnota práce potřebné k lomu.

$$A = \sum F_i \cdot (y_i - y_{i-1}) \tag{16}$$



Obr. 12 Znázornění velikosti práce potřebné k lomu

Tab. 2 Hodnoty práce pro v=2 mm/min

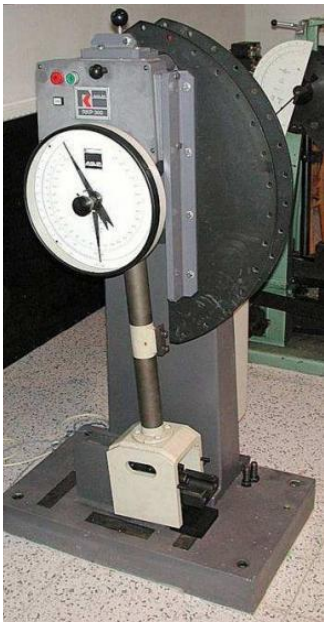
Číslo vzorku	A [J]
1	2,118
2	2,319
3	2,258
4	2,357

Tab. 3 Hodnoty práce pro v=1 m/min

Číslo vzorku	A [J]
5	3,578
6	3,624
7	3,622

4.4 RÁZOVÁ ZKOUŠKA V OHYBU

Zkoušky se prováděli na rázovém kladivu Amsler RKP 300. I v tomto případě byly prováděny zkoušky při dvou různých rychlostech zatěžování a to v_3=1,42 m/s a v_4=5,24 m/s (4 měření pro obě rychlosti). Výstupem této zkoušky byla přímo hodnota práce spotřebované pro přeražení zkušební tyče.



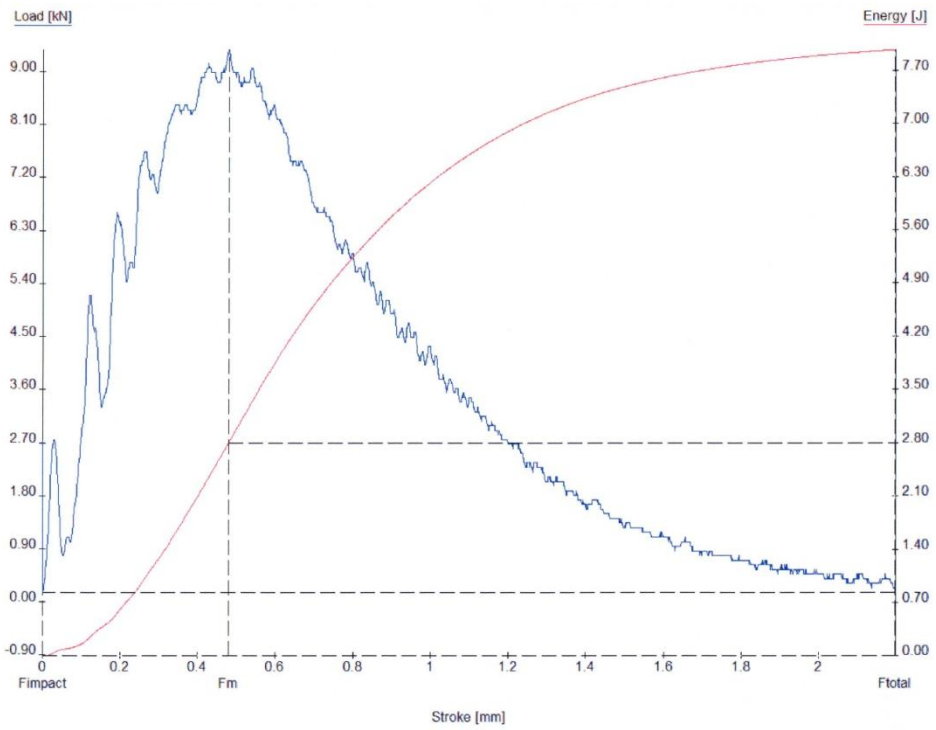
Obr. 13 Amsler RKP 300

Tab. 4 Hodnoty práce pro v=1,42 m/s

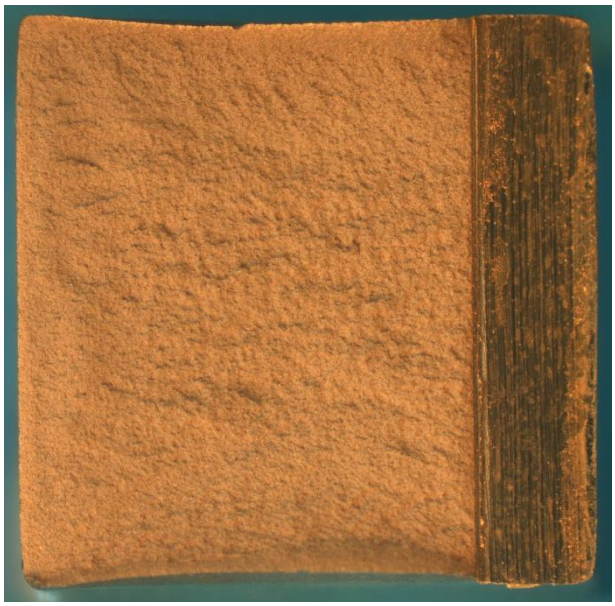
Číslo vzorku	A [J]
8	7,147
9	7,231
10	7,062
11	7,609

Tab. 5 Hodnoty práce pro v=5,24 m/s

Číslo vzorku	A [J]
12	9,466
13	9,847
14	9,605
15	10,029



Obr. 14 Diagram závislosti síly na průhybu získaný z rázové zkoušky



Obr. 15 Vzhled lomové plochy po přerážení vzorku Charpyho kladivem

4.5 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

U každé rychlosti zatěžování bylo prováděno více měření, proto je nutné provést statistický rozbor jednotlivých výsledků. Je tedy nutné vypočítat aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{17}$$

rozptyl

$$s^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \tag{18}$$

a směrodatnou odchylku

$$s = \sqrt{s^2} \tag{19}$$

Tab. 6 Statistické zpracování výsledků

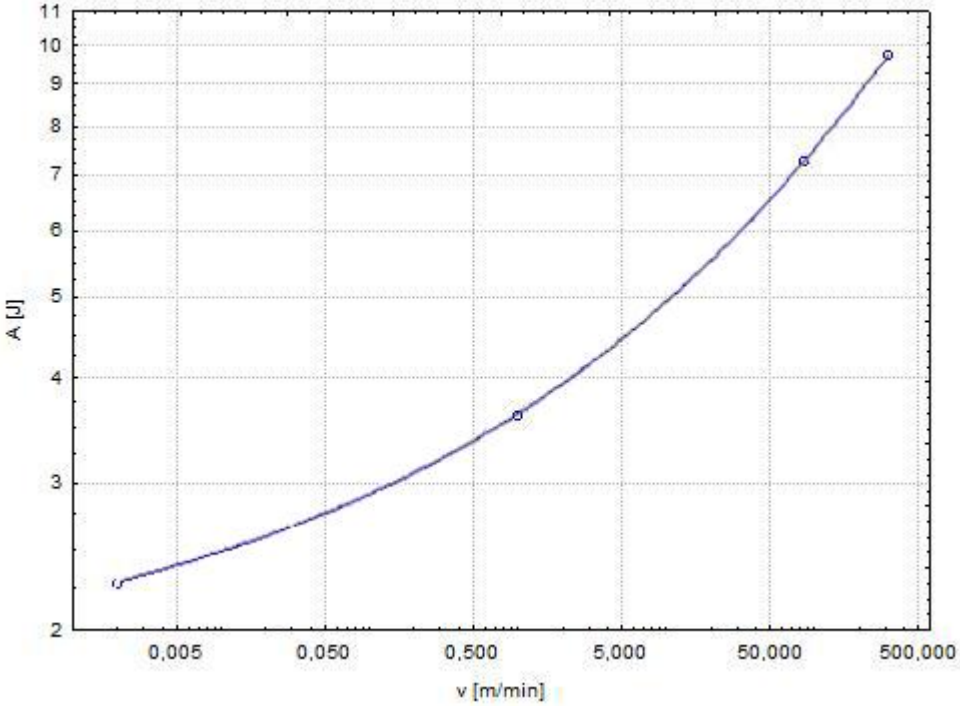
Rychlost zatěžování v	Aritmetický průměr $\bar{x}$ [J]	Rozptyl s^2 [J^2]	Směrodatná odchylka s [J]
2 *mm/min*	2,263	0,00825	0,0908
1 *m/min*	3,608	0,00045	0,021
1,42 *m/s*	7,262	0,0473	0,217
5,24 *m/s*	9,737	0,0422	0,205

4.6 ZÁVISLOST PRÁCE NA RYCHLOSTI ZATĚŽOVÁNÍ

Ze statistického rozboru jsem získal průměrné hodnoty práce potřebné pro přelomení zkušební tyče při dané rychlosti zatěžování. Vynesením těchto hodnot do grafu získám průběh závislosti těchto dvou veličin.

Tab. 7 Rychlost zatěžování a průměrná hodnota lomové práce

Rychlost zatěžování v	Průměrná hodnota lomové práce A [J]
2 *mm/min*	2,263
1 *m/min*	3,608
1,42 *m/s*	7,262
5,24 *m/s*	9,737



Obr. 16 Graf závislosti lomové práce na rychlosti zatěžování

Body v grafu jsem proložil křivkou. Rovnice, kterou je tato křivka popsána, vypadá následovně:

$$\log A = 0{,}5551 + 0{,}1249 \cdot \log v + 0{,}0188 \cdot (\log v)^2 \tag{20}$$

Po odlogaritmování této rovnice získáme vztah pro výpočet práce v závislosti na rychlosti zatěžování.

$$A = e^{1{,}278164985 + 0{,}1249 \cdot \ln v + 0{,}00816473626 \cdot (\ln v)^2} \tag{21}$$

Hodnota spolehlivosti této rovnice je R^2=0,982.

Tab. 8 Porovnání naměřené a vypočtené hodnoty lomové práce

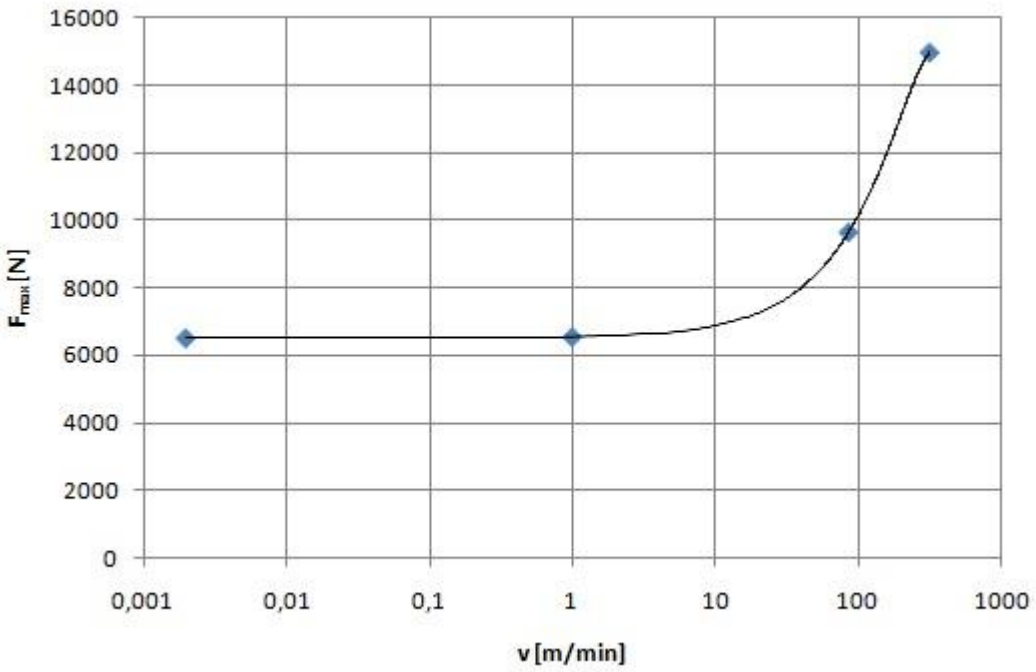
Rychlost zatěžování *v*	Naměřená hodnota lomové práce [J]	Vypočtená hodnota lomové práce [J]
2 *mm/min*	2,263	2,264
1 *m/min*	3,608	3,590
1,42 *m/s*	7,262	7,349
5,24 *m/s*	9,737	9,645

4.7 ZÁVISLOST MAXIMÁLNÍ SÍLY A PRŮHYBU NA RYCHLOSTI ZATĚŽOVÁNÍ

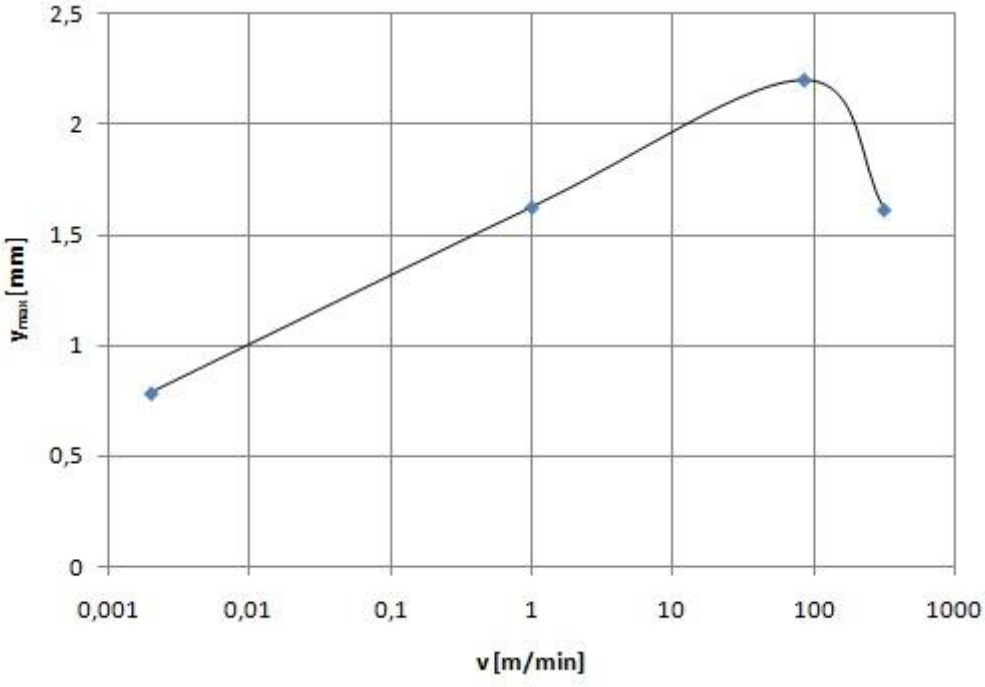
Práce potřebná pro přelomení zkušební tyče je podle rovnice (15) závislá na velikosti plochy pod křivkou síla-průhyb. Hodnota maximální síly a maximálního průhybu dosaženého při zatěžování tedy může výrazně ovlivnit výslednou velikost práce. Jestliže obě hodnoty (max. síla, max. průhyb) mají s rostoucí rychlostí zatěžování vzrůstající tendenci, pak i hodnota lomové práce bude stoupat. Opačný (klesající) průběh síly a průhybu povede ke zmenšení výsledné plochy pod křivkou průběhu zatěžování, tím pádem i ke zmenšení výsledné práce. Jestliže jedna hodnota (síla nebo průhyb) bude s rostoucí rychlostí zatěžování stoupat a druhá klesat, oba vlivy se mohou částečně kompenzovat, mohli bychom očekávat málo odlišné velikosti lomové práce při různých rychlostech zatěžování.

Tab. 9 Průměrné hodnoty max. síly a max. průhybu při dané rychlosti zatěžování

Rychlost zatěžování *v*	Průměrná hodnota lomové práce A [J]	Průměrná hodnota maximální síly F_{max} [N]	Průměrná hodnota maximálního průhybu y_{max} [mm]
2 *mm/min*	2,263	6502	0,784
1 *m/min*	3,608	6540	1,623
1,42 *m/s*	7,262	9647	2,197
5,24 *m/s*	9,737	14983	1,611



Obr. 17 Graf závislosti maximální síly na rychlosti zatěžování



Obr. 18 Graf závislosti maximálního průhybu na rychlosti zatěžování

V našem případě lze říci, že při rychlostech zatěžování 2 mm/min (0,002 m/min) a 1 m/min je maximální dosažená síla téměř stejná. Hodnota maximálního průhybu se však zdvojnásobila, což vedlo ke zvětšení lomové práce. U rychlosti zatěžování 1,42 m/s (85,2 m/min) došlo ke zvýšení obou hodnot (F_{max} a y_{max}). Velikost lomové práce taktéž stoupla. Při rychlosti 5,24 m/s (314,4 m/min) byl nárust síly tak velký, že i přes pokles průhybu způsobil zvětšení výsledné lomové práce.

ZÁVĚR

Rychlost zatěžování nemá vliv jenom na mechanické vlastnosti (zejména mez kluzu), jak je popsáno v kapitole 2, ale výrazně ovlivňuje i práci potřebnou pro přelomení zkušební tyče. Rovnice (21) nám ukazuje závislost lomové práce na rychlosti zatěžování při zkoušce tříbodovým ohybem. Tento vztah se nedá považovat za univerzální, jelikož byl odvozen pouze pro jeden materiál. Jeho použitelnost je tedy omezena na mosaz CuZn40Pb2 a rychlosti zatěžování 2 mm/min až 5,24 m/s (314 400 mm/min).

Tento materiál vykazoval při mechanických zkouškách velmi zajímavé chování. Podle logického předpokladu, by velikost lomové práce měla s rostoucí rychlostí zatěžování klesat. Zde je tomu však přesně opačně, jak lze vidět na obr. 16.

Podnětem pro tuto práci bylo, zda součást navržená na základě hodnot získaných statickou zkouškou tříbodovým ohybem snese rázové zatížení. Pro danou mosaz můžeme konstatovat, že hodnota energie spotřebované k přelomení zkušebního vzorku při statickém zatěžování je výrazně menší než hodnota spotřebované energie při zatěžování dynamickém. Tudíž návrh na základě statických hodnot je bezpečný.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] JŮZA, Aleš. *Křehkolomové vlastnosti stavebních ocelí* [online]. Praha : 2009. 159 s. Dizertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Dostupné z WWW: <http://www.ocel-drevo.fsv.cvut.cz/ODK/cz/docs/Disertace/Disertace-Juza.pdf>.

[2] VLACH, B. *Tranzitní lomové chování ocelí* [online]. [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/04%20-%20Tranzitni%20lomove%20chovani.doc>.

[3] VLK, Miloš; FLORIAN, Zdeněk. *Mezní stavy a spolehlivost* [online]. Brno : 2007 [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf>.

[4] PAVLÍKOVÁ, P. *Mechanické vlastnosti plastů* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Eva Molliková, Ph.D.,Paed IGIP. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_ prace_soubor_verejne.php?file_id=7058>.

[5] RYŠ, Přemysl; KLESNIL, Mirko; USTOHAL, V. *Nauka o materiálu*. Brno : VAAZ, 1965. 725 s.

[6] *CoJeCo* [online]. [cit. 2011-05-18]. Vrubová houževnatost. Dostupné z WWW: <http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=105031&title=vrubov%E1%20hou%9Eevnatost&s_lang=2>.

[7] VLACH, B.; LANGER, P. *Zkouška rázem v ohybu* [online]. [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <jaja.kn.vutbr.cz/~janirek2/dok/materialy/5tRaz.doc>.

[8] PŘEMYSL, Janíček. *Mechanika těles : pružnost a pevnost*. 3. přeprac. vyd. Brno : CERM, 2004. 287 s. ISBN 80-214-2592-X.

[9] ONDRÁČEK, Emanuel. *Mechanika těles : pružnost a pevnost*. 4. přeprac. vyd. Brno : CERM, 2006. 262 s. ISBN 80-214-3260-8.

[10] BANERJEE, Biswajit. *An evaluation of plastic flow stress models for the simulation of high-temperature and high-strain-rate deformation of metals* [online]. 2005, [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <www.imechanica.org/files/CuPlasticCompare.pdf >.

[11] JOHNSON, Gordon R.; COOK, William H. *A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures*. [online]. [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~cabelb/ENGINEERING_PROJECT/Other/Reference/A%20constitutive%20model%20and%20data%20for%20metals%20subjected%20to%20large%20strains,%20high%20strain%20rates%20and%20high%20temperatures.PDF>.

[12] FOREJT, Milan, et al. *Experimentální metody* [online]. 2003, [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf>.

[13] *Mechanické vlastnosti* [online]. [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <http://www.ateam.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf>.

[14] *Statické zkoušky* [online]. [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <http://www.primat.cz/download.php?id=19989 >.

[15] MOLLIKOVÁ, E., et al. *Zkouška rázem v ohybu*. [online]. [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umvi/zk.raz.ohybu.pdf>.

[16] *Kutlu Mümessillik Ltd. Şti. Zwick/Roell Türkiye Temsilcisi* [online]. 2005 [cit. 2011-04-30]. Dostupné z WWW: <http://www.kutlultd.com.tr/tr/>.

[17] HOLZMANN, Miloslav; KLESNIL, Mirko. *Křehký a únavový lom materiálů a konstrukcí*. 1. vyd. Brno : VUT, 1972. 199 s.

[18] *MATEMATIKA online* [online]. 2005 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <http://mathonline.fme.vutbr.cz/?server=1>.

SEZNAM PŘÍLOH

Data získaná z mechanických zkoušek jsou přiložena na CD k elektronické podobě vlastní práce.