

Jan Kout

**PORUŠOVÁNÍ TEPELNĚ ZUŠLECHTĚNÝCH PRUŽINOVÝCH
OCELÍ V PROVOZU ČESKÝCH DRAH**

*Klíčová slova: lomová houževnatost, lomová mechanika,
křehkolomové konstanty, ČSN 41 5260,
Paris-Erdoganův zákon*

1. ÚVOD

Veškeré pružící prvky železničních kolejových vozidel resp. kolejových vozidel vůbec jsou vyráběny z legovaných ocelí, které se tepelně zušlechťují (kalí a popouští) k dosažení co nejvyšší meze pružnosti a co nejvyšší houževnatosti; je přirozené, že z těchto vlastností plynou i vysoké hodnoty meze kluzu a pevnosti materiálu pružin po zušlechtnění.

Na pružiny, ať už vinuté pružiny nebo listové pružnice, jsou kladeny velmi rozmanité a vysoké nároky z hlediska jejich použití. Musí být schopny značných pružných deformací, musí vykazovat velkou odolnost proti cyklickému a rázovému zatížení a s ohledem na zajištění bezpečnosti železničního provozu musí vykazovat vysokou míru spolehlivosti, aniž dojde k jejich porušení. Legujícími prvky, které zajišťují požadované vlastnosti po tepelném zušlechtnění, jsou převážně křemík, chrom, vanad a molybden.

Ing. Jan Kout, CSc., nar.1940. Absolvent VŠD 1963, specializace konstrukce kolejových vozidel. Vědecká hodnost získána v r.1987. Zaměřen na problematiku mechaniky kontinua, materiálové inženýrství a zkoušení materiálů. Zaměstnán v ČD-VÚŽ, technický vedoucí Zkušební laboratoře ZL 8 a Oblasti materiálů a technologie.

Materiály používané pro výrobu vinutých pružin a listových pružnic pro železniční provoz ČD jsou:

křemíko-chromová dle ČSN 414260

chrom-vanadová dle ČSN 415260 (ekvivalentní oceli 50CrV4 resp. 51CrV4 dle DIN a ISO)

křemíko-chrom-molybdenová 45SCD6 dle NF A 35-571

Pro mezinárodní provoz jsou materiály pro výrobu pružin a pružnic vypružení kolejových vozidel dány ustanoveními vyhlášek UIC 820, 821 a 822.

2. FENOMÉN PORUŠOVÁNÍ, LOMOVÁ MECHANIKA

Dynamicky zatížené strojní součásti, vystavené cyklickému namáhání, tedy namáhání časově proměnnými silami a momenty, se v mnoha případech během své životnosti částečně nebo úplně poruší; tehdy mluvíme o částečném nebo úplném lomu součásti. Každé porušení (lom) musí mít zásadně dvě fáze, a to: **vznik trhliny a šíření trhliny**. Vzniku trhliny předchází existence počátečního iniciačního centra (koncentrátoru napětí), kterým může být obecně jakákoliv vada, jenž se může „probudit k životu“ v okamžiku zatížení součásti; proto může být vznik trhliny i kvazistatickým dějem. Naproti tomu samotné šíření trhliny je vždy proces vyvolaný exploatací součásti.

Pokud dojde k úplné destrukci součásti v celém průřezu, lze lomovou plochu v podstatě rozdělit na dvě části:

- na část charakterizovanou postupným porušováním, při němž se trhlina přetržitě šíří průřezem tělesa a kolmo na směr největšího tahového napětí (makroskopicky vzato),
- na část, která odpovídá závěrečnému, makroskopicky křehkému porušení materiálu.

Pro část postupného, únavového porušování je charakteristické, že šíření hlavních (magistrálních) únavových trhlin je spojeno se vznikem lokálních plastických deformací, které tvoří plastické zóny před čelem trhliny. Tvary plastických zón závisí na geometrii součásti, povaze silového toku a tvaru počátečního

vrubu, pod kterým si nemůžeme představovat pouze vruby konstrukční, ale obecně defekty na povrchu nebo i uvnitř součástí.

Pro část závěrečného, kvazikřehkého dolomení součástí jsou charakteristické: nutnost existence předchozího makrodefektu kritické velikosti (v našem případě předchozího únavového porušení kritické velikosti), a ve většině případů absence makroplastické deformace porušených částí.

Vzájemným posouzením únavového porušení a makroskopicky křehkého dolomení součástí můžeme dostat odpověď na pravděpodobnou příčinu lomu, na velikost nominálního napětí, výskyt přetížení nebo rázů, kritickou velikost trhliny apod.

Významným pomocníkem při posuzování příčin lomů těles (nejenom cyklicky namáhaných) je tzv. lomová mechanika. Tento obor mechaniky kontinua byl rozpracován na základě vytvoření nového fyzikálního modelu pevnosti těles. Tímto novým modelem je vzorek materiálu, v němž je, na rozdíl od klasické mechaniky kontinua, přítomen ostrý vrub nebo makrodefekt materiálu. Jde o dvousložkový model „trhlina + elastické kontinuum“. Pokud je celé těleso lineárně elastické a jen ve velmi malé oblasti na čele trhliny je plastická zóna, považujeme chování takového tělesa s makrodefektem za fenomenologicky lineární a příslušná teorie je lineární lomová mechanika. Jejím úkolem je zjistit podmínky pro nestabilitu makrodefektů, a tím i pro počátek vzniku křehkého porušení těles, resp. kvazikřehkého dolomení součástí předtím únavově porušené.

Z pohledu lomové mechaniky vzniká rychlý lom (zdánlivě křehkého vzhledu) tehdy, jestliže iniciační makrodefekt dosáhne tzv. kritické velikosti \Rightarrow makrodefekt se dostane do labilního stavu. Tím okamžikem nastává proces rychlého šíření trhliny (několik set ms^{-1}). Hnací silou rychle se šířící trhliny je, původně deformací tělesa akumulovaná a v procesu šíření trhliny uvolňovaná energie elastické napjatosti. Tato uvolňovaná energie kryje spotřebu energie pohlcované vznikající plochou trhliny. Důsledkem celkové bilance energií je skutečnost, že lom probíhá při stálém nebo i klesajícím vnějším zatížení. Z hle-

diska lomové mechaniky mluvíme o nestabilním lomu - o nestabilním šíření trhliny. Pokud makrodefekt nedosahuje kritické velikosti, ale v tělese existuje, dochází (z hlediska lomové mechaniky) při zvýšení vnějšího zatížení k tzv. stabilnímu lomu - stabilnímu šíření trhliny, které vlastně koresponduje s dříve uvedeným únavovým šířením trhliny.

Základním lomovým parametrem lineární elastické lomové mechaniky je faktor intenzity napětí (K -faktor). Podle typu módu trhliny (mód trhliny je vlastně model orientace trhliny k silovému toku) se označuje indexem I + III. Pro mód I (mimořádně nejdůležitější model, odpovídající trhlíně orientované kolmo k největšímu tahovému napětí) je K -faktor dán vztahem

$$K_I = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{l} \quad [\text{MPam}^{0,5}]$$

kde Y - činitel, závislý na geometrii a způsobu zatížení tělesa

σ - působící napětí v místech vzdálených od trhliny

l - délka trhliny

K_I - faktor intenzity napětí

Mezní hodnota faktoru intenzity napětí K_{Ic} již odpovídá kritická délka trhliny l_{kr} a kritická hodnota napětí σ_{kr} je dána vztahem

$$K_{Ic} = \text{konst.} \cdot \sigma_{kr} \cdot \sqrt{l_{kr}}$$

kde K_{Ic} - mezní hodnota faktoru intenzity napětí $[\text{MPam}^{0,5}]$

l_{kr} - kritická délka defektu

Tato mezní hodnota je rovněž nazývána *statická lomová houževnatost* a je vlastně materiálovou konstantou v oblasti křeh-

Tato mezní hodnota je rovněž nazývána *statická lomová houževnatost* a je vlastně materiálovou konstantou v oblasti křehkého porušení tak, jako pevnost v tahu je materiálovou konstantou v oblasti tvárného porušení.

Šíření únavových trhlin z hlediska lineární lomové mechaniky, jmenovitě rychlost šíření, lze jednoznačně popsat prostřednictvím faktoru intenzity napětí. Křivka závislosti rychlosti šíření dl/dN na amplitudě faktoru intenzity napětí K_a je v ideálním případě materiálovou křivkou, která nezávisí na tvaru tělesa. Právě tato nezávislost křivky rychlosti šíření trhliny na geometrii tělesa, umožňuje přenos laboratorních výsledků na reálné těleso (součást). Rychlost **stabilního** šíření trhliny (např. únavové porušování) dl/dN je definována jako přírůstek délky trhliny dl v průběhu přírůstků cyklů dN . Jsou-li extrémní hodnoty K -faktoru K_{max} a K_{min} , je amplituda K -faktoru dána vztahem

$$K_a = \frac{1}{2} (K_{max} - K_{min})$$

Výše zmíněnou křivku je možné rozdělit na tři oblasti, a to: A, B a C.

V oblasti A, tj. v oblasti nízkých rychlostí, se křivka asymptoticky blíží zprava *prahové hodnotě* K_{apz} faktoru intenzity napětí. Pod touto hodnotou K -faktoru se trhlina nešíří.

V oblasti B lze rychlost šíření trhliny popsat Paris-Erdoganovým zákonem

$$\frac{dl}{dN} = A \cdot K_a^\beta$$

kde A, β - materiálové konstanty

K_a - amplituda faktoru intenzity napětí

Oblast C, která navazuje na oblast B, je charakterizována vysokými rychlostmi šíření a přechodem k nestabilnímu lomu.

Křivka se zleva asymptoticky blíží mezní hodnotě faktoru intenzity napětí K_{lc} -lomové houževnatosti při rovinné deformaci a při statickém zatížení. Je vhodné upozornit na to, že oblast C je spíše záležitostí křehkolomovou, než záležitostí únavovou.

V souvislosti s predikcí životnosti dynamicky zatížených součástí je žádoucí odpovědět na otázku velikosti tzv. *přípustné trhliny* a *růstu nepřipustné trhliny*.

Přípustná trhlina je taková trhlina, která nemůže způsobit porušení konstrukce za jejího provozu a nezkrátí tak její technický život pod projektovanou dobu. Pro těleso s trhlinou délky l_0 je podmínkou nešíření dané trhliny nerovnost

$$K_0 \leq K_{apz}$$

Tato nerovnost ukazuje na velký praktický význam prahové hodnoty K_{apz} faktoru intenzity napětí. Prahová hodnota délky trhliny je pak l_p . Z výrazu pro faktor intenzity napětí K_I lze prokázat, že klasická mez únavy je přímo úměrná materiálové konstantě K_{apz} .

V zatěžované součásti, jak praxe ukazuje, je v mnoha případech možno nedestruktivní kontrolou objevit (indikovat) trhlínu, která je větší než přípustná. Nicméně, i nepřipustná trhlina nemusí nutně vést k úplnému porušení sledované součásti. Je však nutné v průběhu exploatace konstrukce sledovat (ve většině případů nedestruktivně), zda růst této trhliny odpovídá predikovanému růstu podle Paris-Erdoganova zákona (oblast B, křivky šíření trhliny). Predikce růstu znamená stanovení závislosti mezi počtem cyklů N a délkou trhliny l . Výpočet této závislosti lze provést numerickou integrací Parisova zákona. Označíme-li délku indikované trhliny l_1 , která je větší než přípustná prahová hodnota l_p , pak závislost mezi počtem cyklů N a délkou trhliny l je dána vztahem

$$N = A^{-1} \cdot \int_{l_1}^l \frac{dl}{K_a^\beta}$$

3. KŘEHKOLOMOVÉ MATERIÁLOVÉ KONSTANTY PRUŽINOVÉ OCELI ČSN 415260

Z toho, co bylo dosud řečeno je již patrné, že k predikci chování dynamicky zatížené reálné součásti, u níž můžeme předpokládat existenci iniciačních imperfekcí, resp. již předchozí exploataci vzniklých trhlin, je **bezpodmínečně nutné** znát mj. křehkolomové materiálové konstanty. Jejich zjišťování, zvláště pak u materiálů tepelně zušlechťených, je časově i finančně velmi náročné, koneckonců jako každé materiálové zkoušky, která musí mít statisticky vypovídací schopnost.

V rámci řešení výzkumného úkolu pro ČD DOP, byly získány křehkolomové materiálové konstanty pružinové oceli ČSN 415260 (ekvivalent oceli 51CrV4 dle ISO 683-14:1992(E)).

3.1 KŘIVKA ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY

Křivka šíření únavové trhliny v oblasti platnosti Paris-Erdoganova zákona je na obr.1, přičemž tvrdost zkušebních tyčí, určených pro měření křivky šíření, byla v rozsahu 40+42 HRC. Parametry A a β Paris-Erdoganova zákona jsou následující:

Parametr	Vypočítaná hodnota	Standardní odchylka
A	$1,51 \cdot E^{-7}$	$2,48 \cdot E^{-9}$
β	2,41	0,08

Koeficient korelace 0,9638 ukazuje na velmi dobrou shodu matematického modelu, tj. Paris-Erdoganova zákona, s experimentálně určenými hodnotami (viz obr.1), získanými ze zkoušek 33 zkušebních tyčí. Poznamenejme, že obr.1 znázorňuje křivku šíření v oblasti B.

3.2 DYNAMICKÁ LOMOVÁ HOUŽEVNATOST

Měření dynamické lomové houževnatosti bylo prováděno v teplotním rozsahu $-100^{\circ}\text{C} + 27^{\circ}\text{C}$, přičemž na každé teplotě byly odzkoušeny nejméně 3 zkušební tyče, celkem 28 zkušebních tyčí. Závislosti dynamické lomové houževnatosti K_{Id} , K_{Qd} , resp. K_{Jd}

na zkušební teplotě jsou uvedeny na obr.2 a 3. Tvrdost zkušebních tyčí pro měření dynamické lomové houževnatosti byla v rozsahu 40 + 41 HRC.

3.3 STATICKÁ LOMOVÁ HOUŽEVNATOST

Měření statické lomové houževnatosti bylo prováděno v teplotním rozsahu $-100^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C}$, celkem na 25 zkušebních tyčích. Závislosti statické lomové houževnatosti K_{Ic} , resp. K_{CJ} na zkušební teplotě jsou uvedeny na obr.4, 5, 6, a 7.

4. ZÁVĚR

Aplikace lomové mechaniky umožňuje kvantitativně popsat rychlost šíření únavových trhlin a rovněž i podmínky jejich nešíření. Znalosti křehkolomových materiálových konstant, jako jsou parametry **Paris-Erdoganova** zákona, prahové hodnoty K_{spz} , statické lomové houževnatosti K_{Ic} a dynamické lomové houževnatosti K_{Ia} umožňují výpočty únavové odolnosti, únavové životnosti, přípustných napětí či přípustných defektů v reálných součástech, zatěžovaných cyklickými silami a v neposlední řadě i selekci materiálů z hlediska jejich odolnosti vůči únavovému porušení.

Spojením znalostí křehkolomových materiálových konstant s možnostmi jaké nabízí metoda konečných prvků, je možno (tak, jak to bylo v rámci řešeného úkolu realizováno pro listovou trapézovou a listovou parabolickou pružnici) stanovit výpočtem korekční funkce povrchových trhlin půlkruhového a semieliptického tvaru v listu pružnice, stanovit kritickou délku trhliny a tím připravit podklady pro nedestruktivní kontroly pružnic železničních kolejových vozidel.

Znalost výše uvedeného (realizováno pro Generální inspekci ČD) umožňuje při zpracovávání expertních posudků stanovit na velmi dobré vypovídací úrovni historii únavově porušeného vypružovacího prvku a formulovat časový rozvoj porušení v kore-

laci s hloubkou trhliny; jedná se o kvalitativně vyšší stupeň posuzování únavy kovových součástí, než dává k dispozici „klasická“ teorie únavy.

Literatura:

- [1] Probabilistic fracture mechanics and fatigue methods: Applications for Structural Design and Maintenance. ASTM Publication Code Number (PCN) 04-798000-30. Philadelphia 1983
- [2] Atlas of Fatigue Curves. ASM. Ohio 1986.
- [3] Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. John Wiley & Sons, N.Y. Third Edition, 1989.
- [4] Aplikace lineární elastické lomové mechaniky na mezní stav porušení listové pružnice a šroubovitě válcové pružiny. Liberec, LENAM s.r.o. 1994.
In: Závěrečná zpráva úkolu č. K 53 12 064 „Stanovení kritérií...“. ČD VÚŽ Praha 1996.
- [5] Lomové charakteristiky oceli 15 260.7. CONMET s.r.o Brno. 1995.
In: Závěrečná zpráva úkolu č. K 53 12 064 „Stanovení kritérií...“. ČD VÚŽ Praha 1996.
- [6] Halmshaw, R.: Non-Destructive Testing. Hodder & Stoughton. London 1991.

Praha, leden 1997

Lektoroval: Doc.ing.V.Humen, CSc.

Lenam, s.r.o. Liberec