National Conference with International Participation
ENGINEERING MECHANICS 2006
Svratka, Czech Republic, May 15 – 18, 2006
paper no. 220

THE EFFECT OF OVERLOADING OF PIPES ON THEIR FRACTURE TOUGHNESS IN RELATION TO THE STRENGTH GRADE OF STEEL

M. Šperl*, Ľ. Gajdoš*

Summary: *The present experimental results showed a very positive effect of a controlled overloading of a pipeline on its fracture toughness. These results have been referred to steels of the class L360MB and L415MB. However, more recent results obtained on L450MB steel indicated that the positive effect of oveloading is reduced as the strength properties of steels are increased. It follows from this that the final technological operation of overloading of pipes made from steels of an increased strength could be let out from the pipe manufacture scheme. The paper presents experimental results which prove by evidence a decreasing positive effect of overloading on the fracture toughness of steels of high strength properties.*

1. Úvod

Odpor materiálu vůči lomu je vlastností, která určuje úroveň tolerance eventuálních defektů v tlakem zatíženém potrubí. Tento odpor vyjadřujeme kritickou hodnotou efektivního lomového parametru řídícího lomový proces tělesa. Vzhledem k tomu, že pro výrobu tenkostěnných spirálně svařovaných trub, které byly předmětem našeho výzkumu, se používají materiály, které vykazují dobré plastické vlastnosti a v okamžiku jejich lomu dochází k velké plastické deformaci před čelem trhliny, je vhodným elasto-plastickým lomovým parametrem Rice-ův křivkový J integrál.

Vysoká úroveň lomové houževnatosti vyjádřená v našem případě pomocí J integrálu je zárukou vysokých hodnot lomových parametrů určujících kritickou velikost trhliny pro určitý tlak v potrubí, nebo kritický tlak pro danou velikost trhliny. Proto při vývoji nových pevnějších materiálů se přikládá velký význam i dosažení vysokých hodnot lomové houževnatosti.

Díky účasti našeho ústavu na řešení dvou poměrně rozsáhlých grantových projektů MPO (č. FA-E3/009 – již ukončen, č. FT-TA/091), s hlavním řešitelem Mittal Steel Ostrava, bylo možné posoudit, jaký vliv na lomovou houževnatost materiálu má finální technologická operace přetížení hotové trubky vnitřním tlakem vody na úroveň blízkou mezi kluzu v závislosti na pevnostním stupni oceli. Výzkum lomově mechanických vlastností probíhal na ocelích třídy L360MB, L415MB a L450MB.

* Ing. Martin Šperl, Ing. Ľubomír Gajdoš, CSc.: Ústav teoretické a aplikované mechaniky – AVČR;Prosecká 76, 19000 Praha 9; tel.: +420286882121, fax: +420286884634;
e-mail: sperl@itam.cas.cz, gajdos@itam.cas.cz

Lomová houževnatost byla určena vždy na vzorcích odebraných z vyválcovaného plechu, z hotové skružené trubky se svařenými dotykovými hranami a z trubky po finálním tlakovém přetížení. Vývoj hodnoty lomové houževnatosti v závislosti na jednotlivých technologických krocích byl sledován u všech tří zmiňovaných ocelí.

2. Experimentální práce

Podstatou postupu určení lomové houževnatosti na základě J integrálu je určení závislosti „síla – posuv působiště síly“ u vzorků s předem nacyklovanou trhlinou. V našem případě byly použity vzorky pro asymetrický tah (CT vzorky) s orientací trhliny v podélném směru trubky. Každý zkoušený vzorek se zatížil na jinou úroveň síly, resp. posuvu působiště síly a pak byl odtížen. Plocha vzniklá pod křivkou této závislosti určovala hodnotu J integrálu. Je-li úroveň síly dostatečně vysoká, dojde během zatížení k nárůstu trhliny Δa a tento nárůst se před statickým dotržením vyznačí a zviditelní na lomové ploše pomocí tzv. značkování, např. zvýšením teploty. Zvýšená teplota vyvolala po určité době působení oxidaci lomové plochy, což poskytlo barevný kontrast umožňující stanovení nárůstu trhliny Δa. Statické dolomení zbytkového nosného průřezu následovalo po zchlazení zkušebního tělesa v tekutém dusíku. Hodnota nárůstu trhliny Δa, která odpovídá příslušnému zatížení, byla určena fraktograficky z lomových ploch jednotlivých vzorků dle metodiky ASTM. Výsledky byly zpracovány ve formě tzv. R křivek, které udávají závislost J integrálu na nárůstu trhliny.

R křivka vznikne proložením mocninné závislosti typu $J= c_1.(\Delta a)^{c_2}$ experimentálními body, přičemž c_1 a c_2 jsou konstanty. S touto závislostí počítá i americká norma ASTM E 1820-01 pro měření lomové houževnatosti.

U tvárných materiálů vykazuje závislost „síla - posuv působiště síly“ extremální charakter, tedy výskyt maxima síly na příslušné křivce. V bodě dosažení maxima síly dosahuje J integrál hodnotu J_m. V tomto bodě by došlo k nestabilnímu šíření trhliny, a tedy k rychlému lomu tělesa, pokud by zatěžování tělesa bylo řízeno od síly. Lze tedy tento bod považovat za bod nestability trhliny. Odsud plyne, že J_{in} je menší, než J_m , tedy že iniciační hodnota J integrálu je menší než jeho kritická hodnota, odpovídající bodu nestability trhliny. Při dosažení hodnoty J_{in} dochází k podkritickému nárůstu trhliny během monotónního zatěžování. Hodnota J_{in} se stanoví jako průsečík R křivky s čárou otupení (blunting line). Pojem čára otupení byl zaveden v souvislosti se zdánlivým nárůstem rozměru trhliny v důsledku otupení jejího čela při zatížení. Zpravidla se uvažuje ve tvaru:

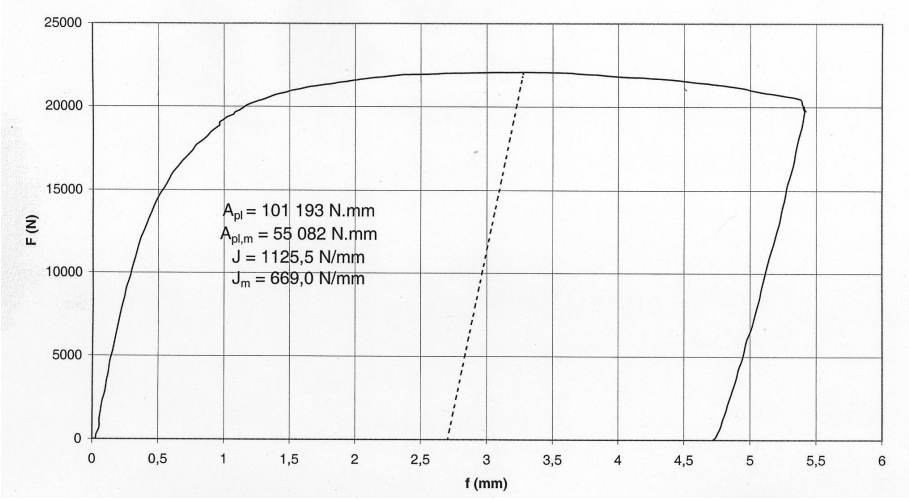
$$J = 2 \cdot R_{fs} \cdot \Delta a \qquad (1)$$

kde: R_{fs} je mez flow stress (nejčastěji brána jako $[R_e+R_m]/2$)

Komplexnější analýzy uveřejněné autory Rice a Sorensen (1978) a Shih (1981), využívající výpočty MKP i experimentální výsledky poskytují obecně závislost $J=M.\sigma.R_{fs}$, kde faktor M je funkcí poměru $Rp_{0,2}/E$ a exponentu deformačního zpevnění n. Velikost faktoru M kolísá mezi hodnotou 1 a 3. Při uvažování hodnoty $M=1$ vyplyne pro přímku otupení vztah (1).

Cyklické zkoušky CT vzorků na výrobu trhlin byly provedeny na vysokofrekvenčním rezonančním vibrátoru, přičemž hodnota součinitele asymetrie cyklu ležela na úrovni R=0,1.

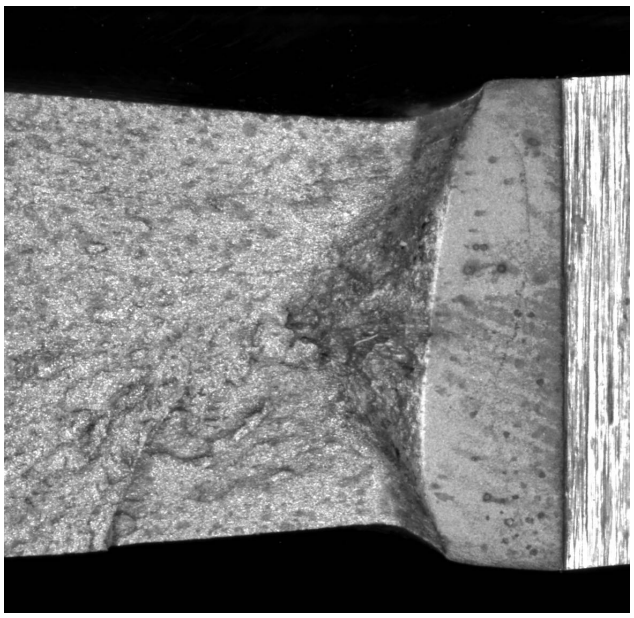
Jako příklad závislosti "síla – posuv působiště síly" je uveden diagram na obr.1, určený u vzorku CT6 pro přetíženou trubku z oceli L450 MB.



Obr.1 Závislost "síla – posuv působiště síly", přetížená trubka L450MB, vzorek CT6

Čárkovaná čára na obrázku je rovnoběžkou s elastickou částí zatěžovací stopy vzorku, procházející bodem maxima síly. Plocha pod diagramem F – f je označena symbolem A_{pl} a levá část plochy oddělená čárkovanou čarou je označena symbolem $A_{pl,m}$. Tyto plochy vstupují do výpočtu J integrálu J, resp. jeho hodnoty J_m .

Na obr.2 je uveden příklad lomové plochy vzorku po jeho rozlomení v tekutém dusíku (vzorek CT6).



Obr.2 Videomikroskopický snímek lomové plochy vzorku CT6 - přetížená trubka L450MB

Na obrázku je zřetelně rozlišitelná oblast stabilního podkritického růstu trhliny během statického zatížení, ležící mezi hladkou únavovou částí lomové plochy na pravé straně obrázku a dolomovou částí vzniklé rozlomením vzorku v tekutém dusíku na levé straně obrázku.

Postup určení J integrálu:

Hodnotu J integrálu, která odpovídá úrovni zatížení F_c na křivce „síla - posuv působiště síly“ při zatěžování CT vzorků lze určit při známých následujících parametrech: délka trhliny a, šířka vzorku w, tloušťka vzorku B, úroveň síly F_c a plastická část plochy pod křivkou „síla - posuv působiště síly“ A_{pl}. Vychází se z rovnice:

$$J = J_{el} + J_{pl} \qquad (2)$$

kde

$$J_{el} = \frac{K^2}{E} \qquad (3)$$

$$J_{pl} = \frac{2(1+\alpha)}{1+\alpha^2}\frac{A_{pl}}{B(w-a)} \qquad (4)$$

přičemž

$$\alpha = 2\left[\left(\frac{a}{w-a}\right)^2 + \frac{a}{w-a} + 0{,}5\right]^{0{,}5} - \left(\frac{a}{w-a} + 0{,}5\right)$$

faktor intenzity napětí je dán vztahem: $K = \frac{F_c Y_2(a/w)}{B\sqrt{w}}$

Funkce $Y_2(a/w)$ je tabelována, nebo ji lze určit podle vztahu:

$$Y_2(a/w) = (a/w)^{0{,}5}\left(29{,}6 - 185{,}5(a/w) + 655{,}7(a/w)^2 - 1017(a/w)^3 + 638{,}9(a/w)^4\right)$$

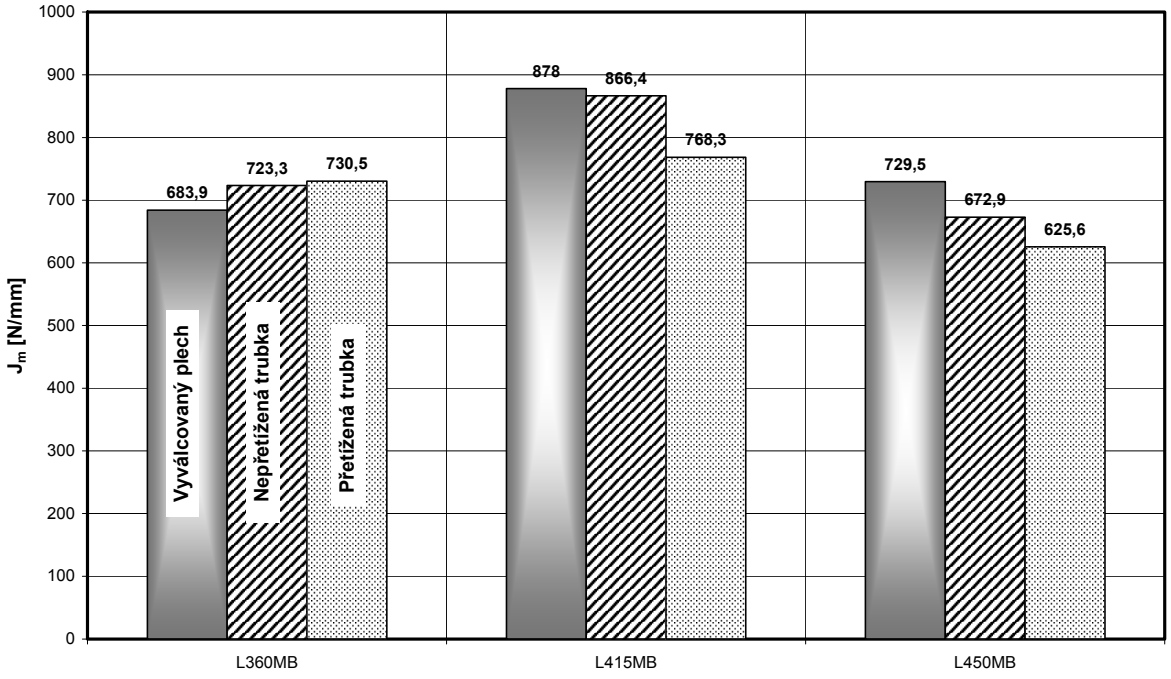
3. Výsledky zkoušek a vyhodnocení

Jak již bylo řečeno, je kritickou hodnotou stability tělesa s trhlinou hodnota J integrálu označená J_m. Při dosažení této hodnoty dojde v tělese s trhlinou, u kterého je zatěžování řízeno od síly, k nestabilnímu šíření této trhliny, a to znamená rychlý lom tělesa. Z tohoto důvodu byly na vyšetřovaných materiálech sledovány hodnoty J integrálu J_m. Zjištěné hodnoty této veličiny jsou přehledně uvedeny v tab.1.

Tab.1 Hodnoty J integrálu J_m pro vyválcovaný plech, nepřetíženou a přetíženou trubku

stav výroby trubky	L360MB J_m[N/mm]	L415MB J_m[N/mm]	L450MB J_m[N/mm]
vyválcovaný plech	683,9	878,0	729,5
nepřetížená trubka	723,3	866,4	672,9
přetížené trubka	730,5	768,3	625,6

Grafické zobrazení změn hodnot J_m v závislosti na fázi technologie výroby trubky a druhu materiálu je na obr. 3.



Obr.3 Sloupcový diagram hodnot J integrálu J_m

Na obrázku je možné vidět vliv pevnostního stupně použité oceli na hodnotu J_m. Odsud lze v zásadě posoudit, jaký vliv má přetížení hotové trubky vnitřním tlakem vody na tuto hodnotu. Vezmeme-li za základ, pro porovnání hodnot, lomové vlastnosti nepřetížené trubky, pak můžeme konstatovat, že přetížení hotové trubky má pozitivní vliv na lomovou houževnatost materiálu pouze u oceli L360MB. Trend zlepšení lomové houževnatosti nelze pozorovat u oceli L415MB ani u L450MB. Konkrétně došlo přetížením trubky z oceli L360MB k mírnému zvýšení kritické hodnoty J_m a to z hodnoty 723,3 N/mm na hodnotu 730,5 N/mm. U ocelí L415MB a L450MB lze pozorovat opačný účinek, vyvolaný přetížením trubky. U materiálu L415MB klesla hodnota J_m o zhruba 11% (z 866,4 N/mm na 768,3 N/mm) a u materiálu L450MB klesla hodnota J_m o 7% (z 672,9 N/mm na 625,6 N/mm). Vzhledem k uvedeným výsledkům můžeme konstatovat, že na rozdíl od ocelí s nižším pevnostním stupněm nepřináší přetížení trubek vyrobených z ocelí vyšších pevnostních tříd zlepšení lomové houževnatosti, nýbrž ji zhoršuje.

Za povšimnutí také stojí vývoj hodnoty J_m v závislosti na fázi technologie výroby trubky a druhu materiálu. U oceli L360MB lze pozorovat vzestupný růst J_m od vyválcování plechu až k přetížené trubce. U ocelí L415MB a L450MB je tento trend obrácený, tedy nejvyšší hodnoty J_m dosahuje v obou případech vyválcovaný plech. O některých výsledcích bylo pojednáno v práci Gajdoše a Šperla (2004).

Stanovená hodnota J integrálu J_m je u oceli L450MB přibližně stejná jako u oceli L360MB, přestože má ocel L360MB nižší pevnost. To může být způsobeno mikrolegováním a technologickým postupem výroby daného typu oceli, který ovlivňuje její pevnostní vlastnosti.

4. Závěr

Na základě rozsáhlých experimentálních zkoušek, týkajících se vyšetřování lomově mechanických vlastností ocelí L360MB, L415MB a L450MB určených pro výrobu vysokotlakých spirálně svařovaných trub, jejich vyhodnocení a následné analýzy, lze udělat následující závěry:

a) Všechny tři vyšetřované materiály vykazují poměrně vysokou hodnotu lomové houževnatosti J_m (minimum 625,6 N/mm, maximum 878,0 N/mm).

b) Vzhledem k získaným výsledkům se z hlediska lomových vlastností nejeví přetížení hotové trubky vyrobené z ocelí L415MB a L450MB jako žádoucí. Na druhé straně nelze opomenout příznivý vliv přetížení na úroveň zbytkových pnutí v trubce. Proto lze počítat s tím, že zařazení operace přetížení hotových trubek a samotná úroveň přetížení u vyšších pevnostních stupňů ocelí bude ještě předmětem dalších výzkumných prací a komplexního posuzování výsledků.

5. Poděkování

Tato práce byla podporována v rámci Výzkumného záměru AV0Z 20710524, grantových projektů MPO č. FT-TA/091 a GA AVČR IAA200710604

6. Literatura

ASTM E 1820-01 Standard Test Metod for Measurement of Fracture Toughness. *ASTM Standard* 2001

Gajdoš, Ľ. a Šperl, M.: Vliv technologie výroby plynovodních trub na jejich lomové vlastnosti. *Sborník 13. mezinárodního kolokvia „Spolehlivost vysokotlakých ocelových potrubí“*, 2. – 3. březen 2004, Praha, s. 15/1 – 15/15

Rice, J.R. and Sorensen, E.P.: Continuing Crack Tip Deformation and Fracture for Plane Strain Crack Growth in Elastic – Plastic Solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 26, 1978, pp. 163 -186

Shih, C.F.: Relationship Between the J – Integral and the Crack Opening Displacement for Stationary and Extending Cracks. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 29, 1981, pp. 305 -326