

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA FAKULTA STROJNÍ



ÚNAVA MATERIÁLU

Křehký lom, základní mechanické vlastnosti materiálu

Ing. Martin Fusek, Ph.D.

Dr. Ing. Adámková Ludmila

Ostrava 2013

© Ing. Martin Fusek, Ph.D., Dr. Ing. Adámková Ludmila

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3024-7



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

OBSAH

4	KŘEHKÝ LOM, ZÁKLADNÍ MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU ...	3
4.1	Pojem křehkého lomu	4
4.2	Tahová zkouška.....	4
4.3	Vliv teplot na mechanické vlastnosti materiálu	6
4.4	Vliv tloušťky na lom těles.....	7
4.5	Řešené příklady	8
4.6	Příklady na procvičení.....	9
4.7	Literatura.....	10



4 KŘEHKÝ LOM, ZÁKLADNÍ MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU



OBSAH KAPITOLY:

Pojem křehkého lomu.

Tahová zkouška.

Vliv teplot na mechanické vlastnosti materiálu.

Vliv tloušťky na lom těles

Smluvní a skutečné napětí.

Smluvní a logaritmická deformace.



MOTIVACE:

Porušování soudržnosti materiálu nazýváme lomem. Lom může být ve své podstatě lidem užitečný (např. dobývání nerostů), anebo neužitečný (havárie konstrukcí). Abychom dokázali lomům předejít, je nutno zkoumat příčiny, které vedou k lomu těles a konstrukcí.

V této kapitole jsou uvedeny výpočty smluvního a skutečného napětí a smluvní a logaritmické deformace součástí namáhaných tahovým zatížením.



CÍL:

Definice pojmu náhlý lom konstrukčních ocelí. Statická tahová zkouška.

Vliv teploty a tloušťky těles na náchylnost k nestabilnímu lomu.



4.1 POJEM KŘEHKÉHO LOMU

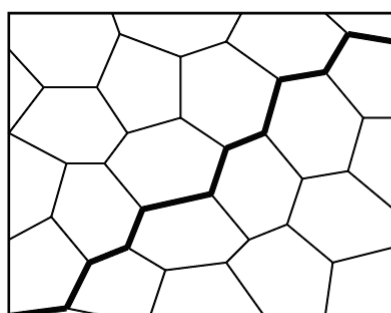
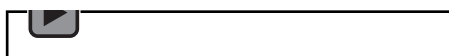
Ke křehkému lomu dochází při napětí menším než mez kluzu. Charakteristické pro tyto lomy je to, že k lomům dochází bez větší výstrahy, např. zvýšenou deformací.

V souvislosti s porušováním kovů hovoříme o stabilním a nestabilním lomu. Lom je stabilní, jestliže k šíření trhliny je nutno z vnějšku přivádět další energii k překonání odporu materiálu proti jejímu růstu. Nestabilní lom přivod energie nepotřebuje, k destrukci materiálu postačí deformační energie akumulovaná v materiálu.

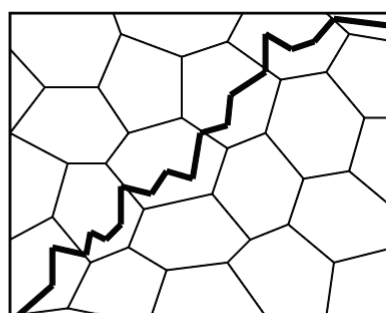
Lom je porušení součástí v celém jejím průřezu, který se uskutečňuje vznikem a šířením trhlin. Z hlediska mechanismu porušování mohou být lomy tvárné, štěpné anebo smíšené. Tvárný anebo houževnatý lom je takový, kterému předchází větší plastická deformace, štěpnému lomu předchází minimální plastická deformace. Podle toho, kterými místy ve struktuře lom prochází, rozdělujeme lomy na interkrystalické (lom probíhá podél hranic krystalických zrn – obr.1 a) a transkrystalické (lom probíhá přes zrna- obr.1 b).



Audio 4.1 Křehký lom



a)



b)

Obrázek 1

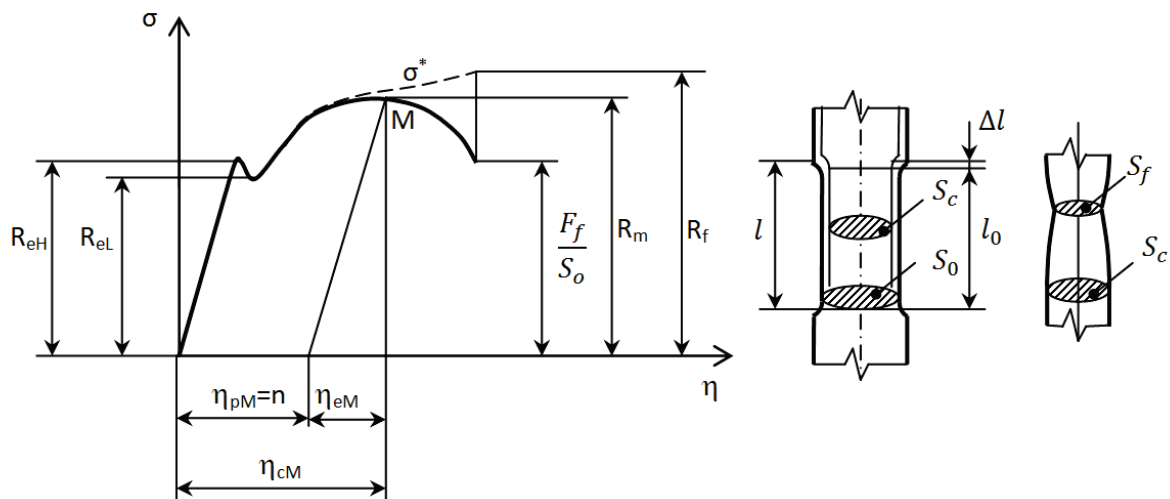
4.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA

Je nejrozšířenější zkouškou k získání mechanických vlastností materiálu. Při této zkoušce se sleduje závislost mezi prodloužením zkušební tyče a působící silou, respektive závislost mezi normálovým napětím σ a logaritmickou deformací η . Závislost napětí σ na logaritmické deformaci η je znázorněna na obr.2.



Audio 4.2 Tahová zkouška





Obrázek 2

Normálové napětí σ je definováno jako podíl zátěžné síly F a počáteční plochy průřezu S_0 , tedy

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (4.1)$$

Okamžitá (logaritmická) deformace η je rovna

$$\eta = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \right) = \ln(1 + \varepsilon) \cong \varepsilon \quad (4.2)$$

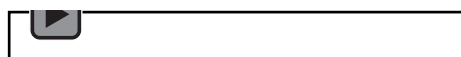
Skutečné napětí σ^* je rovno

$$\sigma^* = \frac{F}{S_0} \quad (4.3)$$

Průběh napětí σ^* je v obr. 2 vyznačen čárkovanou čarou. Pokud je napětí menší než mez kluzu R_e (v obr.2 je R_{eH} horní mez kluzu a R_{eL} dolní mez kluzu), jsou deformace elastické. Po překročení meze kluzu materiálu dochází ke zpevňování materiálu, síla nutná k prodlužování vzorku vzrůstá stále pomaleji, až na mezi pevnosti (bod M) dosáhne maxima. Za tímto bodem dochází k zaškrcování vzorku. Zpevnění již nestačí vyvážit zužování příčného průřezu a zatěžující síla začne při pokračujícím prodlužování vzorku klesat.



Audio 4.3



Bod M nazýváme bodem nestability statické deformační křivky. Pro tento bod platí $F = S\sigma^* = \text{konst.}$ (4.4)

Z podmínky konstantního objemu tyče

$$V = Sl = \text{konst.} \quad (4.5)$$

dostaneme

$$\frac{dS}{S} + \frac{dl}{l} = 0 \Rightarrow \frac{dS}{S} + d\eta = 0. \quad (4.6)$$

V bodě M je

$$dF = \sigma^* dS + S d\sigma^* = 0 \quad (4.7)$$

odtud

$$\frac{d\sigma^*}{\sigma^*} = d\eta \quad (4.8)$$

Celková deformace η_c je rovna součtu deformace elastické η_e a plastické η_p .

Pro bod M tedy platí

$$\eta_{cM} = \eta_{em} + \eta_{pM} = \frac{\sigma^*}{E} + \left(\frac{\sigma^*}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4.9)$$



V rovnici (4.9) je pro výpočet plastické deformace η_{pM} použito Ramberg-Osgoodova vztahu. K je součinitel pevnosti a n exponent deformačního zpevnění materiálu.

Jestliže derivujeme rovnici (4.9) podle σ^* , obdržíme po úpravě

$$\eta_{pM} = n. \quad (4.10)$$

Dále se při tahové zkoušce zjišťuje tažnost A (poměrné prodloužení v %) a kontrakce Z (zúžení průřezu).



Audio 4.4



Tažnost A je poměr prodloužení délky zkušební tyče l_p po přetržení k počáteční měřené délce l_0 , vyjádřené v %, tedy

$$A = \frac{l_p - l_0}{l_0} \times 100\%. \quad (4.11)$$

Homogenní příčná kontrakce Z_c je definována následovně

$$Z_c = \frac{S_0 - S_c}{S_0} \quad (4.12)$$

kde S_0 je plocha počátečního průřezu a S_c je plocha příčného průřezu vzorku po přetržení mimo oblast zaškrvení. Dále je definována příčná kontrakce Z , která je vztažena k průřezu krčku S_f

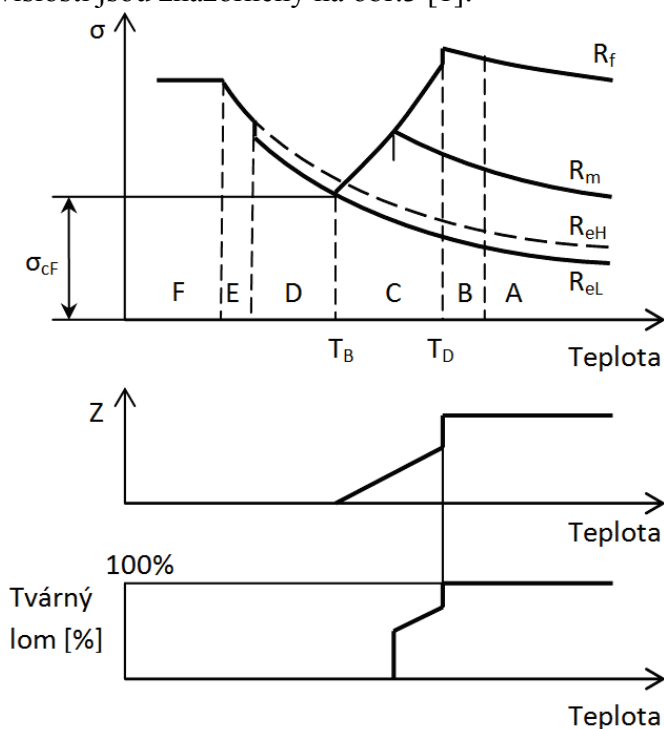
$$Z = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \quad (4.13)$$

Smluvní napětí při přetržení je vyjádřeno vztahem $\frac{F_f}{S_0}$ (obr.2). Skutečné napětí při přetržení R_f je rovno

$$R_f = \frac{F_f}{S_0(1-Z)} \quad (4.14)$$

4.3 VLIV TEPLOT NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU

Současná technika umožňuje provádět tahové zkoušky až do teploty kapalného helia, tj. -269°C . Teplotní závislosti jsou znázorněny na obr.3 [1].

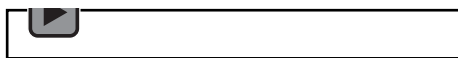


Obrázek 3

Z obr.3 je zřejmé, že se vzrůstající teplotou dochází k poklesu mechanických vlastností materiálu.



Audio 4.5 Vliv teplot na mechanické vlastnosti materiálu



Celou teplotní závislost lze rozdělit do několika oblastí A-F.

Oblast A – tvárný lom po velké plastické deformaci, velká hodnota kontrakce Z.

Oblast B – okraje vzorků – porušení štěpným lomem, střed tvárný.

Oblast C – lom štěpným způsobem, ale po určité plastické deformaci dané nenulovou kontrakci Z. Lomové napětí klesá k dolní mezi kluzu R_{el} .

Oblast D – lom na dolní mezi kluzu R_{el} . Zcela křehký lom.

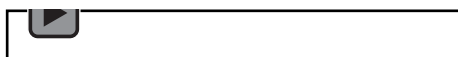
Oblast E – lom na horní mezi kluzu R_{eH} .

Oblast F – lom při napětí nižším než extrapolovaná mez kluzu .

V obr.3 jsou znázorněny dvě přechodové teploty - T_B - tranzitní teplota křehkosti a T_D - tranzitní teplota houževnatosti. V rozmezí těchto dvou teplot dochází ke změně charakteru lomu – z tvárného na štěpný.



Audio 4.6 Teploty



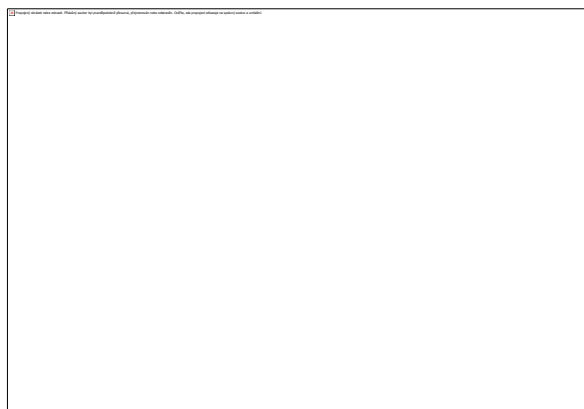
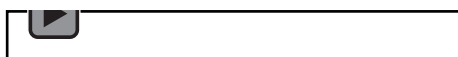
4.4 VLIV TLOUŠŤKY NA LOM TĚLES

Náchylnost ke křehkému lomu je rovněž závislá na tloušťce tělesa. U těles a součástí větších tloušťek nelze předpokládat rovnoměrnou strukturu materiálů po celé tloušťce.

Je zřejmé, že každý materiál vykazuje odpor proti šíření trhlin R. Experimenty bylo prokázáno, že odpor proti šíření trhlin závisí na tloušťce tělesa podle obr.4.



Audio 4.7 Vliv tloušťky na lom



Obrázek 4

V I. oblasti se jedná o velice malé tloušťky (cca do 1mm). U tělesa je předpokládán stav rovinné napjatosti RN. Odpor R je přímo úměrný tloušťce materiálu a mezi kluzu, tedy

$$R = 2R_e B \quad (4.15)$$

Pouze I. oblast lze popsat matematicky.



Ve II. oblasti dosahuje odpor proti šíření trhliny maxima. Tloušťka materiálu, v níž převládá rovinná napjatost u povrchů, nabývá zhruba stejného rozsahu jako oblast rovinné deformace (RD) uvnitř tělesa.

Ve III. oblasti odpor materiálu proti šíření trhliny klesá. Přebývá rovinná deformace RD. Plastická zóna není malá vzhledem k rozměrům tělesa a trhliny. Problematikou těles s trhlínami se zabývá elasticko-plastická lomová mechanika EPLM.

Ve IV. oblasti není již odpor materiálu proti šíření trhliny R závislý na tloušťce tělesa. Problematikou těles s trhlínami se zabývá lineární -elastická lomová mechanika LELM.

K zapamatování:

- Křehký lom - napětí menší než makroskopická mez kluzu.
- Lom je stabilní, jestliže k šíření trhliny je nutno z vnějšku přivádět další energii k překonání odporu materiálu proti jejímu růstu. Nestabilní lom přívod energie nepotřebuje, k destrukci materiálu postačí deformační energie akumulovaná v materiálu.
- Tvárný (houževnatý) lom - předchází větší plastická deformace.
- Štěpný lom - předchází minimální plastická deformace.
- Tahová zkouška – nejrozšířenější zkouška technických materiálů – určuje se mez kluzu R_e , mez pevnosti R_m , tažnost A a kontrakce (zúžení průřezu) Z .
- Mez kluzu R_e , mez pevnosti R_m - závislé na teplotě. Se vzrůstající teplotou pokles mechanických vlastností.
- Extrémně nízké teploty – lom při napětí nižším než extrapolovaná mez kluzu R_e .
- Dvě přechodové teploty - T_B - tranzitní teplota křehkosti a T_D - tranzitní teplota houževnatosti. V rozmezí těchto dvou teplot dochází ke změně charakteru lomu – z tvárného na štěpný.
- Náchyllost ke křehkému lomu - závislá na tloušťce tělesa.

4.5 ŘEŠENÉ PŘÍKLADY

Příklad 1

Kovová tyč o průměru $d_0 = 2mm$, délky $l_0 = 150mm$ byla zatížena silou $F = 1500N$ a její průměr se zmenšil na $d_1 = 1.8mm$. Vypočítejte délku zatížené tyče, smluvní napětí, smluvní deformaci tyče a logaritmickou deformaci tyče.

Řešení:

Smluvní napětí σ_s určíme ze vztahu

$$\sigma_s = \frac{F}{\frac{\pi}{4}d_0^2} = \frac{1500}{\frac{\pi}{4} \times 2^2} = 477.7MPa.$$

Skutečnou délku l_1 určíme z rovnosti objemu

$$V = S_0 l_0 = S_1 l_1$$

odtud

$$l_1 = l_0 \frac{S_0}{S_1} = l_0 \frac{d_0^2}{d_1^2} = 150 \times \left(\frac{2}{1.8}\right)^2 = 185mm.$$

Smluvní deformace ε je rovna

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{185 - 150}{150} = 0.233$$

a logaritmická deformace η

$$\eta = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \frac{185}{150} = 0.21.$$

Příklad 2



Vypočtete homogenní příčnou kontrakci Z_c tyče namáhané tahem, jestliže tažnost materiálu, ze kterého je tyč vyrobena je $A = 18\%$.

Řešení:

Homogenní příčná kontrakce Z je rovna

$$Z_c = \frac{S_0 - S_c}{S_0}$$

odtud

$$\frac{S_c}{S_0} = 1 - Z_c$$

Pro tažnost platí

$$A = \frac{l_c - l_0}{l_0} \times 100\%$$

Odtud

$$\frac{l_0}{l_c} = \frac{1}{1 + \frac{A}{100}}$$

Z podmínky rovnosti objemu

$$\frac{l_0}{l_c} = \frac{S_c}{S_0}$$

a odtud

$$Z_c = 1 - \frac{S_c}{S_0} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{A}{100}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{18}{100}} = 0.152$$

4.6 PŘÍKLADY NA PROCVIČENÍ

Příklad 1

Vypočtete skutečné napětí $\bar{\sigma}$ ocelové tyče namáhané jednoosým tahem, jestliže smluvní napětí $\sigma = 100\text{MPa}$ a modul pružnosti $E = 2 \times 10^5\text{MPa}$.

Výsledek: $\bar{\sigma} = 100.05\text{MPa}$



4.7 LITERATURA

- [1] Kučera, J. *Úvod do mechaniky lomu. Nestabilní lom ocelových těles při statickém a dynamickém zatížení*. VŠB-TU Ostrava, 2006. 297s. Skriptum. ISBN 80-248-1268-1.
- [2] Zemánková, J. *Technická mechanika I. Úvod do lomové mechaniky*. ČVUT Praha, 1981. 123s. Skriptum. ISBN 80-7078-244-7.
- [3] Dowling, N.E. *Mechanical behavior of materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture and fatigue*. Third edition. Pearson Prentice Hall, 2007. ISBN 0-13-186312-6.
- [4] Vlk, M. Florian, Z. *Mezní stavy a spolehlivost*. Elektronický učební text. www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf
- [5] Wang, C.H. *Introduction to fracture mechanics*. Elektronický učební text. www.dsto.defence.gov.au/publications/1880/DSTO-GD-0103.pdf

