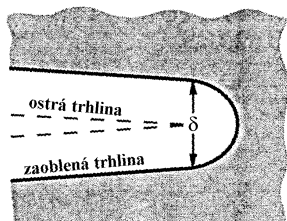


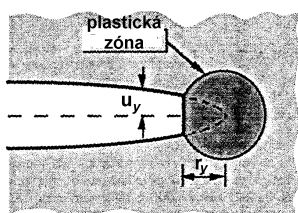


Elasticko-plastická lomová mechanika

K popisu lomového chování materiálů, u kterých před porušením dochází k časově nezávislé plastické deformaci se používá elasticko-plastická lomová mechanika. K popisu např. teplotní závislosti lomové houževnatosti ocelí je nutné použít i parametry, které zavádí tato lomová mechanika. V současné době existují dva parametry – rozevření v kořeni trhliny (CTOD – crack tip opening displacement) a křivkový J integrál. Obě veličiny popisují podmínky na čele trhliny v elasticko-plastickém materiálu a obě mohou být použity jako lomové kritérium.



↑Obr.1 Obr.2↓



Kritické rozevření v kořeni trhliny δ_c i kritická hodnota J integrálu vyjadřují hodnoty lomové houževnatosti přibližně nezávislé na velikosti tělesa i pro poměrně velké množství plastické deformace v okolí čela trhliny. Opět existují jisté meze z hlediska rozsahu plastické deformace, které omezují platnost těchto kritérií.

Kritické rozevření trhliny

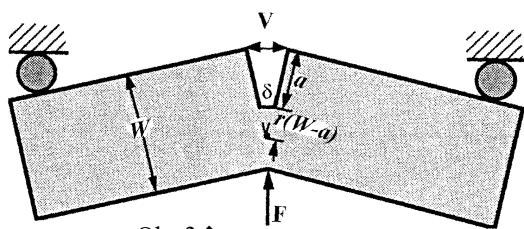
Když Wells měřil hodnoty K_{IC} pro řadu konstrukčních ocelí zjistil, že tyto materiály jsou příliš houževnaté, aby mohly být charakterizovány LELM. Tento objev měl za následek dva závěry, jeden pozitivní a druhý negativní: vysoká houževnatost je samozřejmě žádoucí jak pro konstruktéra tak i technologa, ale špatné bylo, že existující teorie lomové mechaniky není aplikovatelná pro velice důležitou skupinu konstrukčních materiálů. Při zkouškách Wells zjistil, že před lomem se líce trhliny během zatěžování oddalují a dochází k otupování původně ostrého kořene trhliny, jak ukazuje obr.1. Velikost zaoblení trhliny, nebo lze také říci velikost rozevření na čele trhliny, roste úměrně s houževnatostí materiálu. Tato pozorování vedla Wellse k myšlence použít rozevření ve špičce trhliny jako veličinu charakterizující lomovou houževnatost. V současné době je tento

parametr znám jako CTOD, případně označován symbolem δ_c .

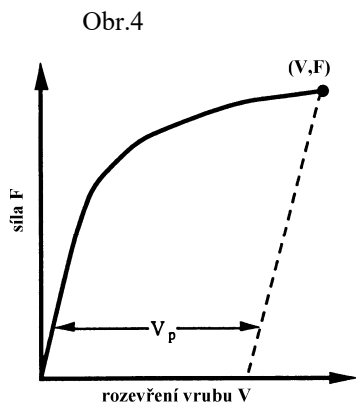
V původní Wellsově práci je ukázáno, že hodnota CTOD v oblasti platnosti LELM má jednoznačný vztah k hodnotě K_I resp. G. Uvažujme trhlínu s malou plastickou zónou, jak je uvedeno na obrázku 2. Irwin ukázal, že plastická deformace na čele trhliny způsobí, že trhlina se chová jako by byla nepatrně delší (hovoříme o tzv. efektivní délce trhliny). Odhad rozevření trhliny δ provedeme tak, že vypočteme posunutí v místě skutečného kořene trhliny za předpokladu efektivní délky trhliny $a + r_y$. Z tab. 1b uvedené v předchozím sešitě je přemístění

dáno vztahem $u_y = \frac{\kappa+1}{2\Gamma} K_I \sqrt{\frac{r_y}{2\pi}}$ (pozn. Γ je modul ve smyku) rov.(1) a Irwinova korekce trhliny na velikost

plastické zóny je $r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2$ rov.(2) a dosazením (2) do (1) dostaneme $\delta = 2u_y = \frac{4}{\pi} \frac{K_I^2}{R_e E}$ rov.(3).



Obr.3↑



V literatuře existuje řada jiných a složitějších odvození,

za obecný bývá považován výraz $\delta = \frac{K_I^2}{m R_e E} = \frac{G}{m R_e}$,

kde m je bezrozměrná konstanta rovná přibližně 1,0 pro RN a 2,0 pro RD.

Většina laboratorních měření δ byla prováděna na jednostranně vrubovaných tělesech s únavovou trhlínou zatěžovaných tříbodovým ohybem. První měření rozevření trhliny se dělalo snímačem opatřeného tenkým plátkem, který se vkládal do trhliny. Během zatěžování,

jak se trhlina rozevírala, plátek se natáčel, velikost natočení plátku se převáděla na elektrický signál a na x-y zapisovač. Tato metoda byla nepřesná, protože bylo obtížné dosáhnout koncem plátku až ke kořeni trhliny. Dnes je rozevření V měřeno v místě vyústění trhliny na povrch zkušebního tělesa (proto se používá termín rozevření vrubu, někdy se používá termín rozevření ústí trhliny-CMOD) a hodnota δ je odvozena z představy, že poloviny vzorku jsou tuhé a otočné v plastickém kloubu, jak je schematicky ukázáno na obr. 3. Podle tohoto obrázku můžeme hodnotu δ určit z měřené hodnoty V na základě podobnosti trojúhelníků

$$\frac{\delta}{r(W-a)} = \frac{V}{r(W-a)+a} \quad \text{a} \quad \text{odtud} \quad \delta = \frac{r(W-a)V}{r(W-a)+a} \quad \text{rov.(4),}$$

kde r je rotační faktor – bezrozměrná veličina jejíž hodnota leží mezi nulou a jedničkou.



Model plastického kloubu je nepřesný, když je rozevření převážně elastické. Z tohoto důvodu byla metodika měření δ_C upravena tak, že rozevření V je rozděleno na část elastickou a část plastickou. Model plastického kloubu je použit pouze pro část plastickou. Na obr. 4 je schematicky vyznačena charakteristická závislost síla F – rozevření vrubu V získaná při zkoušce CTOD. Tvar křivky je podobný tahovému diagramu hladkých těles, na začátku je přímkový a pak dochází vlivem plastické deformace k odklonu křivky od přímky elastických deformací. V každém bodě této závislosti je možné hodnotu V rozdělit na část elastickou a plastickou pomocí přímky, která je rovnoběžná s počáteční přímkou elastických deformací (na obr. 4. – V_p plastická část rozevření). Hodnota rozevření trhliny se počítá podle vztahu

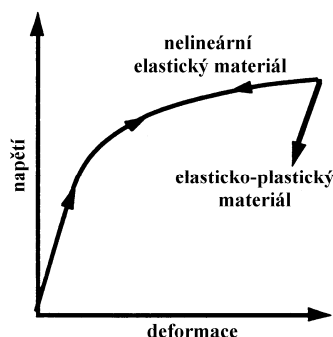
$$\delta = \delta_{el} + \delta_p = \frac{K_I^2}{mR_e E'} + \frac{r_p(W-a)V_p}{r_p(W-a) + a}, \quad \text{rov (5)}$$

indexy „el“ a „p“ označují elastickou a plastickou složku deformace.

Hodnota δ určená pro okamžik lomu se označuje symbolem δ_C a vyjadřuje lomovou houževnatost označovanou jako kritická hodnota rozevření trhliny.

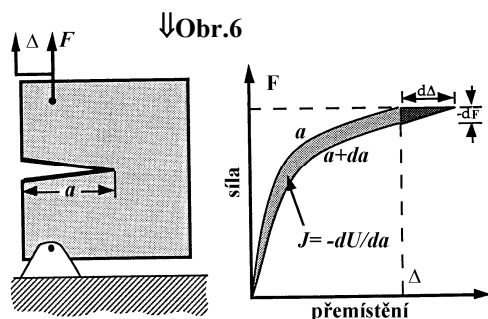
Křivkový J integrál (J proto, že autor se jmenoval J. Rice)

Křivkový J-integrál slavil velký úspěch jako parametr charakterizující lom materiálu u něhož je závislost $\sigma \approx \varepsilon$ nelineární. Idealizací elasticko-plastické deformace jako nelineární elastické Rice položil základ k rozšíření lomové mechaniky za hranice platnosti LELM.



⇐Obr. 5 ilustruje chování dvou materiálů – nelineárně elastického a elasticko – plastického – při tahové zkoušce. Chování těchto materiálů při zatěžování je stejné a liší se pouze při odlehčování. Pokud napětí v obou materiálech roste monotónně, je mechanická odezva u těchto materiálů identická. Deformační teorie plasticity, která dává do relace deformace a napětí v materiálu, je ekvivalentní teorii nelineární elasticity.

Rice použil deformační plasticitu (t.j. nelineární elasticitu) k analýze poměrů v okolí trhliny v nelineárním materiálu. Ukázal, že J_I představuje změnu potenciální energie tělesa dU při změně délky trhliny o da



$$J_I = -\frac{dU}{da} \quad \text{rov. (6). Tento vztah je formálně}$$

stejný jako definiční rovnice rychlosti uvolňování elastické energie G . Opět se zde dokazovalo, podobně jako v případě G , že veličina J_I je nezávislá na způsobu zatěžování – tvrdé měkké, obr. 6. Opět zde analogicky existují R křivky a tedy jak nestabilní, tak i stabilní lomy.

Je však třeba zdůraznit, že hodnota energie zahrnutá ve veličině J_I není, na rozdíl od potenciální energie při pružné deformaci, k dispozici pro šíření trhliny. Veličinu J_I lze, vzhledem k odvození, chápat jako parametr charakterizující intenzitu napjatosti na čele trhliny. Rovnice (6) má mimořádný význam

pro experimentální určování hodnot J_I pro různé typy těles s trhlínami. Jestliže J_I definuje jednoznačně napjatost na čele trhliny, pak v okamžiku iniciace lomu (stabilního nebo nestabilního) J_I nabývá kritické hodnoty charakterizující odolnost materiálu proti iniciaci lomu a označované jako J_{IC} .

Měření materiálových charakteristik zavedených lomovou mechanikou.

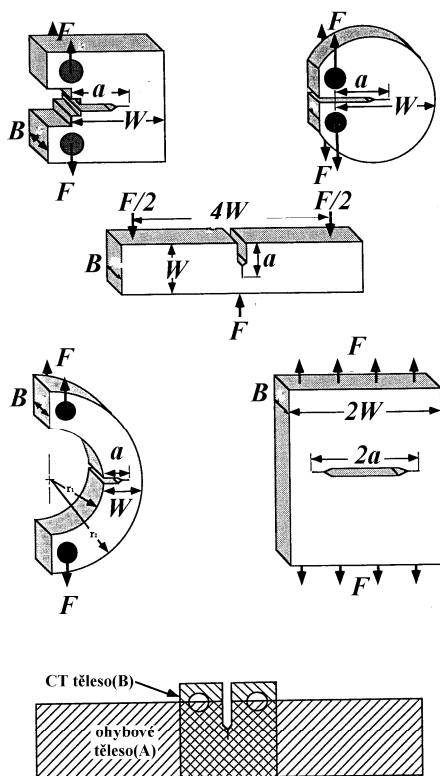
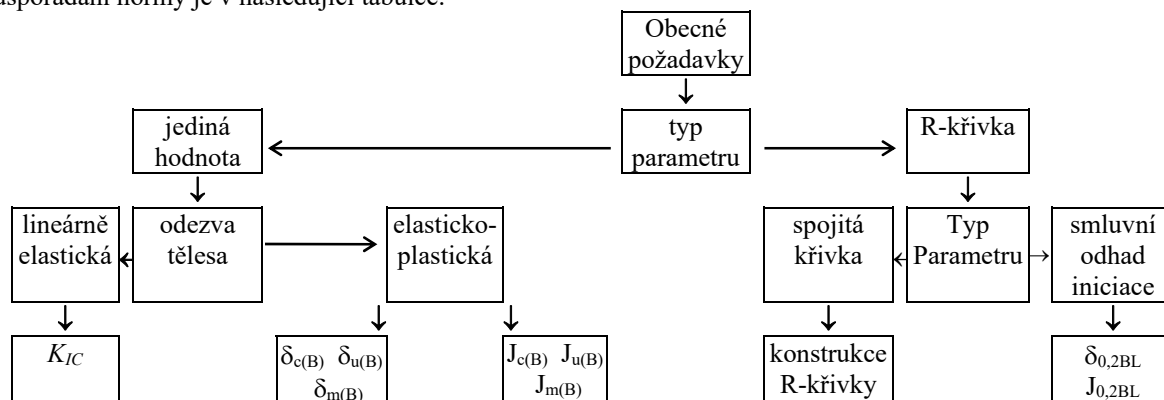
Zkoušky velkých zkušebních těles na padostroji, příp. rázovém kladivu, kde jsme určovali tranzitní teplotu, byly vyvinuty a doposud se používají pro volbu materiálu – oceli. V současné době se intenzivně rozvíjí tato filozofie pro konstrukční plasty, konkrétně plasty používané na stavbu potrubí. Zde konstruktér nic nepočítá, pouze volí takový materiál, jehož materiálová charakteristika, tranzitní teplota, je nižší ve srovnání s provozní teplotou. Stanovení odolnosti materiálu vůči porušení pomocí charakteristik zavedených lomovou mechanikou má význam jak při srovnávání a vývoji materiálů, tak i pro konstrukční výpočty. Aplikace LM není vázána na materiály vykazující tranzitní lomové chování a lze ji použít pro oceli, kovy, plasty, ale i konstrukční keramiku, beton, led a pod.

Měření lomové houževnatosti kovových materiálů

Prvé normy	K_{IC}	- ASTM E 399	(1970)
	J_C	- ASTM E 813	(1981)
	δ_C	- BS 5762	(1979)



Toto byly první normy pro měření lomové houževnatosti. Největšího rozšíření naznala norma E 399, z ní prakticky vznikly všechny národní normy. Vývoj šel tak, že moderní normy zahrnují jednotnou metodiku pro určení lomové houževnatosti kovů při kvazistatickém zatěžování. Příkladem moderních norem je jednak naše ČSN 42 0347 (rok 1990) – *Lomová houževnatost kovů při statickém zatážení* a jednak Návrh mezinárodního standardu ISO/DIS 12135 Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness (rok 1998), který by po diskusi a schválení měl být převzat do evropských norem. Základní myšlenkou obou norem je, že zkouška lomové houževnatosti stanovuje odpor materiálu vůči iniciaci, příp. šíření trhliny. Výsledkem zkoušky může být – jediná hodnota lomového parametru (K_{IC} , J a δ), - závislost některého z lomových parametrů na délce trhliny (R-křivka, příp. smluvní odhad iniciace lomu). Základní schéma uspořádání normy je v následující tabulce:



ad *Obecné požadavky*

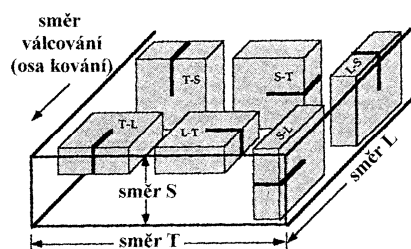
Víme z poslední přednášky i ze cvičení, že základní výraz pro výpočet faktoru intenzity napětí pro tělesa s průchozí trhlinou má tvar

$$K_I = \frac{F_f}{B\sqrt{W}} g_i\left(\frac{a}{W}\right), \text{ kde } g_i\left(\frac{a}{W}\right) \text{ je tvarový (měrný) faktor}$$

intenzity napětí, jehož hodnota je zpravidla vyjádřena polynomem; konkrétní tvar polynomu závisí na typu zkušebního tělesa a v normě jsou jeho hodnoty tabelovány v závislosti na hodnotě a/W . V prvních normách pro zkoušky bylo pět typů zkušebních těles, $\Leftarrow$ **Obr. 7.** Ve cvičení si ukážeme, že tahové těleso (vpravo dole) vyžaduje velmi vysoké síly a tedy bylo z norem vypuštěno. V ČSN je jako těleso A prostřední těleso na obr.7, které je namáháno na ohyb. Vlevo nahoře je těleso B, někdy také označované jako CT-těleso. Zbývající tělesa jsou značena podle písmenek, která připomínají D a C (jsou to vlastně CT-tělesa připravená z tyče nebo trubky). Návrh ISO zahrnuje pouze tělesa A a B. Základní rozměr každého tělesa je hodnota W (příp. tloušťka B) a ostatní rozměry jsou násobky této hodnoty (např. těleso A, tloušťka $B = W/2$, délka trhliny $a \approx W/2$, vzdálenost opor $S = 4W$). Protože zkoušky vznikly v USA, tak základní hodnota tloušťky je 1 palec, tj. 25 mm.

Na $\Leftarrow$ **obr. 8** je ukázáno porovnání tělesa A a B, vidíme, že těleso A je výrobně jednodušší a těleso B spotřebuje méně materiálu. Podobně jako u jiných zkoušek i v tomto případě je třeba dbát na orientaci zkušebního tělesa vzhledem ke směru válcování příp.

kování ($\Downarrow$ **obr9**).



Příprava ostré trhliny

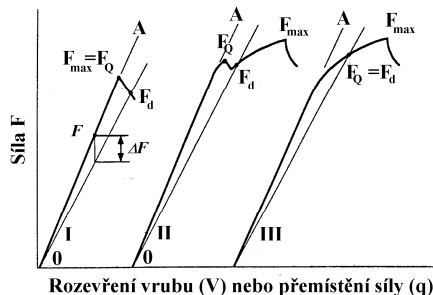
V kořeni vrubů u zkušebních těles je třeba připravit ostrou trhlinu. K přípravě trhliny se používají rezonanční pulsátory na nichž se trhlina v tělesech vytvoří cyklickým zatěžováním. Pro přípravu trhliny jsou v normě předepsány podmínky, jež mají zaručit, že plastická zóna vytvořená při cyklování na špičce trhliny bude mnohem menší než plastická zóna na špičce téže trhliny v okamžiku iniciace lomu při měření *lomové houževnatosti*. Tato podmínka by měla být



splněna, když $K_{f\max} \leq K_{IC0}$, kde $K_{f\max}$ je hodnota faktoru intenzity napětí určená z maximální síly zátěžného cyklu při dokončování únavové trhliny a K_{IC0} je očekávaná hodnota lomové houževnatosti. Po zkoušce se zpravidla kontroluje tato podmínka znovu s tím, že místo očekávané hodnoty se sem dosazuje skutečně naměřená hodnota.

Vlastní zkouška – určení jediného parametru pro charakterizování lomového chování.

Při zkoušce se zaznamenává závislost síla (F)–přemístění síly (q), případně rozevření vrubu (V), a to jak za normální teploty, tak i při zvýšených, případně snížených teplotách. Získaný záznam má jeden ze tří možných typů uvedených na **obr. 10**. Při vyhodnocení záznamu, určení síly ze které počítáme provizorní hodnotu lomové houževnatosti K_Q , postupujeme následovně:



Poznámka - $\Delta F/F$ je větší než ve skutečnosti pro lepší názornost

- Síla F_Q je brána jako nejvyšší síla v záznamu, která předchází síle F_d a je větší než síla F_d – záznam II
- Je-li hodnota síly F_d nejvyšší hodnotou v intervalu sil 0 až F_d , pak $F_Q = F_d$ – záznam III

Pak následuje odměření délky trhliny z lomové plochy, stanovení základních rozměrů zkušebního tělesa a výpočet provizorní hodnoty lomové houževnatosti podle vztahu:

$$K_Q = \frac{F_q}{B\sqrt{W}} g_i \left(\frac{a}{W} \right) \quad \text{rov (7). O skutečnosti, že odezva tělesa je lineárně – elastická a tedy, že naměřená}$$

hodnota K_Q je platnou hodnotou K_{IC} rozhodují následující podmínky

$$\textcircled{1} a, B, (W-a) \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{R_e} \right)^2 \quad \textcircled{2} F_{\max} \leq 1,1 F_Q \quad \text{musí platit v případě III} \quad \textcircled{3} K_f \leq 0,6 K_Q \frac{(R_e)_{t-\text{cyklování}}}{(R_e)_{t-\text{zkoušky}}} \quad \text{rov.(8)}$$

Dotaz zvědavého studenta:

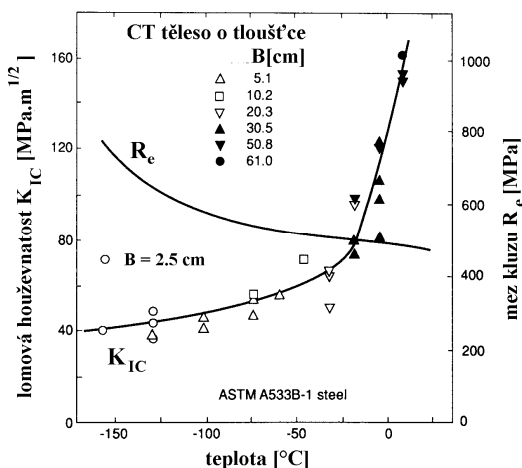
Proč se dělá ta 5% (příp. 4%) sečna?



Pětiprocentní sečna souvisí se smluvní hodnotou přírůstku trhliny. Na základě vztahů uváděných v normě ISO je možné vypočítat vzájemnou souvislost mezi tuhostmi v závislostech síla F – rozevření V i síla F –přemístění síly q a délkou trhliny. Prodlouží-li se trhlina o 2% (CT těleso, $B = 25 \text{ mm}$, $a/W = 0,5$), pak tuhost tělesa poklesne o 0,05 tj. o 5% (pouze v případě ohybového tělesa je tento pokles 0,04)

Epizoda prvního použití parametru LELM

Jedním z prvních materiálů, u kterého se stanovovala velice intenzivně teplotní závislost lomové houževnatosti K_{IC} byla ocel A533B-1, ze které se vyrábí tlakové nádoby amerických jaderných reaktorů. Víme, že s růstem teploty roste odolnost oceli vůči porušení a tedy roste hodnota K_{IC} . Experimentálně zjištěné hodnoty pro tuto ocel jsou ukázány na **obr. 11**. S rostoucí teplotou, podle podmínky $\textcircled{1}$ rostou požadavky na rozměry zkušebních těles a jak je zřejmé z popisu na obr.11, při nejvyšší teplotě – asi $+10^\circ\text{C}$ – muselo mít CT těleso tloušťku 610 mm a tedy $W = 1,22 \text{ metru}$ aby byla splněna podmínka rovinné deformace a tedy podmínka platnosti hodnoty



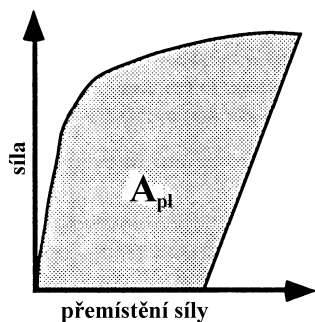
K_{IC} .

Metodika určení J- integrálu – iniciace lomu po větší plastické deformaci

U běžných svařitelných ocelí při použití standardních zkušebních těles tloušťky 25 mm je nutné pro získání platných hodnot K_{IC} snížit teplotu zkoušky na -100 až -160°C . Pro získání teplotní závislosti hodnot lomové houževnatosti při vyšších teplotách se používá metodika určení J -integrálu a tento se pak přepočítává na hodnotu K_{II} ($K_I = \sqrt{J_I E'}$).



Norma ČSN 420347 i návrh ISO rozlišuje, zda se jedná o iniciaci lomu nebo vyjádření R-křivky. V prvním případě opět vystačíme s jedinou hodnotou lomové houževnatosti a odezva tělesa je elasticko-plastická. V druhém případě se jedná o určení R křivky, příp. hodnoty charakterizující iniciaci lomu – počátek R-křivky.



Stručně charakterizujeme způsob hodnocení lomové houževnatosti pomocí jediné hodnoty J . Vztah pro výpočet J -integrálu z naměřených hodnot, podobně jako vztah pro výpočet rozevření δ , je rozdělen na dvě složky – elastickou J_{el} a plastickou J_p . Elastická část se opět určí přepočtem z hodnoty K odpovídající síle v okamžiku lomu. Plastická část se určí výpočtem z plastické práce A_{pl} , která je dána plochou pod křivkou síla (F) – přemístění (q) síly (↪ **obr. 12**) podle vztahu

$$J_p = \frac{A_{pI} X_i \left(\frac{a}{W} \right)}{B(W-a)}, \text{ kde hodnota } X_i \left(\frac{a}{W} \right) = 2 \text{ v případě ohybového tělesa a}$$

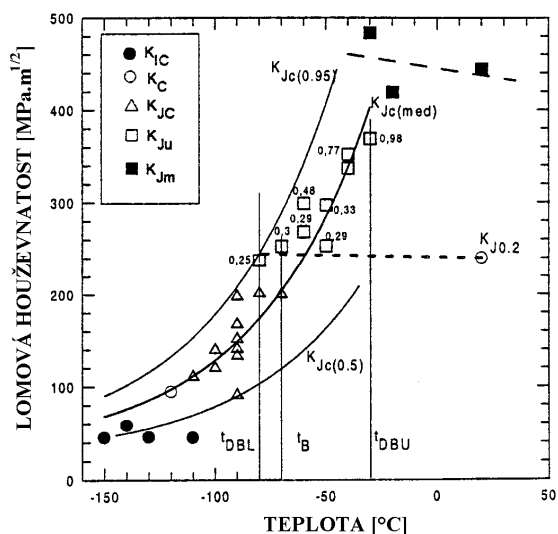
$X_i\left(\frac{a}{X}\right) = 2 + 0,522\left(1 - \frac{a}{W}\right)$ v případě CT tělesa. Výsledná hodnota $J_0 = J_e + J_p$. Pro každé zkušební těleso

(rozměry B,W) stanovíme délku trhliny a , lomovou sílu F a odpovídající plastickou práci A_{pl} . Konkrétní vztah pro výpočet hodnoty J_0 např. pro ohybové těleso podle návrhu ISO je

$$J_0 = \left[\frac{4F}{B\sqrt{W}} g_1 \left(\frac{a}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{(1-\mu^2)}{E} \right] + \frac{2A_{pl}}{B(W-a)}. \quad \text{Eq. (9)}$$

Způsob přiřazení vhodného symbolu naměřené hodnotě J_0 podle tabulky – zda se jedná o $J_{c(B)}$, $J_{u(B)}$, příp. $J_{m(B)}$ – se provádí na základě velikosti subkritického nárůstu trhliny Δa . V případě, že

$$\Delta a < 0,2mm + \left(\frac{J_0}{3,75R_m} \right), \quad \text{rov. (10)}$$



pak naměřená hodnota J_0 je lomová houževnatost $J_{c(B)}$. Index „c“ znamená, že se jedná o hodnotu iniciace nestabilního lomu. Tato veličina po přepočtu na K_{Jc} je v podstatě ekvivalentní hodnotě K_{IC} a např. při studiu teplotní závislosti lomové houževnatosti se tyto hodnoty vynášejí na jednu teplotní závislost (**← Obr. 13** – hodnocení lomové houževnatosti oceli pro výrobu jaderných reaktorů 15Ch2MNF AA – značení oceli ruského původu na reaktory VVR 1000, tloušťka zkušebních těles byla ve všech případech 25 mm). Index B znamená, že hodnota lomové houževnatosti byla určena na tělese o tloušťce B . Např. pro těleso $B = 25$ mm.

Jestliže platí $\Delta a > 0,2mm + \left(\frac{J_0}{3,75R_m}\right)$,

pak hodnota J_0 představuje lomovou houževnatost nestabilního lomu, kterému předcházeli jistý subkritický nárůst trhliny o Δa , pro tento případ se volí označení $J_{u(B)}$, tento symbol by měl být doplněn o velikost Δa v milimetrech. Po přepočtu na hodnotu K jsou tyto hodnoty vyneseny v obr. 13 jako K_{Ju} . V případě, že hodnota J_0 byla určena z hodnoty maximální síly, pak se používá označení $J_{m(B)}$ a po přepočtu K_{Jm} .

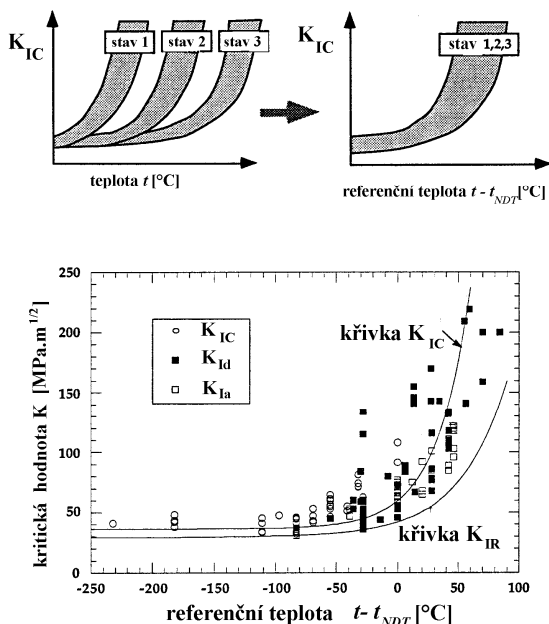
Teplotní závislost lomové houževnatosti je pro konstruktéra významná materiálová charakteristika – např. najíždění atomového, příp. chemického reaktoru nebo parní turbíny po odstávce.

Otázka zvědavého studenta – je skutečně nutné pro popis teplotní závislosti lomové houževnatosti provádět takto složitá a drahá měření, nejde to nějak zjednodušit???

Samozřejmě, že se hledá zjednodušení od samého začátku, kdy byla teplotní závislost lomové houževnatosti poprvé zjištěna. Jednu z prvních metod kombinace tranzitní teploty a lomové houževnatosti je metoda obsažená v návodu amerických inženýrů ASME Code – průvodce pro návrh a provoz jaderných reaktorů. Na základě měření teplotní závislosti lomové houževnatosti (hodnot K_{IC} , dynamické lomové houževnatosti K_{Id} a lomové houževnatosti charakterizující zastavení trhliny K_{Ia}) pro různé tavby reaktorové oceli (v obr. 14 označené jako různé strukturní stavy) bylo ukázáno, že když se teplotní závislosti lomové houževnatosti různých strukturních stavů vztáhnou k tzv. referenční teplotě (referenční teplota = nižší z a) teplota nulové houževnatosti b) teplota, při níž $KV = 68$ J snižena o $33^{\circ}C$), pak zjistíme, že je zde jediná teplotní závislost. Závislost prezentovaná na



obr. 14, vzhledem k počtu dolarů za kterou byla získána, se označuje jako milionová. Teplotní závislost minimálních hodnot lomové houževnatosti (obalová křivka) z této závislosti se označuje jako referenční lomová houževnatost K_{IR} .



← Obr. 14

V současné době se tato filozofie zpracovává následovně. Teplotní závislost lomové houževnatosti v tranzitní oblasti určenou na tělesech tloušťky 25 mm je možné popsat jedinou funkcí, která má tvar

$$K_{Jc}^{střední} = A + B \exp[C(t - t_0)] \quad \text{rov. (11)}$$

kde t_0 teplota, při níž hodnota $K_{Jc} = 100 \text{ MPa.m}^{1/2}$. Konkrétní tvar této křivky, která je v literatuře označována jako „Fracture toughness master curve“ (= základní křivka lomové houževnatosti) je

$$K_{Jc}^{střední} = 30 + 70 \exp[0,019(t - t_0)] \quad \text{rov. (11a)}$$

Protože hodnoty K_{Jc} mají velký rozptyl je v novém standardu ASTM navržena metoda stanovení lomové houževnatosti tak, že při jedné teplotě se provede alespoň šest zkoušek. Z těchto šesti zkoušek se vypočte

$K_{Jc}^{střední}$ pro teplotu zkoušky t a zní pak podle rov. (11a) referenční teplota t_0

$$t_0 = t - \frac{1}{0,019} \ln \left\{ \frac{K_{Jc}^{střední} - 30}{70} \right\} \quad \text{rov. (12)}$$

Jak se určí střední hodnota $K_{Jc}^{střední}$?

Vycházíme z předpokladu, že rozptyl hodnot K_{Jc} je možné popsat tříparametrovým Weibullovým rozdělením.

Kumulativní pravděpodobnost porušení

$$F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{K_{Jc} - 20}{\Theta_k - 20} \right)^4 \right], \quad \text{rov. (13)}$$

Kde 4 je Weibullův modul (exponent) – je mírou rozptylu; Θ_k je hodnota K_{Jc} odpovídající pravděpodobnosti porušení 63% a 20 je prahová hodnota lomové houževnatosti.

Příklad výpočtu si ukážeme na výsledcích uvedených v následující tabulce

i	K_{Jc}	F	Θ_k
1	93	0,109	145
2	135	0,266	175
3	143	0,422	163
4	154	0,578	159
5	170	0,734	159
6	200	0,891	167

$$\Theta_k^{střední} = 161$$

$$K_{Jc}^{střední} = 149$$

$$t_0 = -7,9^\circ\text{C}$$

Kumulativní pravděpodobnost se určuje tak, že naměřené hodnoty seřadíme podle velikosti od nejmenší hodnoty po největší (druhý sloupec),

k těmto hodnotám přiřadíme $F = \frac{i - 0,3}{N + 0,4}$, kde N je

celkový počet měření. V posledním sloupci je hodnota Θ_k vypočtená pro každé měření z rov. (13). Určíme střední hodnotu $\Theta_k^{střední}$ a dosadíme ji do rov. (13) současně s hodnotou $F = 0,5$ a vypočteme $K_{Jc}^{střední}$; dosazením do rov. (12) vypočteme t_0

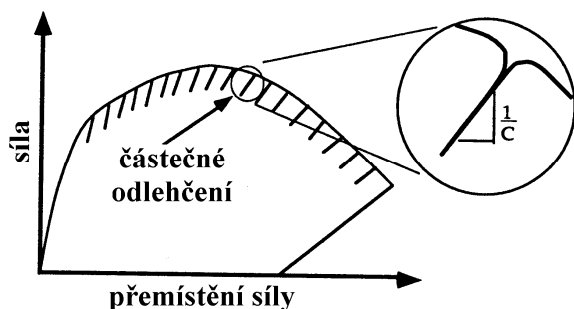
Uvedený přístup je možné použít pouze pro popis tranzitní oblasti lomového chování ocelí. Příklad je na obrázku 13, je zde vynesena „master“ křivka K_{Jc}^{med} a dále hodnoty K_{Jc} odpovídající pravděpodobnosti porušení 5% a 95%. Hodnota lomové houževnatosti daná „master“ křivkou roste s rostoucí teplotou bez omezení. Odhad horní prahové hodnoty – hodnoty, kdy dojde k iniciaci tvárného lomu např. $K_{J0,2}$ jak je uvedeno na obr.13 – se provádí na základě měření J-R křivky.

Konstrukce J-R křivky příp. $J_{0,2BL}$

V případě, že během zkoušky dochází k iniciaci a růstu tvárné trhliny (stabilnímu růstu trhliny), pak je cílem zkoušky získat závislost veličiny J na přírůstcích trhliny Δa , tedy průběh J-R křivky. Podle způsobu, jakým se určují hodnoty Δa , hovoříme o metodě několika těles a o metodě jednoho tělesa:



- a) **metoda několika těles** – pro zkoušku se připraví nejméně šest stejně velkých zkušebních těles s přibližně stejně velkými únavovými trhlinami. Prvé zkušební těleso se doporučuje zatížit až do maximální síly a odlehčit. Po odlehčení je nutné těleso dolomit a stanovit počáteční délku trhliny a_0 a velikost Δa . Po



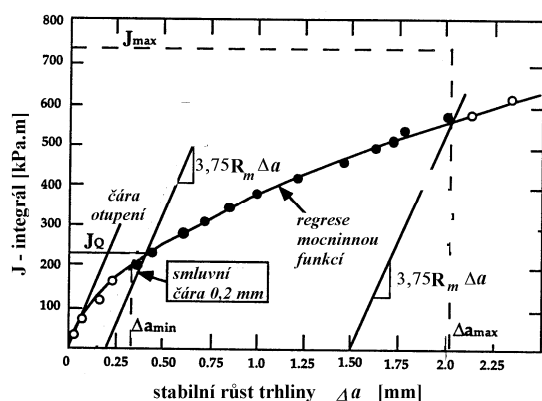
odečtení odpovídající hodnoty síly, plastické práce a odměření rozměrů zkušebního tělesa se počítá hodnota J integrálu, pro ohybové platí

$$J = \left(\frac{K^2}{E'} + \frac{X_i A_p}{B(W - a_0)} \right) \left(1 - \frac{\Delta a}{2(W - a_0)} \right). \quad \text{Takto}$$

získáme krajní bod měřené R-křivky. Zatěžování dalších těles se provede tak, aby velikosti tvárného natržení byly rovnoměrně rozloženy mezi nulovou hodnotou a hodnotou Δa odpovídající síle F_m .

- b) **metoda jednoho tělesa** – je založena na vztahu poddajnosti tělesa a délky trhliny, jak je schematicky ukázáno na obr. 15. Zatěžování tělesa je během zkoušky několikrát přerušeno a provedeno částečné odlehčení (ne větší než 10% maximální síly) a pokračuje se v zatěžování. Při odlehčení se vyhodnocuje poddajnost $1/C$ tělesa. V případě, že dochází k růstu trhliny, roste poddajnost tělesa (tuhost klesá). V návrhu normy ISO jsou uvedeny polynomické vztahy pro oba typy těles, které dávají do relace (a_0/W) a poddajnost. Tato metoda určení J - R křivky je označována jako metoda přímá. Dále existují tzv. nepřímé metody jednoho vzorku, které k monitorování růstu trhliny využívají např. změnu elektrického odporu zkušebního tělesa způsobenou zmenšováním jeho průřezu v místě trhliny. Metody jednoho vzorku jsou technicky velmi náročné. Jejich praktické použití je

možné pouze v laboratořích vybavených zkušebním strojem řízeným počítačem a příslušným programovým vybavením.



Zjištěná závislost $J \approx \Delta a$ se zpracovává do J - R křivky, jak je ukázáno na obr. 16.

Dynamická lomová houževnatost

Vliv rychlosti zatěžování se zpravidla vyjadřuje nárůstem součinitele intenzity napětí $\dot{K}_I [MPa.m^{1/2}s^{-1}]$. Časový

nárůst součinitele intenzity napětí pro vybrané typy konstrukcí je uveden v následující tabulce.

Typ konstrukce	$\dot{K}_I [MPa.m^{1/2}s^{-1}]$
Tlakové nádoby	1 až 10
Mosty, jeřáby	10^4
Letecké podvozky	10^5
Rám lokomotivy	10^7
Náraz projektilu	10^{10}

Pojmy - dynamická lomová houževnatost, instrumentované rázové kladivo; vliv rychlosti zatěžování na lomovou houževnatost závisí na typu porušování – štěpné*houževnatost klesá – tvárné*houževnatost roste

Lomová houževnatost plastů (ČSN 64 0623, ISO DIS 13 586)

Norma je podobná jako pro kovy s tím rozdílem, že se jinak připravuje ostrá trhlina.

Lomová houževnatost konstrukční keramiky a kompozitů.

Šípové vruby, ostrá trhlina a indentační metody.