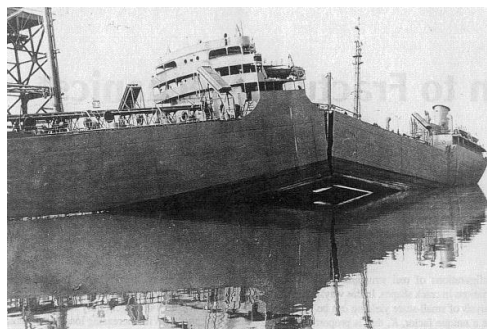




V předchozích přednáškách jsme hovořili o plastické deformaci kovových materiálů. V očích konstruktéra jistě plastická deformace „kazí“ pevnost kovových materiálů. Dnes budeme mluvit o lomovém chování materiálů a ukážeme si, že plastická deformace má vliv na jinou, pro konstruktéra velice důležitou vlastnost, kterou je houževnatost materiálu.

Z inženýrského hlediska je houževnatost významnou vlastností konstrukčních materiálů, kterou lze obecně definovat jako schopnost materiálu absorbovat energii před porušením. Proto lomy podle **energetické** náročnosti dělíme na lomy **houževnaté** a **křehké**.

Konstrukční výpočet založený na srovnání působícího provozního napětí s mezí kluzu příp. s mezí pevnosti, který se používá u houževnatých materiálů není možné použít u materiálů křehkých. Laická představa křehkého

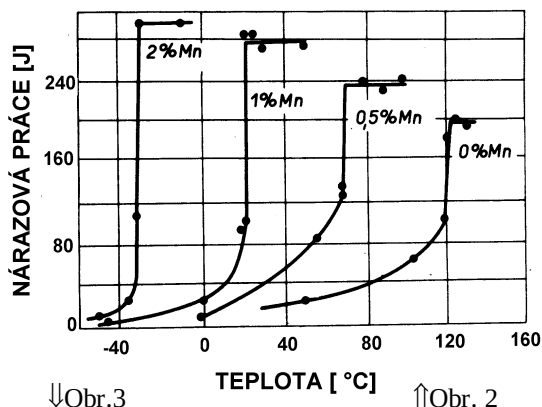


lomu – křehký lom tělesa vznikne dříve, než může nastat plastická deformace materiálu – říká, že lomové napětí je nižší než mez kluzu.

Nejpoužívanějším konstrukčním materiálem je ocel. Zkušenost ukázala, že lodě, mosty, nádrže, tlaková potrubí, plynojemy, nosná ramena rypadel, disky turbin jsou ocelové konstrukce u kterých se během provozu může vyskytnout křehký lom. Na rozdíl od křehkých materiálů jako je sklo, porcelán, keramika, zvonovina, které jsou křehké prakticky za všech okolností, v případě ocelí tomu tak není. Za určitých podmínek namáhání se ocelová součást poruší lomem houževnatým a za jiných podmínek namáhání se součást ze stejné oceli poruší křehkým

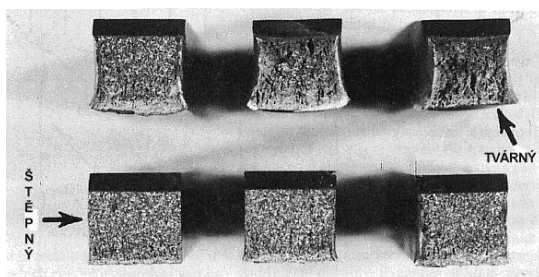
lomem. Zpravidla stačí, aby se snížila provozní teplota, vzrostla rychlost zatěžování případně, místo hladkého tělesa bylo zatěžováno těleso s vrubem nebo s trhlinou a dojde ke změně lomového chování místo houževnatého

lomu se objeví lom křehký. Změně, nebo také přechodu v lomovém chování ocelí říkáme **tranzitní lomové chování**.



↓Obr. 3

↑Obr. 2



teplotě nezávisí. V bezprostředním okolí lomové plochy zkušební vzorku je výrazná deformace – z hlediska vzhledu resp. mechanismu lomu hovoříme o tvárném porušení. V závislosti na poklesu teploty od jisté teploty hodnota nárazové práce klesá a mění se jak rozsah plastické deformace v okolí lomové plochy, tak i její vzhled. Na lomové ploše se objevují malé lesklé plošky, dochází ke štěpení krystalové mřížky feritických zrn. Tento lom označujeme jako štěpný transkrystalický lom (obr. 3). Jak vidíme na obr. 2 jsou jak tvar, tak i poloha tranzitní křivky na ose teplot výrazně závislé na chemickém složení a tedy i na struktuře oceli. V následujícím výkladu se zaměříme na následující problémy:

a) podstata vzniku křehkého lomu ocelí, jak závisí tranzitní lomové chování na struktuře oceli

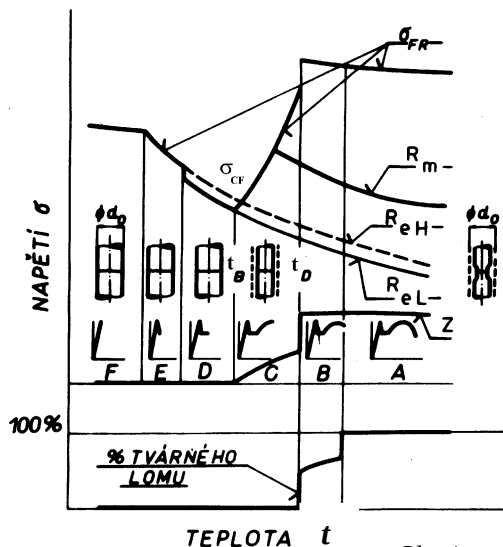
b) metody zkoušení odolnosti materiálu vůči křehkému porušení

* teplotně tranzitní přístup vhodný prakticky jen pro svařitelné oceli



** přístup založený na hodnocení houževnatosti materiálu (lomově mechanistický přístup), který je vhodný prakticky pro jakýkoliv materiál.

Ad a) Zjištění tranzitní křivky při zkoušce tahem se podařilo až v 60-tých letech, kdy došlo k rozvoji kryogenní techniky a bylo možné provést tahové zkoušky až do teplot kapalného helia -269°C (4K). Na obr. 4 jsou



lomového napětí $\sigma_{FR} = \frac{F_{FR}}{S_{FR}}$, zúžení Z a % tvárného

lomu na lomové ploše. Podle charakteru porušení a podle poměru σ_{FR} k mezi kluzu lze stanovit šest oblastí porušení.

OBLAST A – tvárný lom po velké plastické deformaci, zúžení Z dosahuje vysokých hodnot, mez kluzu i mez pevnosti s klesající teplotou rostou, skutečné lomové napětí se s teplotou příliš nemění

OBLAST B – smíšené porušení, uprostřed lomové plochy je lom tvárný a na okrajích štěpný, k lomu dochází po vzniku krčku; i v této oblasti v závislosti na poklesu teploty jak mez kluzu tak i pevnost rostou

OBLAST C – velikost deformace do porušení v závislosti na poklesu teploty klesá, lom je štěpný (0% tvárného lomu), k lomu dochází dříve než se vytvoří krček, skutečné lomové napětí s klesající teplotou prudce

klesá; na konci oblasti C je lomové napětí rovno mezi kluzu, mez kluzu s klesající teplotou roste

OBLAST D – k lomu dochází při napětí $\sigma_{FR}=R_{eL}$ v celé oblasti, Z je nulové; z makroskopického hlediska bylo v této oblasti dosaženo křehkého lomu

OBLAST E – štěpný lom při napětí $\sigma_{FR}=R_{eH}$ v celé oblasti

OBLAST F – až do této oblasti mez kluzu monotónně rostla při poklesu teploty a k lomu nikdy nedošlo při napětí menším, než je mez kluzu; v této oblasti je lomové napětí menší než mez kluzu a s klesající teplotou se lomové napětí prakticky nemění (metalograficky bylo ukázáno, že lomové napětí kopíruje napětí počátku plastické deformace a v této oblasti je kluzová deformace nahrazena deformací dvojčatovou).

Shrnutí popisu obr. 4: mezi křehkým a houževnatým lome existuje přechodová oblast (oblast C); to znamená, že i u hladkých zkušebních těles při zkoušce tahem existuje tranzitní lomové chování, oblast C se někdy označuje jako oblast semikřehkých lomů. Pro vyjádření tranzitního chování ocelí se zpravidla určují tranzitní teploty $teplota\ t_D \equiv$ tranzitní teplota houževnatosti, $teplota\ t_B \equiv$ tranzitní teplota křehkosti. Tyto teploty vymezují tranzitní oblast C. Vedle těchto teplot je v závislosti na obr. 4 zajímavá hodnota lomového napětí při teplotě t_B . Toto napětí označujeme jako „kritické lomové napětí“ nebo někdy také jako „lomové napětí štěpného lomu“ a používáme pro něj symbol σ_{CF} – hodnota tohoto napětí je nejnižší ze všech hodnot lomového napětí. Všimněme si, že při tomto napětí dochází ke vzniku štěpného lomu v okamžiku vzniku plastické deformace.

Tab.1

Ocel	R_e [MPa]	R_m [MPa]	$\varnothing d$ [mm]	σ_{CF} [MPa]
11 368	248	377	0,024	880
11 523	335	531	0,019	915
13 030	317	482	0,015	1030
15 123	350	503	0,030	920

Závěr:

Pověra o tom, že křehký lom u ocelí vzniká při napětí menším než mez kluzu, byla vyvrácena právě těmito pokusy. Tedy si zapamatujeme:

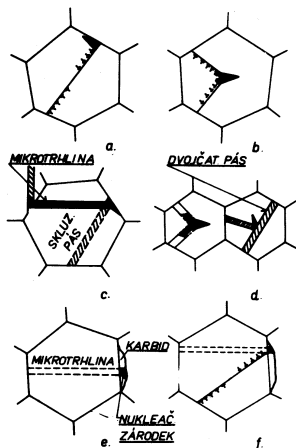
☺ Křehký lom hladkých těles nevznikl nikdy v oblasti elastických napětí. Lomu vždy předchází, byť malá, plastická deformace. I v oblasti F vznikla nejdříve plastická deformace dvojčatěním a potom křehký lom.

☺ Kritické lomové napětí σ_{CF} je mnohem menší než teoretická pevnost daná spontánním porušením vazeb mezi atomy $\sigma_{teorie} \div E/15$.



Tyto dvě skutečnosti vedly k názoru, že mechanismus vzniku štěpného lomu se skládá ze tří na sebe navazujících stádií:

- Nukleace štěpné submikrotrhliny plastickou deformací - účinek smykového napětí.
- Růst mikrotrhliny podél štěpné roviny uvnitř feritického zrna – účinek tahového napětí.
- Růst štěpné mikrotrhliny přes první silnou bariéru – hranice hostitelského zrna, hranice paketu a pod. – účinek tahového napětí



Ad i. V literatuře existuje řada představ jak vznikne zárodek štěpné mikrotrhliny

⇐ Obr.5

(Zener 5a)– nakupení dislokací na hranici zrna, Cottrell 5b)– interakcí dislokací ze dvou kluzových rovin, které se protínají, vzniká malá trhlinka, Averbach 5c)– interakce kluzových pásů, Hull 5d)– interakcí dvojčat, 5e) nukleační zárodek vzniká prasknutím karbidické částice, Smith a Almond 5f) – interakce kluzový pás a karbid na hranici zrna).

Ve všech případech platí, že k nukleaci submikrotrhliny stačí pouze smykové napětí. Protože víceosá napjatost (přítomnost vrubů) má vliv na zkřehnutí, nemůže být nukleace mikrotrhliny určujícím stadiem štěpného lomu.

Ad ii. Růst trhliny uvnitř zrna – zárodek trhliny může zvolna růst pod účinkem pole napětí jež způsobilo jeho vznik. V určitém okamžiku může velikost trhlinky dosáhnout kritické délky a_{krit} , pak dojde k jejímu nestabilnímu šíření. Podmínky pro okamžik nestabilního růstu se odvozují na základě termodynamické úvahy (nestabilní růst trhliny $\Rightarrow$ pokles energie soustavy;

Griffithova teorie bude rozebírána v základech lomové mechaniky). Této metody použil Cottrell pro odvození

hodnoty napětí pro nestabilní růst štěpné mikrotrhliny v rámci jednoho zrna $\sigma_{CF}(g) = \frac{G \cdot \gamma_m}{k_y} d^{-1/2}$,

kde γ_m - povrchová energie spojená se šířením štěpné mikrotrhliny, k_y - parametr z HP rovnice, G modul pružnosti ve smyku a d střední průměr feritického zrna.

Štěpná pevnost feritického zrna je dána veličinami, které na podmínkách zatěžování nezávisí. Vznik štěpného lomu nastane, jestliže hodnota dolní meze kluzu dosáhne štěpné pevnosti hranice zrna $R_{eL} = \sigma_{CF}(g)$ tato rovnice určuje teplotu t_B . Splnění této rovnice lze docílit

☺ poklesem teploty

☺ zvyšováním rychlosti zatěžování

☺ trojosou napjatostí (někdy bývá v Cottrellově rovnici zahrnut parametr napjatosti $v = \frac{2\tau_{max}}{\sigma_1}$)

a kombinací těchto vlivů. Z hlediska struktury Cottrellova rovnice říká jestliže $d \downarrow$, pak $t_B \downarrow$. Podrobnějším výzkumem se zjistilo, že na iniciaci štěpného lomu má podstatný vliv i přítomnost a zvláště tloušťka t_{cem} terciálního cementitu na hranicích zrn. V literatuře je řada dalších rovnic, které vedle vlivu velikosti zrna

zahrnují i vliv křehkých částic ve struktuře. Např. $R_{eL} = \sigma_{CF}(g) = \frac{2G \cdot \gamma_m}{[\alpha^2 k_y^2 d + 16G \cdot \gamma_m \cdot t_{cem}]^{1/2}}$

Ad. iii) Může se stát, že nestabilně se šířící trhlinka dospěje na hranici zrna, příp. hranici paketu, kde se zastaví. Přechod této bariéry se opět počítá z energetické Griffithovy úvahy a vede na tvar

$$\sigma_{CF}(b) = \left(\frac{4 \cdot E \cdot \gamma_b}{\pi \cdot d \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{0.5}$$

Závěr: Hodnota *kritického lomového napětí* – tj. lomového napětí při teplotě t_B - je rovna větší hodnotě z napětí $\sigma_{CF} = \max \langle \sigma_{CF}(g), \sigma_{CF}(b) \rangle$

V praxi se setkáváme s tím, že ke štěpnému porušení a tedy ke křehkým lomům ocelí dochází za provozních teplot. Jak bylo řečeno výše jde o pokles teploty, růst rychlosti zatěžování a vliv napjatosti - tyto tři faktory se zpravidla označují jako faktory vnější (externí).

Vliv externích faktorů na vznik štěpného lomu

Teplota a rychlost zatěžování

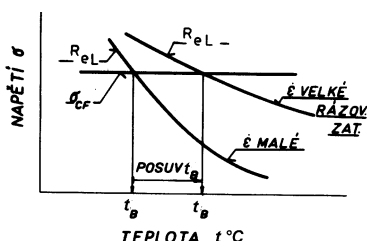
Mez kluzu kovů s bcc strukturou a tedy i feritu výrazně závisí na teplotě a rychlosti zatěžování. Příčinou je skutečnost, že šroubové dislokace v bcc struktuře jsou v klidovém stavu rozštěpené (neúplné dislokace propojené vrstevnou chybou). Plastická deformace a tedy pohyb dislokací vyžaduje stažení tohoto rozštěpení. Pokud je teplota dostatečně vysoká, tak se toto stažení děje v rámci tepelných kmitů mřížky. V závislosti na poklesu teploty klesají tepelné fluktuace a ke stažení je třeba stále vyšší napětí. Tato teorie se označuje jako



teorie tepelně aktivovaných dějů při plastické deformaci. K popisu vlivu teploty a rychlosti zatěžování se používá pro vyjádření deformačního napětí příp. pro vyjádření mez kluzu rovnice

$R_e = \sigma_i(t; \dot{\epsilon}) + \sigma_\mu(d, \epsilon)$, kde prvá část pravé strany je teplotně závislá část meze kluzu – opět je zde uvažována ekvivalence teploty a času a druhá část je teplotně a rychlostně nezávislá.

Nejčastěji se v literatuře používá pro popis vlivu teploty a rychlosti zatěžování na mez kluzu nízkouhlíkových ocelí do pevnosti 600 MPa rovnice navržená Benetem a Sinclairiem



$$R_e(t, \tau) = R_e(20^\circ\text{C}, 50\text{s}) - 189,7 + \frac{6,67 \cdot 10^5}{(t + 273) \cdot \log(2 \cdot 10^{10} \cdot \tau)}$$

kde $R_e(20^\circ\text{C}, 50\text{s})$ je hodnota meze kluzu zjištěná při teplotě 20°C a rychlosti zatěžování volené tak, aby bylo dosaženo meze kluzu po čase 50 sec. Tato podmínka odpovídá rychlosti deformace $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3} \text{s}^{-1}$; τ je čas dosažení meze kluzu v sekundách, t je teplota ve $^\circ\text{C}$.

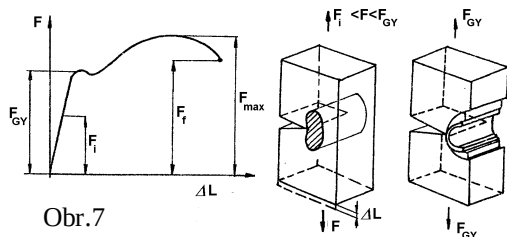
Vliv rychlosti zatěžování na posuv teploty t_B je schematicky znázorněn na obr. 6.

Vliv napjatosti - konstrukční vruby

Z nauky i jiných předmětů víme, že tranzitní chování a tedy sklon ocelí ke vzniku štěpného lomu se zkoumá (hodnotí) na základě zkoušky rázem v ohybu – tedy při zatěžování vysokou rychlostí a na tělesech opatřených vruby.

Vzpomínáme, co jsme si povídali během studia o ostrých vrubech?

Pověděli jsme si, že ke vzniku štěpného lomu dochází až po vzniku plastické deformace. Proto jak je to s plastickou deformací součásti v okolí vrubů?



Obr.7

Podobně jako při zatěžování hladkých zkušebních tyčí i v případě zkušebních tyčí s vrubem získáme závislost síla F – prodloužení ΔL (obr. 7). V tomto diagramu jsou vyznačena typická zatížení:

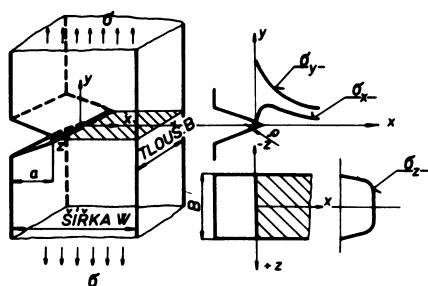
- při síle F_i nastává první lokální plastická deformace u kořene vrubu; zjištění síly F_i je experimentálně velice obtížné.

- síla F_{GY} je síla, při níž se plastická deformace rozšíří přes celý nosný průřez pod vrubem. Zde začíná oblast makroplastických deformací (termín mez makroplastických deformací) Tato síla je již poměrně snadno experimentálně měřitelná.

- síla F_{max} je maximální síla dosažená při zkoušce; zde již zpravidla proběhla iniciace tvárné trhliny v kořeni vrubu.

- síla F_f je síla při níž dojde k lomu

Z hlediska rozvoje deformace existují zde tři oblasti, nás zajímají první dvě.



Obr.8

➤ Zátěžná síla $F < F_i$ - **oblast pružných deformací** (obr.8); obecně u kořene vrubu uvnitř tělesa existuje trojosá napjatost - σ_x, σ_y a σ_z . Jestliže je tloušťka desky B malá, potom $\sigma_z \approx 0$ a mluvíme o rovinné napjatosti. V případě, že B je velké, potom $\epsilon_z = 0$ a mluvíme o rovinné deformaci. Rozdělení napětí v okolí vrubů při pružném zatížení se určuje zpravidla buď použitím matematické teorie pružnosti, nebo použitím různých měřících technik (např. fotoelasticimetrie). Pro vyjádření lokalizace napětí v blízkosti vrubu se používá tzv. teoretický

součinitel koncentrace napětí, definovaný jako $k_t = (\alpha) = \frac{(\sigma_y)_{max}}{\sigma_n}$, kde $(\sigma_y)_{max}$ je největší tahové napětí pod

vrubem a σ_n napětí nominální. Hodnota k_t je funkcí hloubky vrubu a a rádiu ρ v kořeni vrubu; pro různé typy vzorků a způsoby namáhání (ohyb, krut) se udává hodnota k_t v tabulkách. Hodnota k_t je stejná za podmínek rovinné napjatosti i rovinné deformace – nezávisí na tloušťce B (k problematice k_t se vrátíme v souvislosti s únavovými procesy).

➤ Zátěžná síla leží v intervalu $F_i < F < F_{GY}$ - oblast lokální plastické deformace. Na rozdíl od oblasti pružných deformací, v této oblasti již může vzniknout štěpný lom, protože je zde plastická deformace. Další veličinou, která nás zajímá, je hodnota tahového napětí. Podobně jako v pružné oblasti i zde se zavádí tzv. plastický



součinitel koncentrace napětí $k_{\sigma_{pl}} = \frac{\sigma_y}{R_e}$, který vyjadřuje největší napětí pod vrubem v plastické zóně (místě, kde je lokalizovaná plastická deformace) vztažené k hodnotě meze kluzu. Tento součinitel dosahuje nejvyšší hodnoty při síle jež odpovídá mezi makroplastických deformací $k_{\sigma_{pl}}^{\max} = \frac{(\sigma_y)^{\max}}{R_e} = 1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\omega}{2}$, kde ω je úhel rozevření vrubu (v případě V-vrubu používaného pro zkoušku rázem v ohybu podle Charpyho $\omega = 45^\circ = \pi/4$ $3,14/4 = 0,78$ a tedy $\left[k_{\sigma_{pl}}^{\max} \right]_{<45^\circ} = 2,17$) Toto převýšení je důsledek existence složky napětí

$$\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y)$$

ve směru tloušťky. Největší hodnota $k_{\sigma_{pl}}$ bude pro $\omega = 0$, tj. pro trhliny.

Podobně jako u hladkých vzorků nastává i u vrubovaných vzorků se snižováním teploty změna houževnatého lomu na lom křehký. Závislost chování, tj. nastává přechod od houževnatého lomu nominálních napětí na teplotě (vypočtených ze sil F_i až F_f)

$$(\sigma_I)_n = \frac{F_i}{S_0}; (\sigma_{GY})_n = \frac{F_{GY}}{S_0}; (\sigma_f)_n = \frac{F_f}{S}, \text{ kde } S_0$$

je plocha příčného řezu tyče pod vrubem a S tatáž plocha po lomu tyče,

je uvedena schematicky na obr.9. Při různých teplotách dostáváme průběhy analogické obr. 4, ale posunuté k vyšším teplotám. V obr.9 index v u tranzitních teplot se vztahuje na zkušební tělesa s vrubem.

O velikosti posuvu tranzitní teploty křehkosti t_B vlivem vrubu si můžeme udělat

představu na základě následující úvahy. Je-li kritické lomové napětí σ_{CF} materiálová charakteristika, potom při tranzitní teplotě křehkosti t_{BV} musí být splněna podmínka $\sigma_y^{\max} = \sigma_{CF}$. Maximální napětí v plastické zóně je vyšší než mez kluzu R_{eL} vlivem plastické koncentrace napětí $k_{\sigma_{pl}}^{\max}$. To tedy znamená, že při teplotě t_{BV} platí, že

$$(\sigma_{GY})_n = \frac{\sigma_{CF}}{k_{\sigma_{pl}}^{\max}}. \text{ Z obr. 9 je vidět zásadní rozdíl v lomovém chování hladkých a vrubovaných tyčí v oblasti teplot}$$

pod teplotou t_B resp. t_{BV} . U hladkých zkušebních tyčí je při teplotě křehkosti t_B dosaženo minimální hodnoty lomového napětí σ_{CF} . V případě vrubovaných zkušebních tyčí v oblasti teplot $t < t_{BV}$ lomová síla a klesající teplotou stále klesá. K iniciaci lomu dochází v plastické zóně pod vrubem kde působí tahové napětí jež opět převyšuje hodnotu meze kluzu. Jak jsme si pověděli dříve, plastický součinitel koncentrace napětí $k_{\sigma_{pl}}$ závisí na tvaru vrubu a nejvyšší hodnotu má v případě trhliny. Výpočty únosnosti součásti s vrubem případně s trhlinou pomocí plastického součinitele koncentrace napětí je velice obtížné a nepraktické. Situaci komplikuje vliv rychlosti zatěžování i vliv tloušťky stěny konstrukce. Pro výpočty konstrukce, která pracuje při teplotách pod t_{BV} a lze předpokládat výskyt defektů v materiálu, se používá veličin zavedených lomovou mechanikou.

Příklad

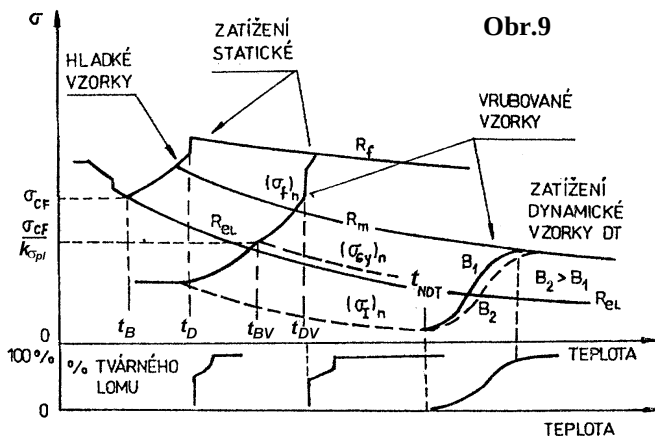
Pro ocel 11 368 vypočítejte tranzitní teplotu křehkosti t_B při tahové zkoušce hladkého zkušební tělesa a tranzitní teploty křehkosti vrubovaných těles (úhel vrubu 45°) při zatěžování na univerzálním zkušebním stroji t_{BV} a při zatěžování na Charpyho rázovém kladivu t_{BV}^{dyn} .

Řešení

Teplotu t_B získáme z podmínky $R_e = \sigma_{CF} = 880 \text{ MPa}$ (viz. tab. 1). Pro výpočet teplotní závislosti meze kluzu použijeme vztah, ve kterém pro pomalé (statické) zatěžování dosadíme za čas $\tau = 50 \text{ sec}$.

$$R_e(t, \tau) = R_e(20^\circ\text{C}, 50\text{s}) - 189,7 + \frac{6,67 \cdot 10^5}{(t + 273) \cdot \log(2 \cdot 10^{10} \cdot \tau)},$$

$$t_B + 273 = \frac{6,67 \cdot 10^5}{(880 - 248 + 189,7) \cdot \log(2 \cdot 10^{10} \cdot 50)} = \frac{6,67 \cdot 10^5}{821,12} = 67,6\text{K} (-205^\circ\text{C})$$





Nejprve vypočteme plastický součinitel koncentrace napětí

$$k_{\sigma_{pl}}^{max} = 1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\omega}{2} = 1 + \frac{3,14}{2} - \frac{3,14}{8} = 1 + 1,57 - 0,392 = 2,177$$

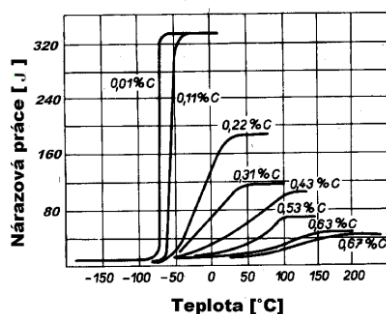
$$t_{BV} + 273 = \frac{6,67 \cdot 10^5}{\left(\frac{880}{2,177} - 248 + 189,7 \right) \cdot 12} = 160,7K = -112,37^\circ C$$

Víme, že rychlost zatěžování při zkoušce na univerzálním zkušebním stroji je $\approx 1\text{mm}$ za minutu, což je $0,016\text{mm.s}^{-1}$. V případě Charpyho kladiva je dopadová rychlost kyvadla 5 m.s^{-1} . To znamená, že doba τ je v tomto případě $5 \cdot 10^3 / 0,016$ krát kratší $3,1 \cdot 10^5$

$$t_{BV}^{dyn} + 273 = \frac{6,67 \cdot 10^5}{\left(\frac{880}{2,177} - 248 + 189,7 \right) \cdot \log(2 \cdot 10^{10} \cdot \frac{50}{3,1 \cdot 10^5})} = 296K = 23^\circ C$$

Vliv interních faktorů (struktury) na křehký lom nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí.

Jak bylo řečeno v předchozím odstavci na hodnotu kritického lomového napětí má vliv velikost zrna (může to být i velikost paketu např. u ocelí nízkolegovaných se strukturou popuštěného bainitu – tlakové nádoby 15 313), velikost a rozdělení karbidických částic, povrchová energie γ . Přestože v následujícím odstavci hovoříme o vlivu chemického složení na štěpný lom v podstatě se jedná o pochopení jak jednotlivé prvky, výrobní a technologické operace ovlivňují zrna, karbidy a povrchovou energii. Hodnocení vlivu interních faktorů na křehkolomové chování ocelí se zpravidla používá nárazová práce měřená zkouškou rázem v ohybu na rázovém kladivu.



Vliv chemického složení

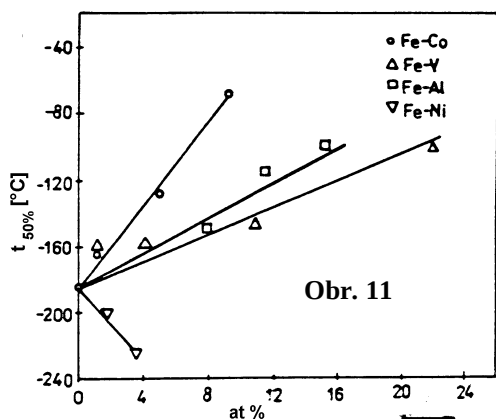
⇐ Obr. 10 vliv obsahu uhlíku na tranzitní chování

Vliv základní přísady oceli – uhlíku – je dán především jeho působením na strukturu oceli (podíl perlitu, případně typ martenzitu, bainitu). Oceli s feriticko – perlitickou strukturou představují základní typ ocelí o $R_m < 900\text{ MPa}$. Typ struktury je především dán obsahem uhlíku (určuje podíl perlitu) a jeho vliv na KV normalizačně žíhané oceli je na obr. 10.

Druhou legurou, kterou obsahují běžné svařitelné oceli, je Mn. Na obr. 2 je uveden vliv přísady Mn na změnu tranzitního chování měkké oceli (0,05% C). Vidíme, že s rostoucím obsahem Mn nastává výrazný posuv tranzitní křivky k nižším teplotám. Snížení náchylnosti ke vzniku křehkého lomu růstem obsahu Mn je způsobeno v podstatě dvěma faktory:

- růst obsahu Mn zjemňuje zrna,
- s růstem obsahu Mn se mění složení karbidů a hlavně jejich tvar – z lamel se stávají globule.

Dá se tedy říci, že Mn ovlivňuje nikoliv energii spojenou se štěpením feritu, ale ovlivňuje strukturní parametry jako je velikost zrna a tvar karbidů. Proto o vlivu Mn z hlediska křehkolomového chování je nutné hovořit ve vztahu ke struktuře feriticko-perlitické. U ocelí se strukturou popuštěného martenzitu příp. bainitu může být vliv Mn opačný.

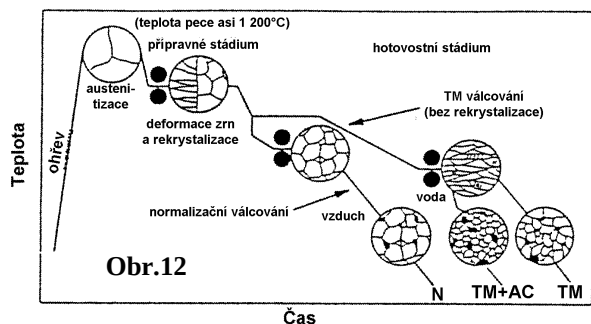


Obr. 11

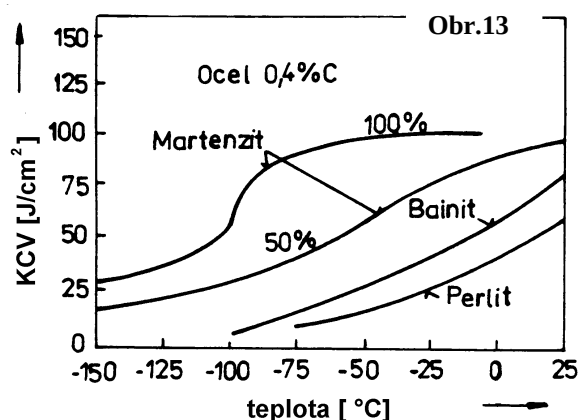
Většina svařitelných jemnozrnných ocelí je ukladněna hliníkem a proto i přísada hliníku ve vhodném množství snižuje náchylnost ocelí ke křehkému lomu. Oceli ukladněné hliníkem tvoří základ tzv. mikrolegovaných ocelí. I v případě hliníku je zde vliv na strukturu a tedy vliv nepřímý. Přímý vliv legujících prvků na křehkolomové chování ocelí dokumentuje závislost na obr. 11. Na tomto obrázku je vynesena tranzitní teplota $t_{50\%}$ (viz. příští přednáška – teplota určená na základě zkoušky rázem v ohybu a to ze vzhledu lomové plochy – lomová plocha obsahuje 50% tvárného lomu) v závislosti na at. % různých legujících prvků. Ukázalo se, že pouze jediný prvek a tím je Ni zvyšuje odolnost kovové matrice vůči štěpnému porušení a má tedy „přímý“ vliv na zvýšení odolnosti oceli vůči křehkému lomu. (Žádný jiný prvek neumí tímto způsobem zvýšit odolnost oceli vůči KL). Obecně Ni v malých



množstvích (do 0,5 %) snižuje mírně tranzitní teplotu normalizačně žíhaných ocelí. S rostoucím obsahem Ni se tranzitní oblast postupně posouvá k nižším teplotám. Při obsahu Ni kolem 9% se již tranzitní oblast nevyskytuje až do teploty kapalného dusíku (-196°C).



Protože oceli se používají pro výrobu velkých svařovaných konstrukcí hledají se vhodné výrobní podmínky těchto materiálů, které zajistí jemnozrnnost ocelí a tedy vysokou odolnost vůči křehkému lomu. Na obr. 12 jsou schematicky ukázány podmínky termomechanického zpracování, které zajišťuje jemnozrnnost konstrukčních ocelí nové generace. (Viz oceli s mezí kluzu 460 MPa podle ČSN EN 10113, ČSN EN 10137).



Dále jsou pro dosažení vyšší pevnosti v praxi používané oceli po tepelném zpracování. Např. oceli na tlakové nádoby, rotory turbin a pod. Výchozí strukturou vysocepevných ocelí je martenzit dále upravovaný popouštěním. Výsledkem procesu tepelného zpracování v reálných podmínkách (velká tloušťka výrobku) je přítomnost dalších rozpadových struktur, např. bainit příp. perlit. V této souvislosti je vhodné ukázat vliv prokalení oceli, který je dokumentován na obr.13 (vliv výchozí struktury na vrubovou houževnatost po popuštění na stejnou hodnotu R_m). Výchozí martenzitická struktura dává po popuštění lepší houževnatost než např. struktura bainitická popuštěná na stejnou pevnost. Obecně lze odolnost

proti křehkému porušení u ocelí zvýšit těmito úpravami:

- zjemněním struktury (např. aplikací TMZ, které zmenšuje velikost paketů martenzitu);
- vytvářením strukturních bariér proti šíření štěpné trhliny (otupení trhliny plastickou deformací, fázovou transformací);
- zvýšením jemnosti a homogenity primárních struktur oceli, zvýšením čistoty oceli.

Závěrem si uvedme přehled ocelí, které jsou vhodné pro práci za snížených teplot

- mikrolegované nízkouhlíkové oceli je možné použít do teplot -60°C za předpokladu jemného zrna a vysoké čistoty (11 503)
- nízkolegované oceli určené k zušlechtnění mají pracovní teploty -50°C až -150°C a jsou to např. oceli 13 221, 16 222, 16 370 (Tyto oceli mají přísady 1,5%Ni, 0,15%Cr, 0,1%Mo)
- vysokolegované oceli použitelné jako kryogenní materiály od -150°C do -196°C . Základní fází je nízkouhlíkový martenzit (0,04 až 0,14)%C a (5 až 13)%Ni. Podskupinu tvoří oceli typu COR 13/4, 13/6 (horní číslo je obsah Cr v %/dolní Ni v %)
- Poslední skupinou jsou oceli austenitické, které protože mají strukturu fcc, nevykazují tranzitní lomové chování. Jsou to jednak chrom-niklové austenitické oceli (18 až 20)% Cr, (8 až 14)% Ni 17 241 až 17 341 a dále mangan-chromové austenitické oceli 17 481 (0,1% C, 18 – 22% Mn, 9 – 14 % Cr)

Doposud jsme hovořili o problémech, které souvisí se strukturou výchozího (základního) materiálu. Z materiálu se vyrábí konstrukční díl. Hovoříme o technologickém zpracování, které způsobuje tzv. výrobní degradaci vlastností materiálu a tedy i zkřehnutí. Během provozu také může docházet k změně vlastností materiálu a tedy i ke zkřehnutí. Tento proces označujeme termínem provozní degradace.

U velkých svařovaných konstrukcí jako výrobní degradace se označuje svařování.

Zkušenosti ukázaly, že značná část křehkých lomů se iniciovala ve svařech nebo v jejich těsném sousedství. Při svařování se musí části určené ke svaření natavit a spojit s roztaveným svarovým kovem. Protože ohřátá oblast je velice malá ve srovnání s rozměry svařovaných dílů, je rychlost ochlazování velká a to jak ve svarovém kovu, tak i v tepelně ovlivněné zóně.

Tento pochod může mít za následek:

- (a) Vznik pnutí (napětí)
- (b) Ovlivnění struktury
- (c) Možnost vzniku defektů.



Ad a) V okolí svaru jsou zbytková napětí řádově velikosti meze kluzu materiálu. Tato napětí zvyšují pravděpodobnost vzniku křehkého lomu v případě, že se jedná o materiál náchylný ke křehkému lomu. K lomu pak může dojít aniž působí zatížení (při vyvařování austenitické vrstvy u tlakové nádoby hydrocracku v KPS došlo k lomu od pnutí způsobených svařováním). Tato napětí je možné odstranit žiháním, které vede nejen ke snížení napětí v okolí případných defektů, ale obnovuje tvárnost zdeformovaných míst.

Ad b) K ovlivnění struktury dochází v bezprostředním okolí svaru v tepelně ovlivněné zóně. Zde dochází ke zhrubnutí zrna, což může mít za následek zkřehnutí.

Ad c) Defekty vznikající v důsledku svařování jsou zpravidla dvojí

- trhliny za tepla; vznikají zpravidla u ocelí s vysokým obsahem síry (větší než 0,03%), kde může docházet ke vzniku siřičkového eutektika na hranicích zrn v případě velkého tepelného příkonu (elektrostruskové svařování). Mikrotrhliny vznikají během tuhnutí siřičkového eutektika. Tyto trhliny není možné odstranit tepelným zpracováním po svařování. Pomůže pouze volba jiného materiálu, který je čistější – jak základní materiál tak i svarový kov,
- trhliny způsobené vodíkem. Nejběžnější defekty, které bývají přítomny v TOZ, jsou defekty způsobené přítomností vodíku. Tyto trhliny vznikají na hranici základního materiálu a nataveného svarového kovu.

