

Akademik Jaros'av Němec, Praha

Hlavní zkušenosti vyplývající z rozboru havárií konstrukcí namáhaných na únavu

Haupterfahrungen aus der Dislokationen der Stahlkonstruktionen bei der Ermüdungsbeanspruchung

Im Beitrag wird auf Grund der Autorerfahrungen über die Entwicklung der ermüdungsmäßigen Beschädigung aus technologischen Anfangsfehlern und Kerben in den Konstruktionen, die aus den kohlenstoffhaltigen Stahllarten erzeugt werden, benachrichtigt. Es ist der Charakter von einzelnen Stappen der Erweiterung sowie kleiner als auch großer ermüdungsmäßigen Rissen bis zur Körperzerstörung durch einen Bruch beschrieben. Dadurch ist die Bewertungsmöglichkeit der Lebensdauer von Konstruktionen gegeben, was es heute für notwendiger als die Berechnung einer Anfangsfestigkeit gehalten ist. Der gefährliche Schnellbruch ist nicht nur vom Material, sondern auch von der Temperatur und geometrischen Parametern der Konstruktion abhängig. Die Ergebnisse der zahlreichen, langjährigen Studien des Autors weisen nicht nur auf eine notwendige Korrektur der heutigen Tagebaumechanik hin, sondern auch auf die Möglichkeit einer beiläufiger Bestimmung der restlichen Lebensdauer eines Teiles von wichtigen Ingenieurwerken, die durch den Betrieb beschädigt sind. Dabei werden nicht nur der Betriebscharakter und Materialtyp sondern auch die Maschinenteilgröße und Milieueinfluß berücksichtigt.

Als Beispiel wird die Möglichkeit der Verlängerung der Lebensdauer eines Großbaggers für die Tagebaukohlenförderung aufgeführt, der große Ermüdungsrissen im geschweißten Ausleger nachgewiesen hat. Der Beitrag ist nicht nur als Information für Konstrukteure und Betreiber der Großgerätetechnik zur Beurteilung ihrer Zuverlässigkeit bestimmt, sondern weist auch auf die Möglichkeiten der Verlängerung ihrer Lebensdauer hin ohne ein Risiko zu tragen.

Main experience resulting from the analysis of crashes of constructions stressed by fatigue

In the article it is on the base of author's experience got through the development of fatigue deterioration from initial technological faults and notches in constructions produced from carbon steels. It is shown the nature of single stages of

spreading of small and great fatigue cracks upto the failure of bodies by the break. By that it is given the possibility of evaluation of construction lifetime, what is today more significant than the calculation of initial strength. The dangerous quick break is dependent not only on material, but also on the temperature and on geometrical parameters of construction. The results of author's long year studies of many crashes show on the necessity of corrections of today's opencast mechanics, but also on the possibilities of approximate determination of rest lifetime of parts of important engineering works damaged by the operation. At that there are respected not only the nature of operation and type of material, but also the size of bodies and influence of environment. As example it is mentioned the solution of possibility of extension of giant excavator function for opencast excavation of coal that showed great fatigue cracks in welded boom.

The article serves not only to the informing of designers and operators of great technical works to the judgment of their reliability, but also shows the possibilities of extension of their operation without risk failure.

Основной опыт, вытекающий из анализа аварий у конструкций подвергаемых напряжениям от усталости материала

В статье автор по своему опыту обсуждает развитие усталостного повреждения, начиная с первоначальных технологических недостатков и надразов у конструкций изготовленных из углеродистой стали. Показывается характер отдельных этапов расширения небольших и крупных трещин усталости до самого разрушения тел из-за усталостного излома. На этой основе представляется возможность оценки долговечности конструкций, что в настоящее время является более важным чем расчет первоначальной прочности. Опасный быстрый излом зависит не только от материала, а также от температуры и от геометрических параметров конструкции. Результаты долгосрочных исследований автора, занимающихся рядом аварий, показывают необходимость корректировок в имеющейся механике

излома, но и возможности приблизительного распределения остаточной долговечности частей важных инженерных произведений поврежденных в ходе эксплуатации. При этом принимается в учет не только характер эксплуатации и тип материала, а также размер тел и влияние окружающей среды. В качестве примера приводится решение возможности продления срока службы крупного экскаватора для открытой угледобычи, который показывает большие трещины усталости в сварной стреле.

Статья не только информирует конструкторов и потребителей крупных технических произведений по оценке их надежности, а показывает также возможности продления их эксплуатации без риска отказа.

Hlavní zkušenosti vyplývající z rozboru havárií konstrukcí namáhaných na únavu

V článku je na základě zkušeností autora probírán rozvoj únavového poškození z počátečních technologických vad a vrubů v konstrukcích vyrobených z uhlíkových ocelí. Je ukázána povaha

jednotlivých etap šíření malých i velkých únavových trhlin až do porušení těles lomem. Tím je dána možnost hodnocení života konstrukcí, což je dnes důležitější než výpočet počáteční pevnosti. Nebezpečný rychlý lom je závislý nejen na materiálu, ale také na teplotě a na geometrických parametrech konstrukce. Výsledky autorových dlouholetých studií řady havárií ukazují na nezbytnost korekcí dnešní lomové mechaniky, ale také na možnosti přibližného určování zbytkové životnosti částí důležitých inženýrských děl poškozených provozem. Při tom se respektují nejen povaha provozu a typ materiálu, ale také velikost těles a vliv prostředí. Jako příklad je uvedeno řešení možnosti prodloužení funkce velkorýpadla pro povrchovou těžbu uhlí, který vykázal velké únavové trhliny ve svařovaném výložníku.

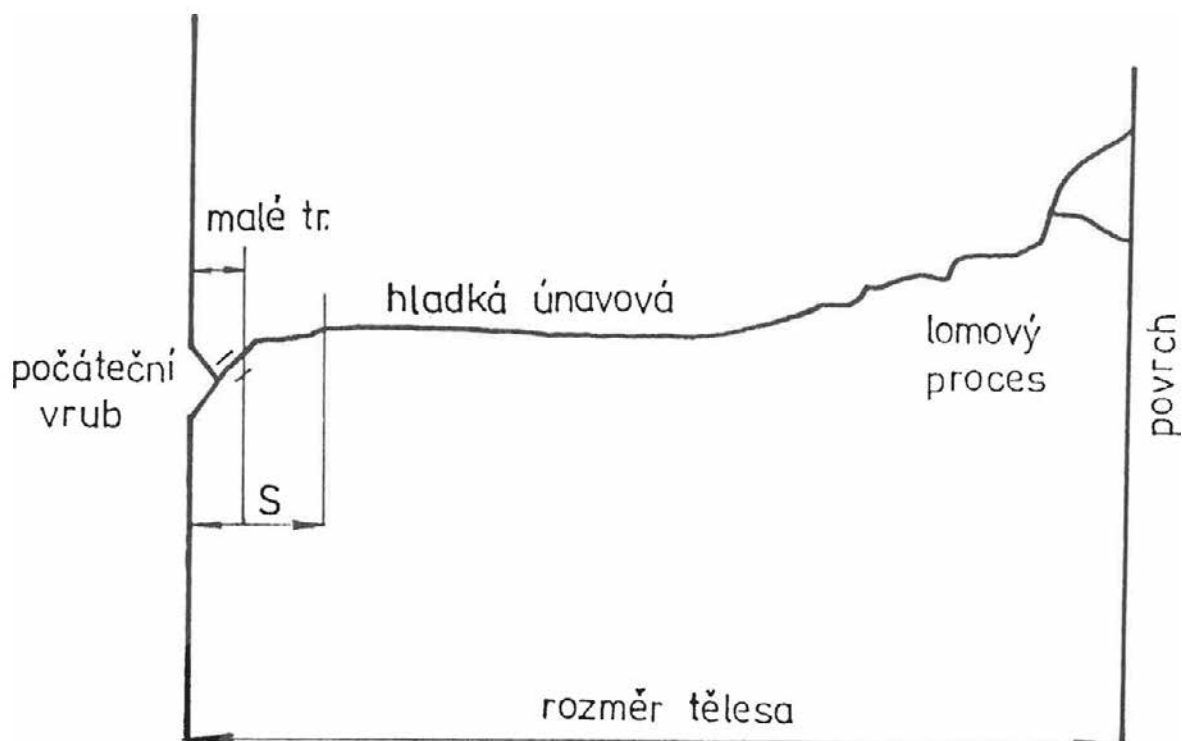
Článek slouží nejen k informování konstruktérů a provozovatelů velkých technických děl k posuzování jejich spolehlivosti, ale také ukazuje možnosti prodloužování jejich provozu bez rizika selhání.

Publikované poznatky byly získávány po dlouhou řadu let z analýzy provozních poruch a havárií různých strojů a konstrukcí z ocele, namáhaných složitým únavovým zatěžováním. Přitom rozumíme únavovým namáháním jak provozní zatěžování proměnlivými silami a momenty (cyklickou únavu), tak kvazistatickými dlouhotrvajícími stavy zatížení sice s velmi malým počtem jeho změn, ale s lokálně vysokou hladinou napětí včetně vlastních technologických pnutí, s iniciačními makrovadami materiálu a účinky prostředí (statickou únavu). Zkušenosti byly získány řešením poruch různých typů těles, rámových a deskových částí, tlakových nádob a skořepin, částí vozidel a letadel i složitých konstrukcí. Většinou šlo o svařovaná tělesa, takže je nutné uvažovat i složitou strukturu vad ve svarech a řadu makrovrubů. Obecně je možné říci, že byly ve hře vždy materiálové i geometrické imperfekce. Zobecněním lze odvodit některé společné poznatky o procesech degradace vlastností konstrukčních ocelí ve složitých provozních podmínkách, které se v mnohém liší od výsledků laboratorních zkoušek na jednoduchých tyčích a vzorcích materiálu. Budoucnost teorie mezních stavů ocelových těles včetně lomové mechaniky leží právě v ocenění reálných podmínek namáhání v provozu strojů a konstrukcí. Jinak by byla teorie značně zformalizována a neumožňovala by ocenit skutečnou životnost technických děl.

Do teoretických rozborů je dále nezbytné dopracovat důležité vlivy technologie těles, zejména její vliv na stav a povahu vad materiálu a na stav povrchové vrstvy materiálu.

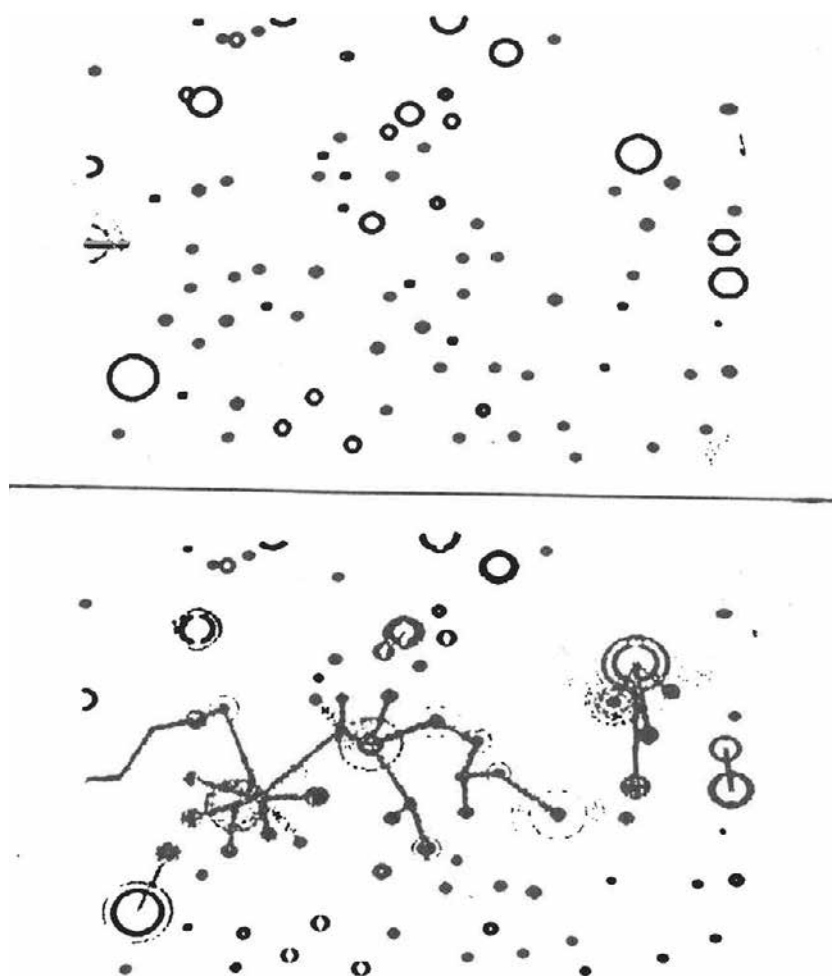
Poškozování ocelí cyklickou únavou těles

- 1) Rozvoj trhlin při časově často proměnlivém zatížení těles má řadu odlišných etap a prakticky vždy vychází z povrchu (viz. obr. 1). Jen v případech zcela výjimečných, např. při kontaktní únavě těles nebo při velmi vysoce



Obr. 1

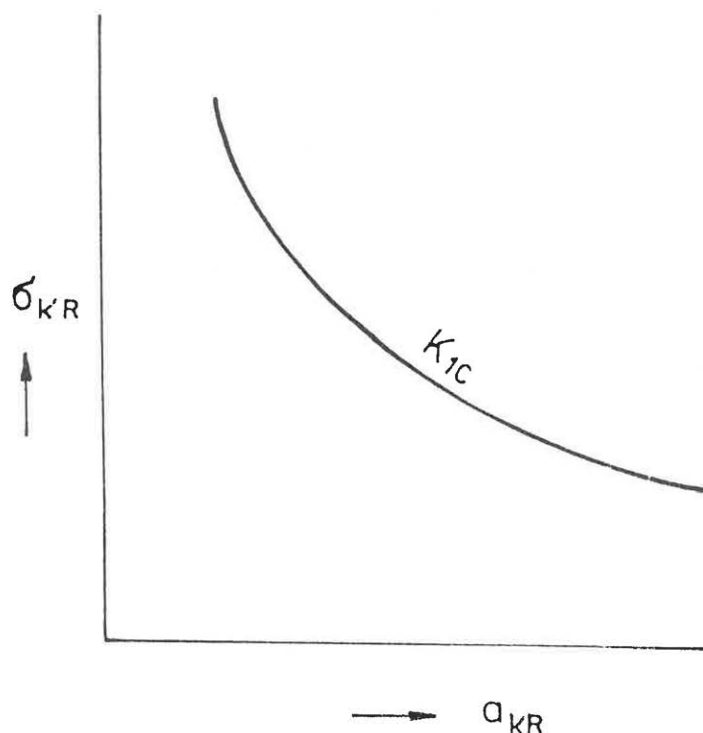
zpevněném povrchu může vzniknout počáteční rozvoj poruchy soudržnosti těsně pod povrchovou vrstvou materiálu těles. Při obvyklé hladině rozkmitu deformace musí být pro iniciaci únavové trhliny přítomná dostatečná napětí na povrchu tělesa. Z kořene výchozího vrubu se po určitém počtu změn namáhání vytvoří počáteční strukturně malá únavová trhlina která zpravidla roste ve směru největšího smykového napětí. Většinou se vytvoří celý systém malých trhlín v slabých místech materiálu. Jestliže nedojde ke značnému zvýšení bariér proti rozvoji těchto malých trhlín, pak prochází fyzikálně malá trhlina tloušťkou povrchové vrstvy tělesa a dosahuje přitom nejmenší rychlosti. Obvykle vyplňuje polovinu i více celkové životnosti tělesa. Přitom se stáčí kolmo k největšímu takovému napětí rozevírajícímu kořen trhliny. V počátečních fázích šíření vykazuje povrch lící trhlín "drsnou povahu" odpovídající skokům trhlín od inkluze k inkluzi, od nehomogenity materiálu k jiné a vzniká větvení trhlín a sekundární trhliny (i zastavené trhlínky) před kořenem rozhodující trhliny. Uplatňuje se rozptyl energie do řady míst lokálně plasticky přetvořených a bilance energií (viz. obr. 2) je složitá. Mluvíme o strukturně malých trhlínách, později při snížené intenzitě interakcí a vzniku rozhodující bariéry cyklickým zpevněním a poklesem velikosti efektivní amplitudy lokální deformace v kořeni trhliny o fyzikálně malých trhlínách. Po přechodu přes povrchovou vrstvu materiálu dovnitř tělesa dojde k šíření velké trhliny a interakce se slabými místy struktury materiálu vymizí, povrch líce trhlín je hladký, lasturovitý, se známkami dočasných zastavení trhlín magistralního typu. Rozhodující bariéra



Obr. 2

je trhlinou vyvolané následné tlakové pnutí před čelem trhliny. Před dosažením kritické délky trhliny a nebo protilehlého povrchu tělesa vznikne etapa formování lomu s velkými skoky rozvinuté trhliny. Závěrečný lom je smykový lom se znatelnými vytrženými částmi materiálu, často s několika větvemi šikmo položenými k povrchu tělesa. Záleží na geometrii tělesa a na okamžitých změnách silového toku a velikosti přídavného namáhání v procesu formování lomu. Poměr počtu změn namáhání tělesa v jednotlivých etapách procesu záleží na úrovni napětí, tvaru a velikosti tělesa.

Kritická velikost rozvinuté magistralní trhliny záleží na úrovni napětí. Lomová mechanika převádí toto mezní napětí na průměrnou nominální hodnotu. Vztah mezi touto kritickou velikostí napětí a mezní velikostí rozvinuté únavové trhliny pro formování lomu určuje lomová houževnatost materiálu K_{IC} (podle obr. 3). Ta ovšem není jen vlastností materiálu a jeho teploty, ale záleží na velikosti, tvaru tělesa a povaze jeho namáhání. Pro vznik rychlého závěrečného smykového lomu musí být splněny určité geometrické



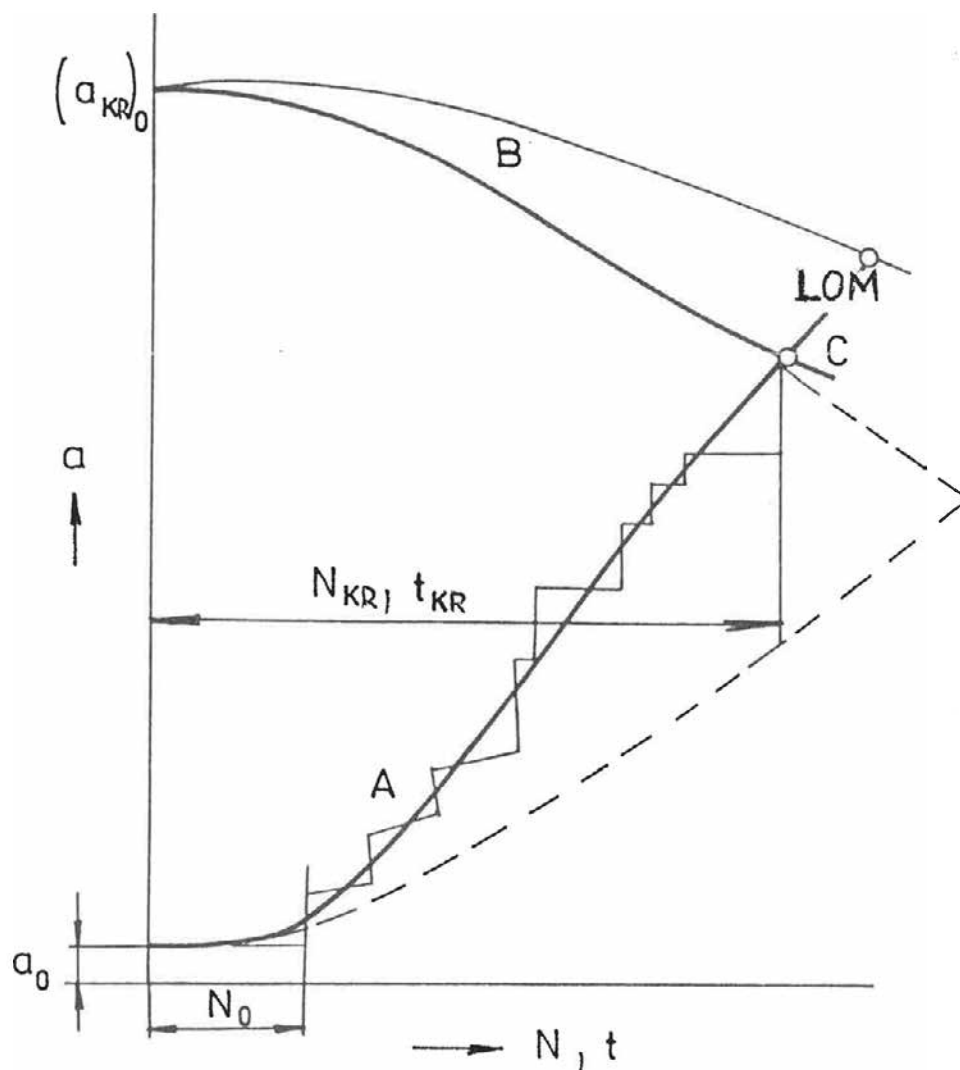
Obr. 3

a napětové podmínky a určitá energie elastické napjatosti nahromaděná v tělese. Tak např. u potrubí o průměru $2r$ a tloušťce stěny h s vnitřním tlakem p je uvedená povaha rychlého katastrofického lomu možná, je-li lomová houževnatost menší než podle vztahu:

$$(K_{IC})_{\min} = \frac{pr^2}{2h^{1,5}} \left[1 - 0,2 \sqrt{\frac{r}{h}} \right] \quad (1)$$

V závěrečné fázi lomu působí velmi nepříznivě nízká teplota materiálu a dynamická povaha napětí. Vykazuje-li materiál vyšší lomovou houževnatost než je uvedená, znamená to, že rychlý lom nevznikne a závěrečné porušení je houževnaté a relativně pomalé. U potrubí se projeví netěsností dříve než potrubí praskne vyboulením.

- 2) Určení životnosti těles je schematicky znázorněno na obr. 4. Počet cyklů namáhání do lomu je určen dvěma prakticky na sobě nezávislými procesy. První (křivka -A-) je lokální poškozování materiálu na čele rozvíjející se trhliny. To se sice uskutečňuje jednotlivými skoky stále většími tak, jak roste délka trhliny, ale pro výpočet životnosti zpravidla určujeme průměrnou rychlost šíření únavových trhlin. Okamžité rozdíly v rychlosti šíření trhlin jsou velké a nelze srovnávat rychlost odvozenou ze stop určených mikrofraktograficky s průměrnou rychlostí makroskopickou pro přibližné určování života těles, namáhaných na únavu, v provozních



Obr. 4

podmínkách. Průměrná rychlost určovaná křivkou -A- je případ od případu odlišná u reálných konstrukcí od této křivky určené pro vzorek ocele v laboratorních podmínkách. Teoretické křivky pro jednotlivé typy konstrukčních ocelí musí odpovídat povaze jednotlivých etap rozvoje trhlin a povaze bariér proti únavovému poškození, jak bude dále uvedeno. Kromě toho u konstrukcí, zejména svařovaných, se uplatňuje řada nestabilit při šíření trhlin. Tak např. vzniká spojování řady počátečních trhlin v kořeni svarů, či přechody přes ostrou hranici svaru, atd. U tenkostěnných konstrukcí dochází u dlouhých trhlin k vybočování lící trhlin a lokální ztrátě stability stěny.

Druhý proces poškození je vyjádřen křivkou -B-, která představuje stárnutí a degradaci houževnatosti materiálu v dlouhodobém provozu. Intenzita tohoto procesu ve větších objemech materiálu je určována klesáním kritické délky trhliny, snižováním lomové houževnatosti z počáteční hodnoty určené technologií. Stárnutí omezuje velikost rozvinuté trhliny k uskutečnění závěrečné fáze lomu. Procesy degradace houževnatosti mohou být velmi různé a složité. Jsou to např. procesy difusní, jako křehnutí při

tečení materiálu za tepla, nebo difuze rozpuštěných plynů k defektům struktury (vodíkové křehnutí), či deformační stárnutí blokováním dislokací, precipitační stárnutí a nebo pokles houževnatosti interakcí s materiálem (např. radiační stárnutí neutronovým tokem stěnou nádob reaktorů atomových elektráren).

V průsečíku obou křivek -A- a -B- je bod života tělesa. Čím je kratší počáteční fáze vzniku růstu schopné trhliny a čím je větší průměrná rychlost šíření trhliny, tím kratší je život těles, čím rychleji klesá lomová houževnatost v provozu tím dříve vznikne lom. Prodloužit život těles předpokládá ovládat procesy vyjádřené oběma křivkami, podle povahy těchto procesů poškozování. Ve všech případech je třeba respektovat velikosti procesních objemů materiálu, neboť poškozování záleží nejen na úrovni napětí, ale také na velikosti exponovaného objemu, v němž vyvolává poškozování. Stejně jako prahové hodnoty napětí, pod kterými poškozování nevzniká, existuje i kritická velikost exponovaných objemů materiálu pro jeho rozvoj poškození. Obě veličiny spolu souvisejí vazbou $(\sigma \sqrt{d})_{kr} = \text{konst.}$ U strukturně malých trhlin jde o velikost strukturních elementů, u fyzikálně malých trhlin o tloušťku povrchové vrstvy materiálu těles a u velkých trhlin o rozměr procesní zóny na jejich čele, u formování lomu o velikost tělesa.

- 3) Důležitá je etapa vzniku únavových trhlin. Každý technologický či konstrukční vrub je otupen a jeho kořen není na počátku provozu poškozen. Přeměna objemu materiálu na strukturně malou únavovou trhlínu vyžaduje určitý počet cyklů namáhání N_0 . Jde o složité lokální dislokační procesy. Jejich výsledek lze vystihnout makroskopicky lokálním cyklickým zpevňováním, změnou hysterese smyčky mezi amplitudou napětí a deformace. Po nastavení setrvačné smyčky a jejím opakování po N_0 cyklech se objeví v exponovaném objemu únavové trhlínky. Tento proces lze přibližně popsat amplitudou celkové deformace $\varepsilon_a = (\varepsilon_{ael} + \varepsilon_{apl})$, určující cyklickou tažnost materiálu. Obě veličiny jsou svázány přibližnou závislostí

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_a^*} \right) = \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_a^*} \right)^{n^*}, \text{ kde } n^* \text{ je exponent cyklického zpevnění.}$$

Protože ve většině případech jsou konstrukce v provozu namáhány tak, že plastické deformace jsou velmi lokalizovány a převažující okolní objemy jsou elastické, mluvíme o výrazně tuhém deformačním cyklu. Počet cyklů do vzniku únavových trhlin nelze odvozovat z modelů cyklického tečení (typu Manson-Coffin), ale využitím modelů uvedeného cyklického zpevnění při převažující elastické složce celkové amplitudy přetvoření. To znamená, že počet cyklů N_0 je značný a při nasycené hysterese smyčce jsou počáteční a poslední cykly nepodstatné. Z toho plyne pro hledaný počet změn namáhání přibližně:

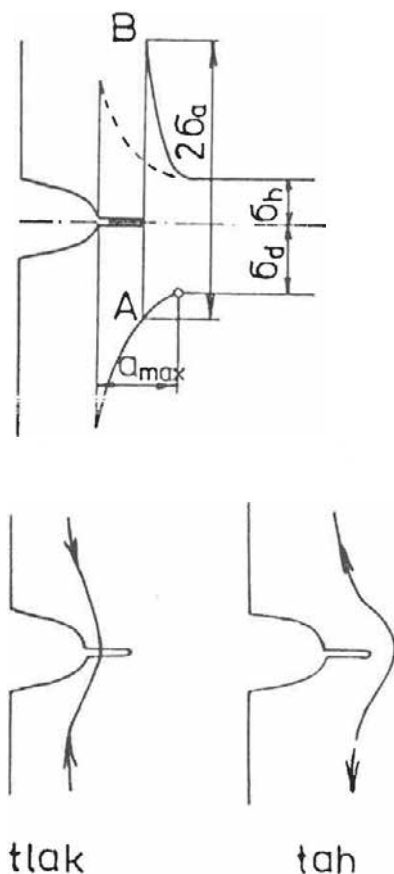
$$N_0 \approx \left[\frac{1}{k_{ef}} \frac{\sigma_a^*}{\sigma_a} \right]^{\frac{1+n^*}{n^*}}, \quad (2)$$

kde k_{ef} představuje počáteční koncentraci napětí v místě poškozování tělesa. U většiny uhlíkových konstrukčních ocelí je $\sigma_a^* \approx 10^3$ MPa a exponenty zpevnění leží v mezích 0,17 až 0,2. Z toho plyne počet cyklů do vzniku únavových malých trhlin:

$$N_0 \approx \left(\frac{10^3}{k_{ef} \sigma_a} \right)^6 \text{ až } \left(\frac{10^3}{k_{ef} \sigma_a} \right)^7$$

Na příklad pro amplitudu nominálního napětí 100 MPa a počáteční efektivní koncentraci $k_{ef} = 2$ (což odpovídá kvalitně provedené konstrukci), vychází počáteční počet cyklů v rozmezí 10^4 až 10^5 cyklů namáhání. To je ovšem jen první fáze. K dosažení růstuschopné únavové trhliny je třeba připočítat rozvoj fyzikálně malých trhlin v povrchové vrstvě materiálu, což je pro život těles rozhodující. Z uvedeného plyne jednoznačně velký efekt počáteční koncentrace napětí. V reálných koncentracích je nutné se vznikem únavových trhlin prakticky vždy počítat. Většina z nich se však při uvažované hladině rozkmitu napětí zastaví a život konstrukce neovlivní. Čím vyšší je počáteční koncentrace napětí, tím větší je gradient napětí od kořene vrubu a tím snáze se malé trhliny zastaví.

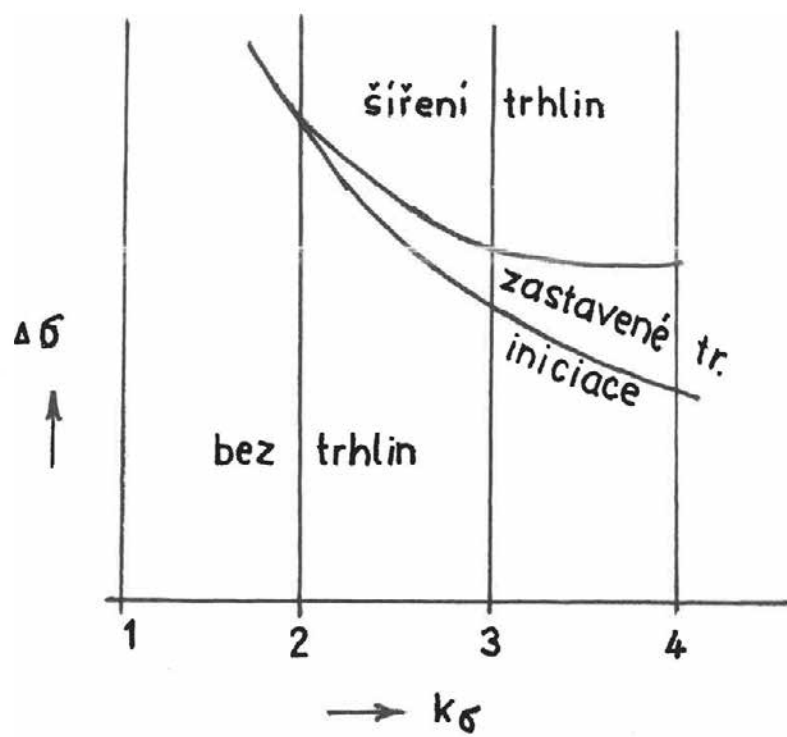
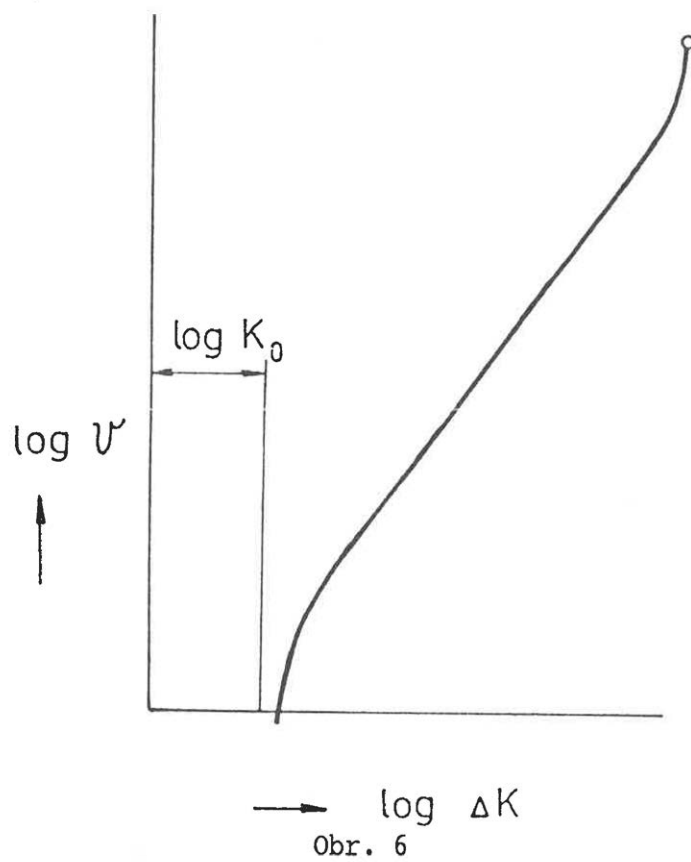
- 4) Rozvoj trhlin do lomu tělesa vykazuje velké rozdíly v jejich průměrné rychlosti až o několik řádů. U malých trhlin po jejich objevení rychlost klesá, neboť se zvyšují bariéry proti jejich šíření. Začíná se uplatňovat zvyšování lokální tvrdosti materiálu cyklickým zpevňováním a rozptylem energie, ukládané v okolí exponovaného objemu materiálu. Současně se vzdalováním od kořene výchozího vrubu se mění povaha cyklu deformace. Ukazuje to schematicky obr. 5. V samém kmene vrubu byla při střídavém napětí rovněž vyvolaná střídavá místní deformace. Po vzniku trhlinky

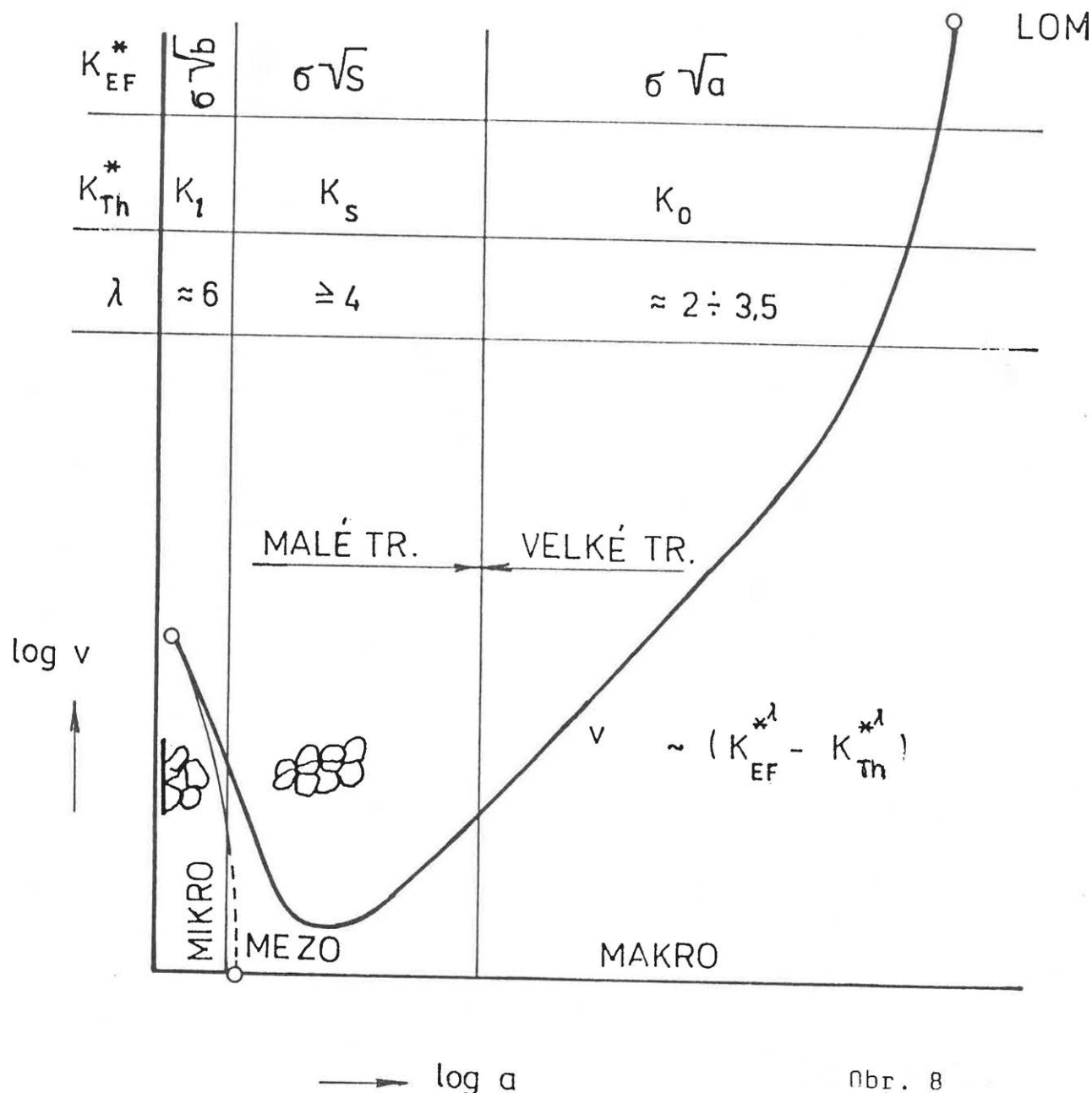


Obr. 5

a oddálení jejího kořene asi do vzdálenosti tří poloměrů vrubu se mění povaha cyklu deformace na opakovanou (míjivou), i když vnější síla se mění střídavě, neboť v tlakové polovině cyklu líce trhliny na sebe dolehnou a zprostředkují silový tok, který v této polovině cyklu namáhání neobtéká čelo trhliny, ale čelo výchozího vrubu. Tím relativně klesne amplituda deformace. Trhlina se postupně dostává do menšího místního napětí tak, jak odpovídá gradientu napětí v okolí vrubu. Kromě toho opouští trhlina nejslabší místo povrchu kořene vrubu, který je obvykle technologicky nejméně kvalitní. V pohybu přes povrchovou vrstvu materiálu tělesa dosahuje rychlost trhliny minima. Proniká dovnitř tělesa, kde je odolnost materiálu vyšší. Slabost povrchové vrstvy záleží na typu struktury a složení materiálu, na technologických podmínkách tělesa. Povrchová vrstva materiálu vykazuje nejnížší mez kluzu (u přírodního povrchu až polovinu meze kluzu uvnitř tělesa), má nejvíce narušené vazby povrchových zrn, nejmenší modul pružnosti a je vystavena největšímu zbytkovému vlastnímu pnutí v tahu. V některých případech je ocel v této vrstvě vlivem výroby tělesa oduhličena. Tloušťka povrchové vrstvy je různá podle technologie a tvrdosti materiálu. Obvykle u konstrukčních uhlíkových ocelí má tloušťku od 0,2 do 1,5 mm. Po rozšíření trhlín do hloubky tělesa se uplatňují bariéry tlakových vlastních pnutí následně vyvolaných kolem plastické zóny cyklickým namáháním. Tato bariéra záleží na mezi kluzu materiálu a na úrovni cyklického napětí, vyvolaného vnějším zatěžováním. Čím vyšší je cyklické napětí, tím vyšší je vyvolaná bariéra. Ta je v tomto případě velkých trhlín určena prahovým faktorem intenzity napětí podle modelu lomové mechaniky (viz příklad na obr. 6). Malé trhlíny lze zastavovat snadněji než velké trhlíny, které se šíří stoupajícím efektem poškozování na čele trhliny. Tento efekt je určen rozkmitem faktoru intenzity napětí, tj. nominálním napětím od silového toku tělesem. Vznikající bariéra je vždy nižší než hnací energie napjatosti, která se uvolňuje rozvojem vyzrálé trhliny. Jen v případě silného jednorázového přetížení, které vyvolá velkou oblast tlakového předpětí kolem čela trhliny a sevře poškozenou procesní zónu, může dojít k dočasnému zastavení rozvoje velkých trhlín. Jsou to metody autofretážního přetížení u rotujících těles, nebo napětové testy u tlakových nádob a potrubí. Charakteristický průběh rychlosti rozvoje velkých trhlín při stále stejné úrovni rozkmitu $\Delta \sigma$ ukazuje obr. 6. Pod prahovou hodnotou intenzity napětí by se velké trhlíny nešířily. Ve skutečnosti se na přechodu z povrchové vrstvy dovnitř tělesa trhlíny šíří sice malou rychlostí, ale konečnou, pokud dříve nedošlo k jejich zastavení v povrchové vrstvě materiálu těles s ostrými vruby (viz obr. 7). Délka zastavené malé trhliny při určité úrovni rozkmitu napětí může být považována za důležitou charakteristiku oceli. Z lomových parametrů materiálu lze tuto délku přibližně určit. Tak například u náprav motorových lokomotiv, vyrobených z ocele o statické pevnosti 600 MPa a obvyklém provozním chybovém napětí střídavém byla délka zastavených trhlín určena na 0,8 mm v souladu s nálezy. Jedná se o malé trhlíny, které neomezí předpokládaný život náprav. Model rychlosti rozvoje trhlín při stále amplitudě vysokocyklického napětí v ocelovém tělese ukazuje podle těchto úvah obr. 8, kde jsou vyjádřeny základní etapy šíření trhlín a příslušné bariéry při obecně pojatém účinku efektivního faktoru intenzity poškozujícího napětí. Pro různou velikost amplitudy napětí je schema této závislosti na obr. 9. Při poklesu napětí pod σ_0 trhlínky nevznikají. Při úrovni σ_0 sice vzniknou, ale zastaví se, při vyšším napětí se rozvíjejí progresivně až do lomu, který vznikne při dosažení kritického napětí.

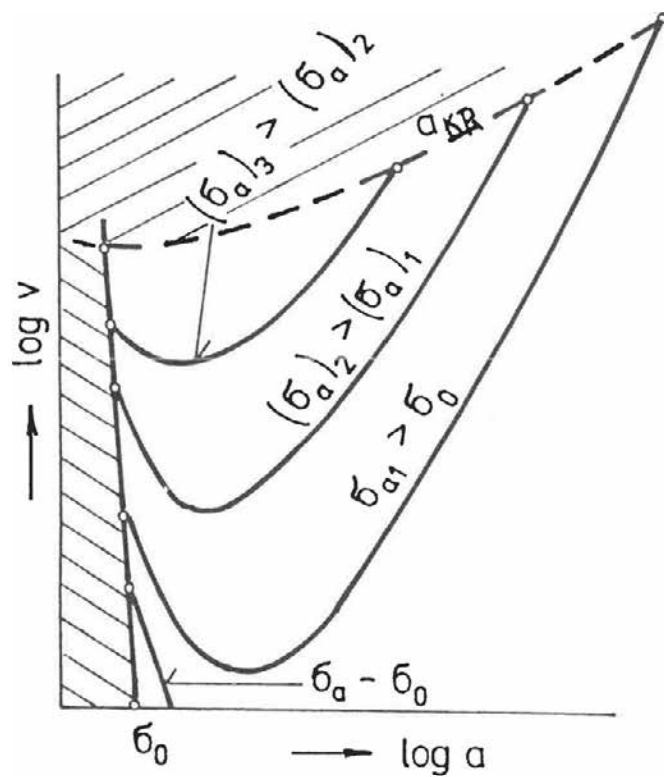
Popsaný rozvoj trhlín, vyvolaný vysokocyklickou únavou, byl ověřen na



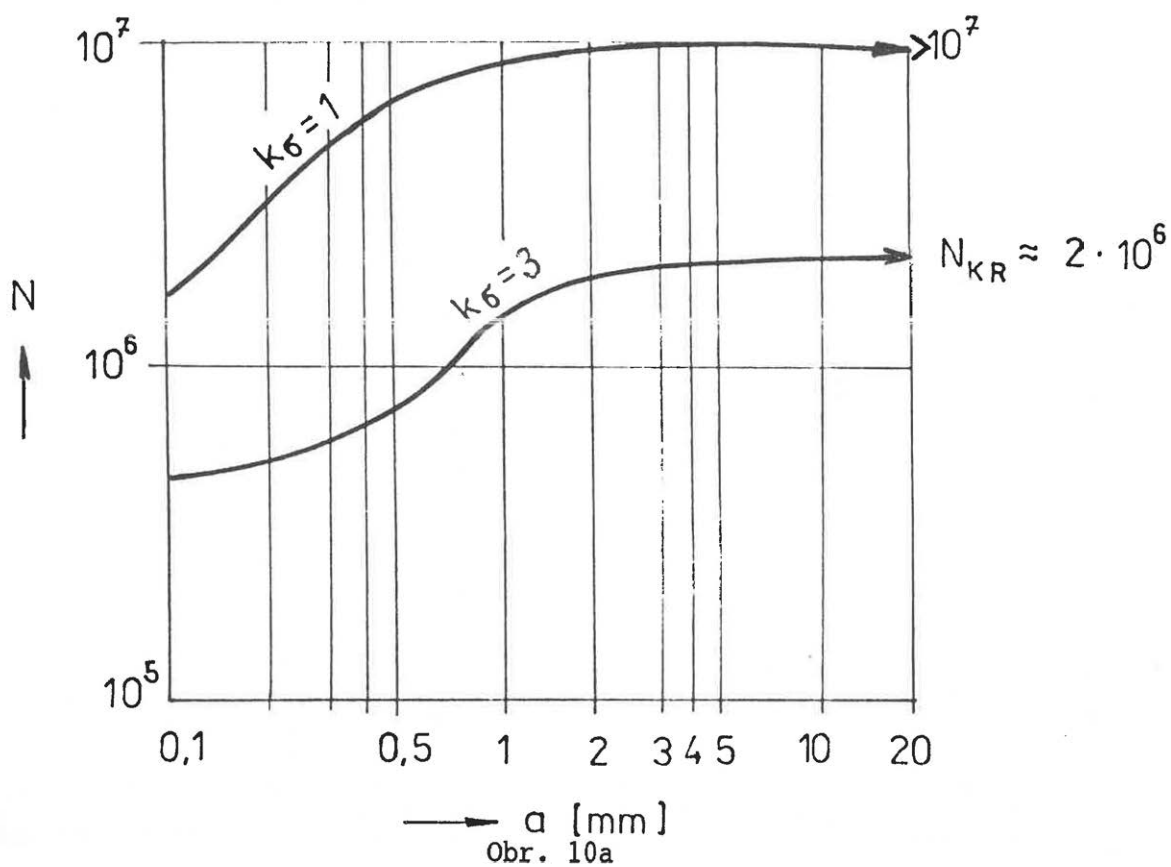


Obr. 8

řadě praktických případů. Patřily k nim nosné konstrukce velkorýpadel, tlakové nádoby, potrubí i některé části strojů. Nejvíce informací poskytly lokomotivní nápravy, protože jich bylo mnoho set kontrolovaných ultrazvukem i prohlídkou. Počet cyklů do vzniku trhliny určité velikosti směrem k ose nápravy ukazuje obr. 9 a to také pro hladký vzorek ocele ($k_g = 1$). Nápravy jsou vystaveny v provozních podmínkách dynamickým účinkům, které zvyšují rozkmit napětí, často dvakrát i více podle stavu tratí a rychlosti jízdy. Přejezdy přes zhlaví, styky kolejnic a v zatáčkách se zvyšuje ohybové namáhání nápravy. Počáteční koncentrace napětí pod okrajem nalisovaného náboje kola lze průměrně ocenit efektivní hodnotou na povrchu čepu asi na trojnásobek. Derivací vztahu délky trhlin a počtu otáček kol dostaneme průměrnou rychlost šíření trhlin. Je to znázorněno na obr. 10. Exterpolace k malým trhlinám je provedena ve smyslu předešlých úvah, stejně tak je početně vyznačen pravděpodobný průběh křivek pro různou amplitudu napětí. Z hodnot rychlosti šíření trhlin a hodnot kritické délky trhlin je možno

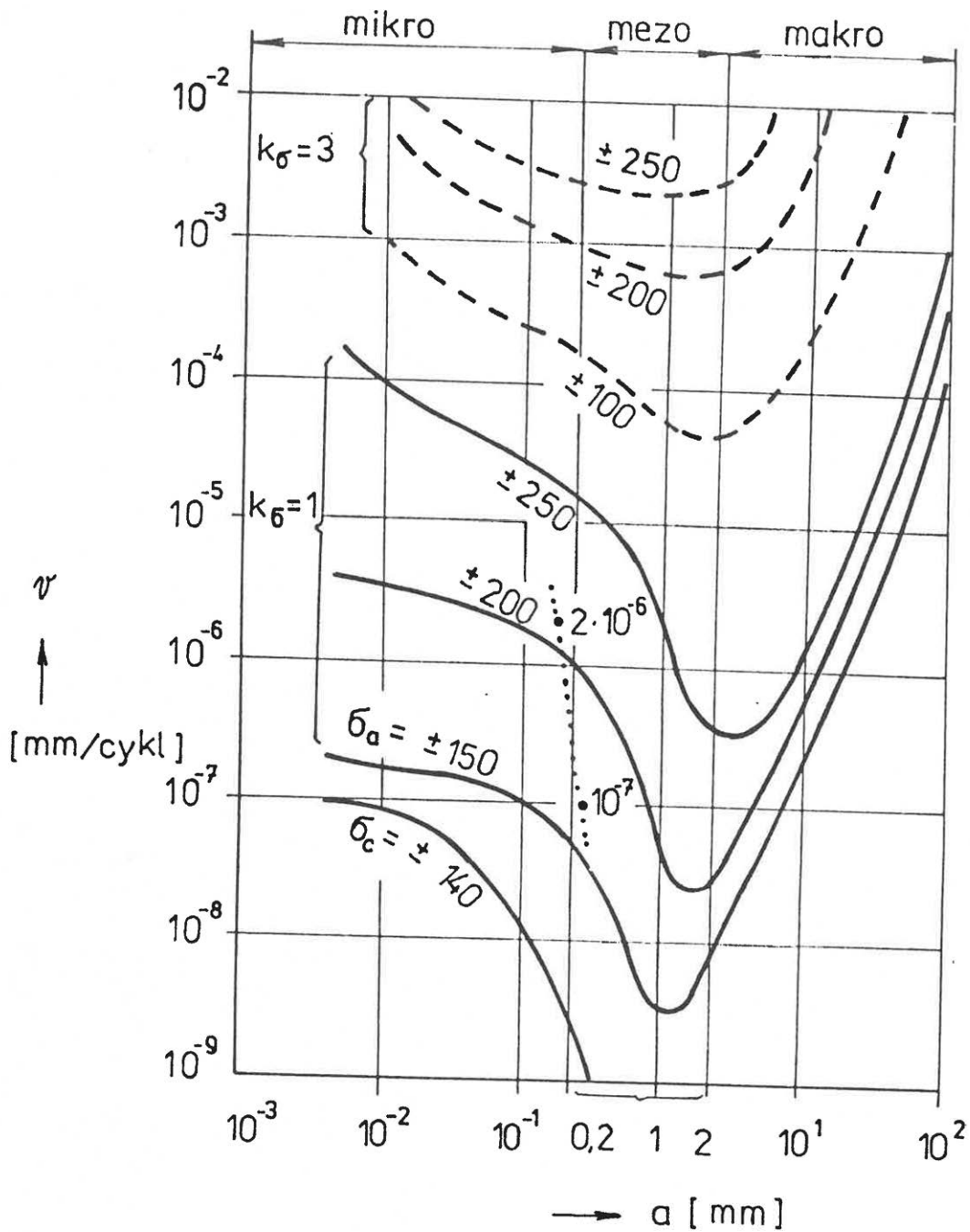


Obr. 9



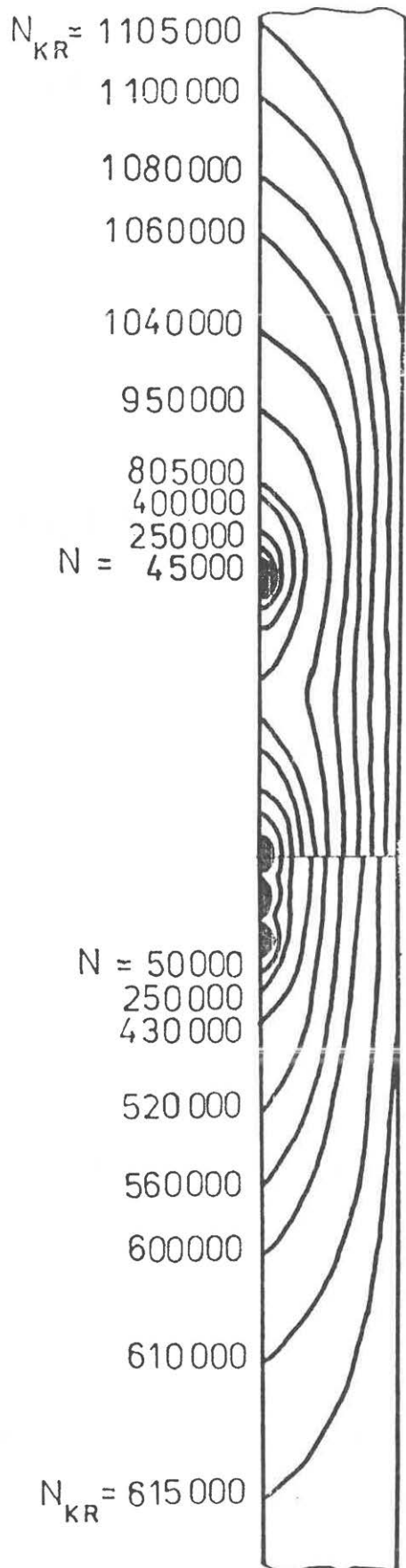
Obr. 10a

$$R_e \approx 280[\text{MPa}]$$



Obr. 10b

teoreticky najít Wöhlerovy křivky. Takto odvozený charakter Wöhlerových křivek celkem dobře souhlasí se zkušenostmi pro hladké tyče a reálná tělesa s vruby. V minulosti bylo hledáno vysvětlení k rozdílu mezi počáteční teoretickou koncentrací napětí k_σ a poměrným snížením meze únavy těles. Změny rychlosti rozvoje trhlin od kořene vrubu až do lomu tělesa tento rozdíl jednoznačně vysvětlují. Nejde ani tak o lokální plasticitu v kořeni vrubu, která zvětšuje poloměr zakřivení vrubu a snižuje špičku napětí ve



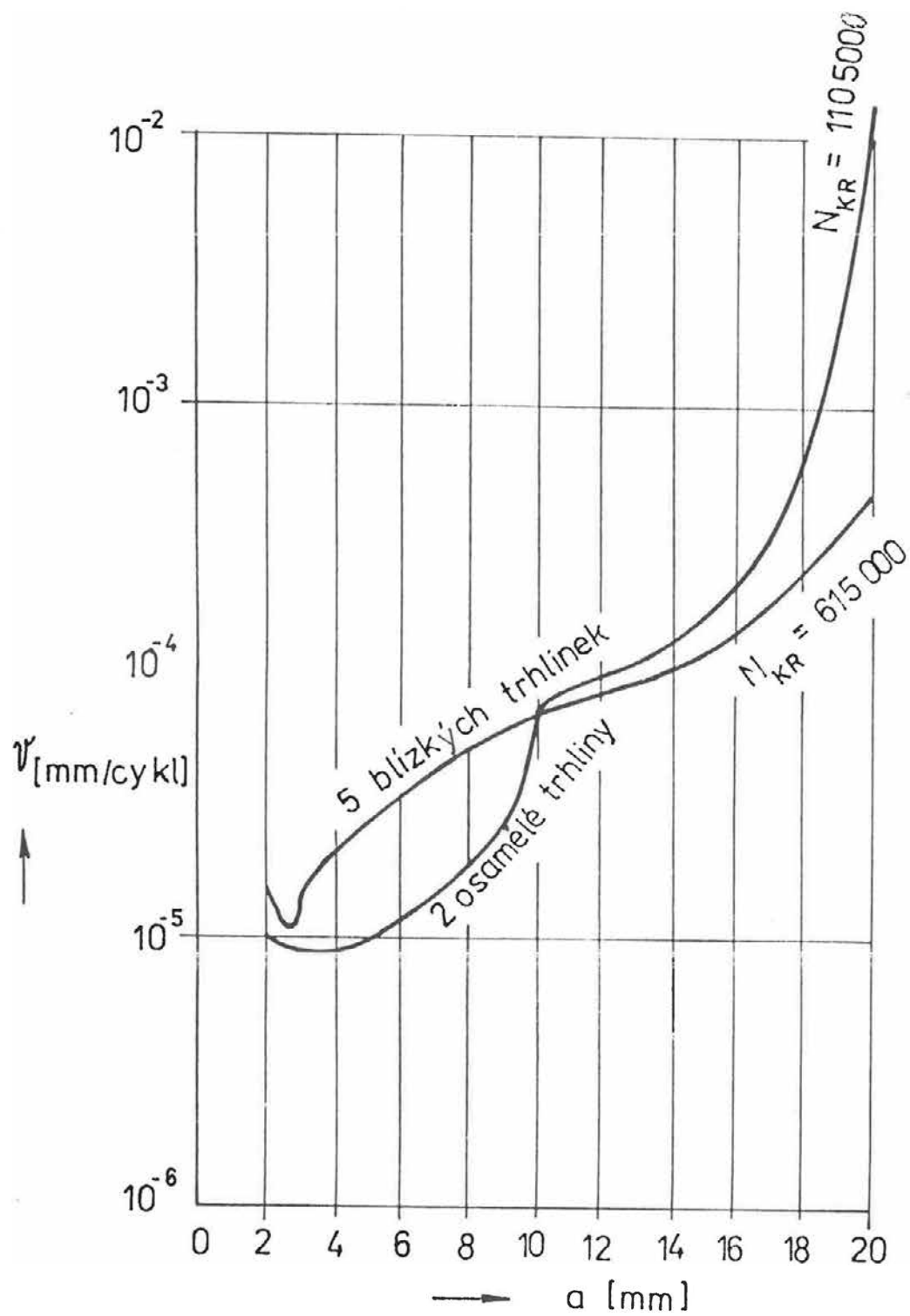
srovnání s elastickým stavem, ale především o změny rychlosti trhlin v oblasti vrubu a ve větší vzdálenosti od jeho kořene. Čím delší etapa je vyplněna šířením velké trhliny, tím méně se počáteční efekt vrubu uplatňuje v životě tělesa. Uvedené křivky rychlosti umožňují také odvodit poměry života konstrukcí s různými počátečními koncentracemi napětí k životu vzorků materiálu bez vrubů. Změny v životě těles jsou důležitější než rozdíly ve velikosti mezi únavy. Vystupuje zde plasticky nejen tvar, ale i velikost tělesa. Klasická představa o vrubové citlivosti materiálu ztrácí smysl.

Případy únavových lomů a trhlin náprav lokomotiv přinesly řadu poznatků, kromě potvrzení uvedených úvah. Vysoká dynamická přetížení a občasné rázové zatížení mění tvar čela trhlin. Nacházíme odlišnost na iraktografickém obraze lomů. Místo typického rozvoje ze všech povrchových zdrojů dovnitř nápravy (chyb za rotace), se vyvíjejí jednostranné lomy a zřetelně zvyšuje rychlost makrotrhliny. Je až o řád zkrácena životnost náprav. Efekt válečkování povrchu náprav je pro dostatečnou životnost zcela zásadní. Více než kolísání amplitud napětí má na životnost vliv technologie povrchu čepů a způsoby nalisování náboje kol.

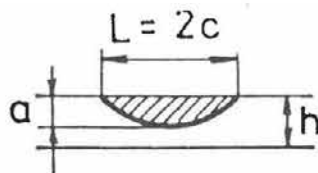
5) Vliv svarových spojů na únavovou životnost konstrukcí je zásadní. Převážná většina únavových trhlin vzniká ve svarových spojkách, protože je zde nehomogenní struktura snížené bariéry proti počátečnímu rozvoji únavových trhlin. Převýšené svarové závěrečné housenky, většinou ostře nasazené, neprovařené kořeny svarů a studené spoje jsou koncentrace napětí převyšující většinou trojnásobné hodnoty k_{σ} . Ve svarových spojkách jsou shluky nečistot, inkluze a působí zde zbytkové vlastní pnutí II druhu, takže vzniká v počátečních fázích rozvoje složitý průběh systému trhlin (jak bylo uvedeno na obr.2). Závažnou skutečností je spojování počátečních trhlin. Před časem jsme byli nuceni ocenit životnost svařovaného mostu v městské dopravě tramvajové. Šlo o svařovaný železný most, uplatněný v normálním provozu z nedostatku jiných řešení. Protože použitý materiál měl zvýšenou mez kluzu a složení ukazovalo na možný výskyt počátečních trhlin v kořeni koutových svarů, předpokládali jsme osamělé trhliny o hloubce asi 1 mm. Výpočet dával životnost asi 7 let.

Most byl provozován 5,5 let. Proto byla navržena kontrola ohrožených míst s největším tahovým nominálním napětím ve svarech spojujících pásnice mostu s přeplátovanými styčnými deskami. Tloušťka stěny v exponované oblasti byla 20 mm. Kritická délka trhliny v letním období byla očekávaná větší než 200 mm. Po několika měsíční kontrole se náhle objevily trhliny o délce téměř 50 mm, které prošly u svarů na vnější povrch konstrukce. K vysvětlení zkrácení života došlo po fraktografickém ověření. Ukázalo se, že v počátečním stádiu šlo o řadu malých technologických trhlin v kořeni svarů, které byly tak blízké, že se brzy propojily a vytvořily jiný tvar čela trhliny, než předpokládá teorie lomové mechaniky pro osamělou trhlínu. To zkrátilo život konstrukce. Tento efekt ukazuje obr. 11. Pro 5 blízkých trhlin a dvě vzdálenější trhliny jsou rychlosti rozvoje vyjádřeny podle obr. 11 na obr. 12. Z uvedeného plyne důležitost tvaru čel únavových trhlin. Tak např. u tlakových potrubí a válcových nádob mohou vznikat poměrně dlouhé trhliny na povrchu s relativně malou hloubkou. Poměr poloos eliptických trhlin je závažný, neboť součinitel ve faktoru intenzity napětí je na tvar čela trhlin velmi citlivý. Záleží přitom na tvaru počátečního defektu, na zakřivení stěny a na tenkostěnnosti tělesa (viz obr. 13). Poměr délky a hloubky trhlin je odlišný u svarových spojů a záleží i na účinku vnějšího prostředí (viz příklad na obr. 14). Ve svarových spojkách vzniká vždy interakce vad a slabých míst struktury.

- 6) Vliv korozního prostředí je stále důležitější degradační efekt. Ukázal se u komponent atomových elektráren, u vysokotlakého potrubí tranzitního plynovodu a v dalších praktických případech. Přitom máme na mysli především efekt koroze pod napětím, který má nejvážnější důsledky na život ocelových těles. Plošná nebo důlková koroze se sice často vyskytuje, ale obvykle nevede k havárii v předpokládané délce služby technických děl. Je snáze kontrolovatelná ve srovnání s korozním praskáním. Toto praskání je záluďné a zvláště nebezpečné v kombinaci s cyklickou únavou. Pro iniciaci koroze pod napětím je nezbytná vysoká koncentrace napětí, lépe řečeno určitý minimální faktor intenzity napětí. Ten je dosahován především tím, že v počátečním defektu na povrchu tělesa se začne vyvíjet únavová trhlina cyklickým namáháním. Když doroste určité velikosti a je dosažen potřebný faktor intenzity napětí v kořeni trhliny, začne se měnit povaha vzniku nespojitostí. Nemůže se uplatnit otupování kořene trhliny, který je vlivem agresivního prostředí pronikajícího do kořene "nastřihován" a růst trhliny se urychluje. Protože je likvidována bariéra cyklického zpevnění a otupení kořene trhliny, působí jen bariéra velikosti vznikající volné plochy v tělese a tudíž trhlina se začne bohatě větvit. Čím více větví vznikne, tím pomaleji trhlina prostupuje tloušťkou stěny. Celý systém trhlin se rozvíjí a některé z nich podle velikosti a vzájemné polohy se spojují. Vznikne magistralní nejživější trhlina, která posléze uskuteční lom tělesa. Jde o statickou únavu, protože je zde rozhodujícím parametrem doba působení prostředí (viz obr. 15). Příklad počáteční fáze ukazuje obr. 16. Doba do porušení tělesa je závislá na úrovni napětí v tahu, přičemž tato závislost je výrazná, u uhlíkových ocelí většinou se čtvrtou mocninou. Inkubační perioda je dána výchozí koncentrací napětí, výchozí velikostí trhliny. Koroze pod napětím vyvolává jak kyselé, tak zásadité prostředí. Jednotlivé typy ocelí mají odlišnou citlivost na prostředí.
- 7) Vliv velikosti těles na rychlost poškozování a na povahu závěrečného lomu nelze opominout. Tato známá skutečnost se při analýze poruch v praxi plně potvrzuje. Čím větší je těleso, tím snazší a rychlejší je jeho poškozování

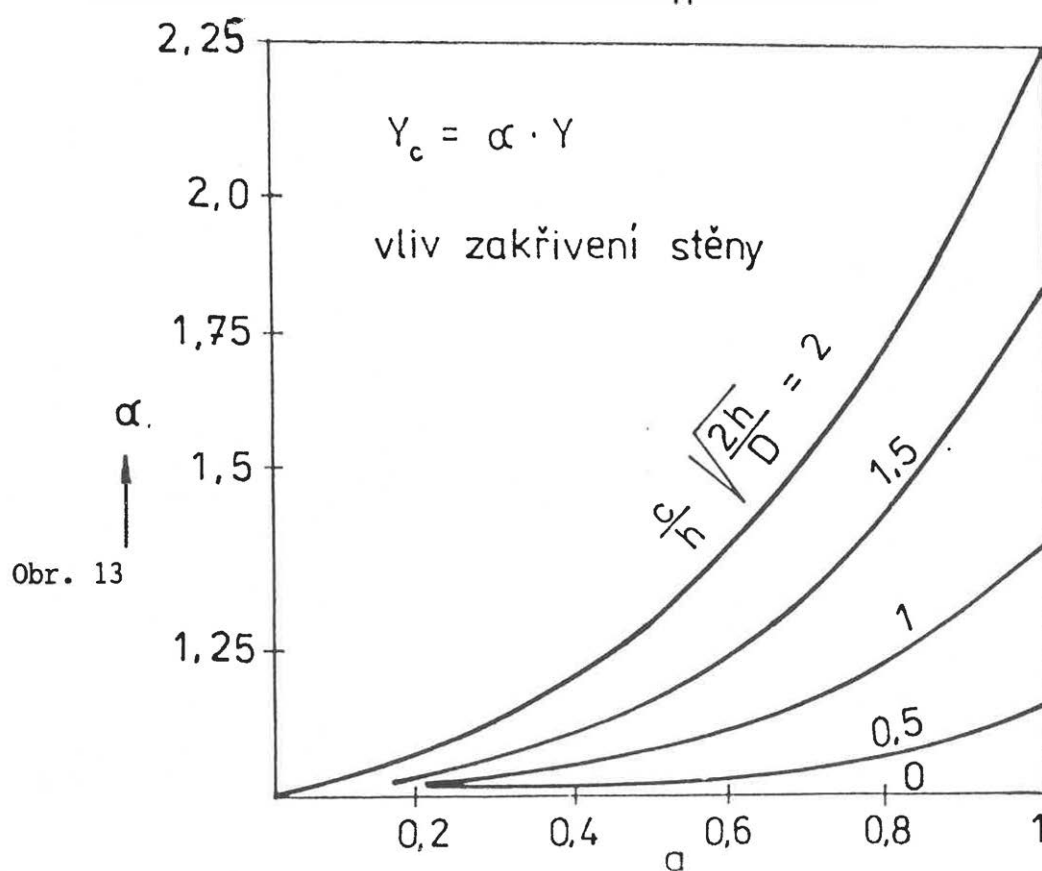
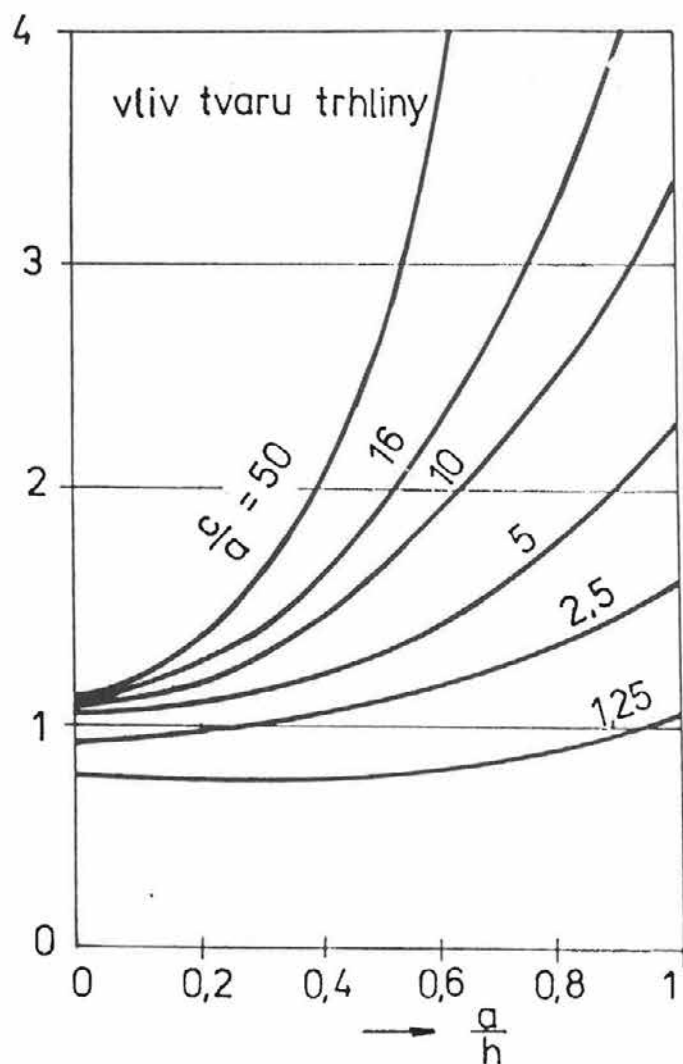


Obr. 12

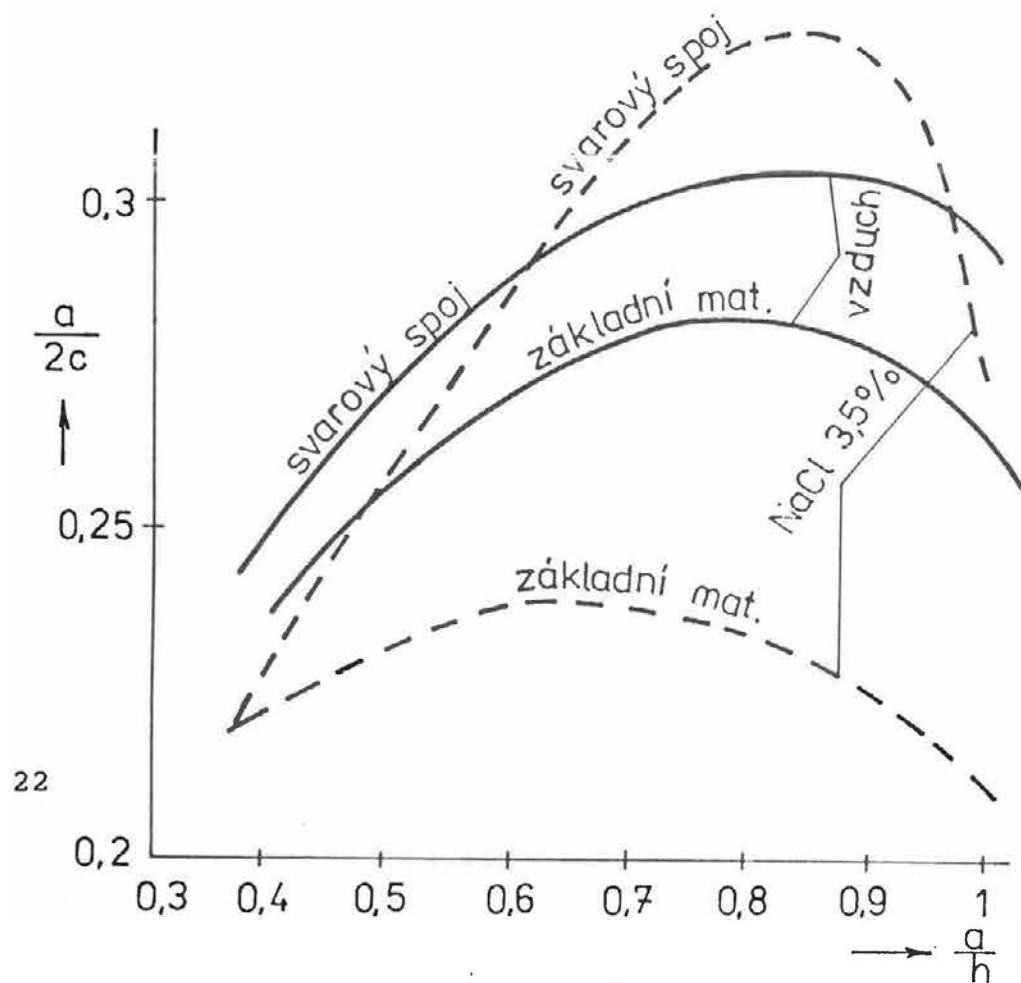
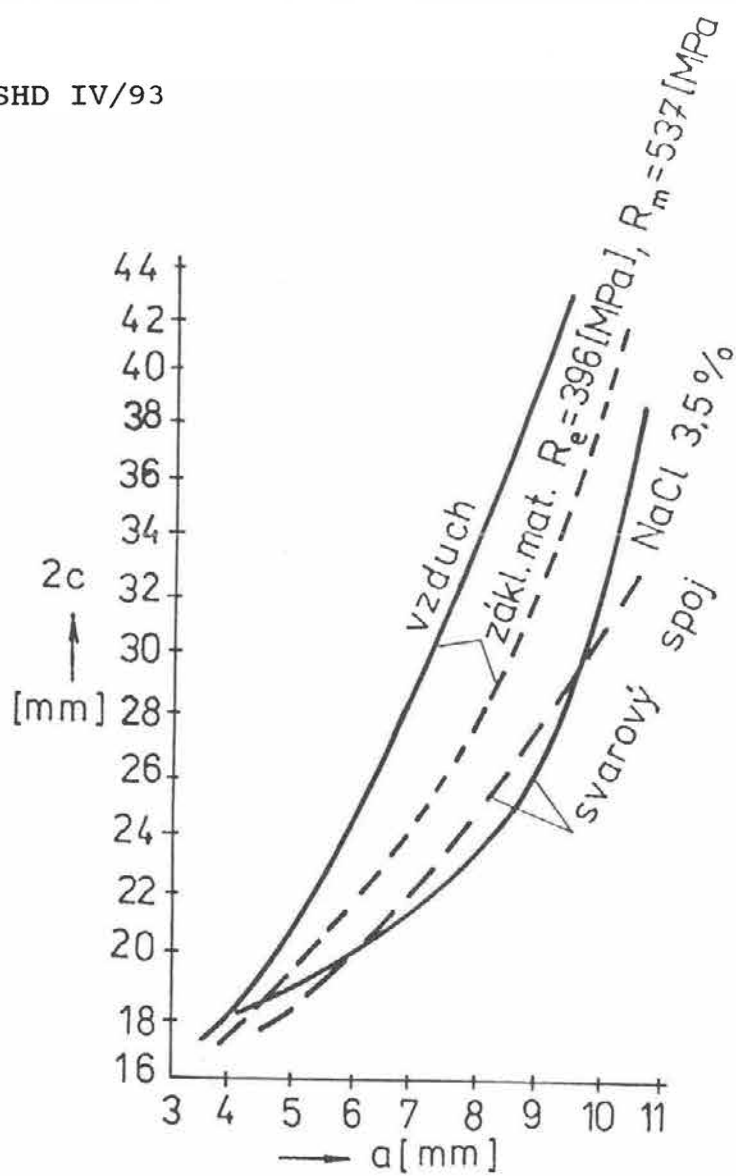


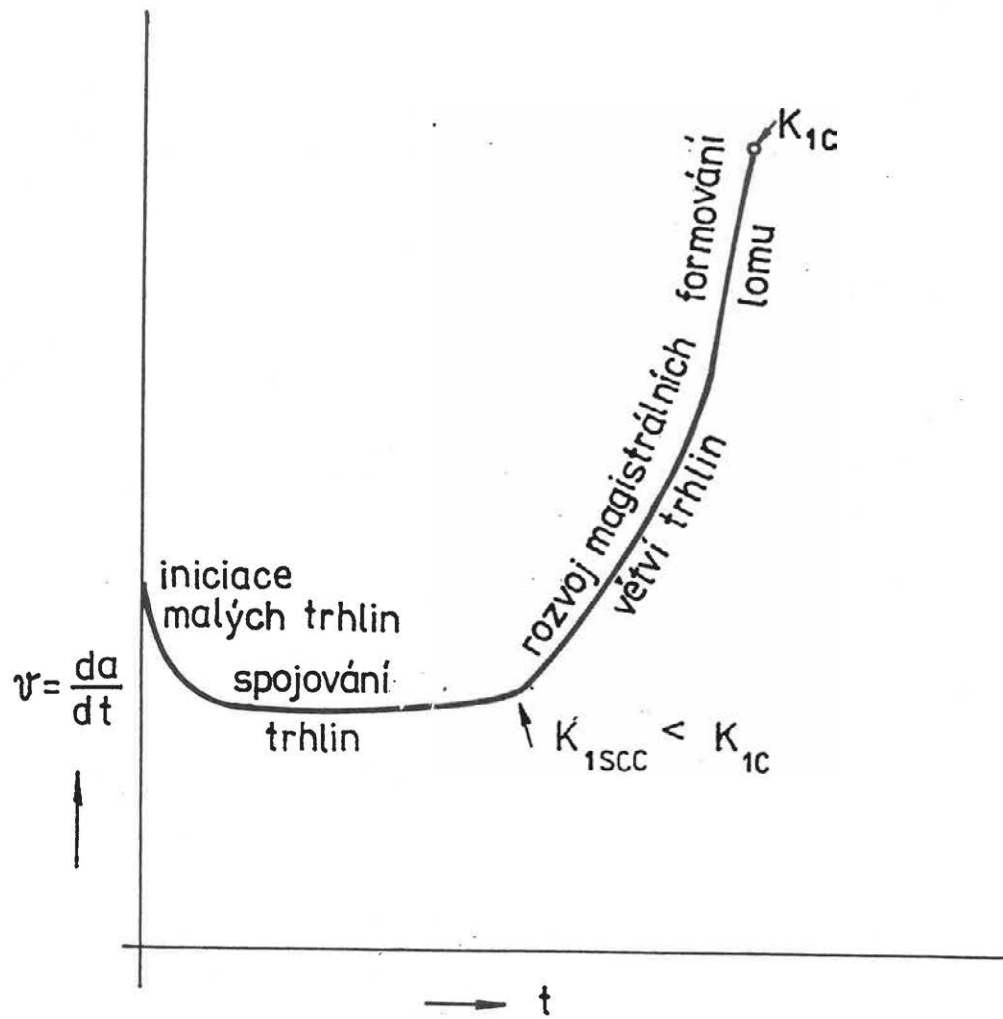
$$\frac{K_1}{\sigma \sqrt{a}} = Y$$

↑

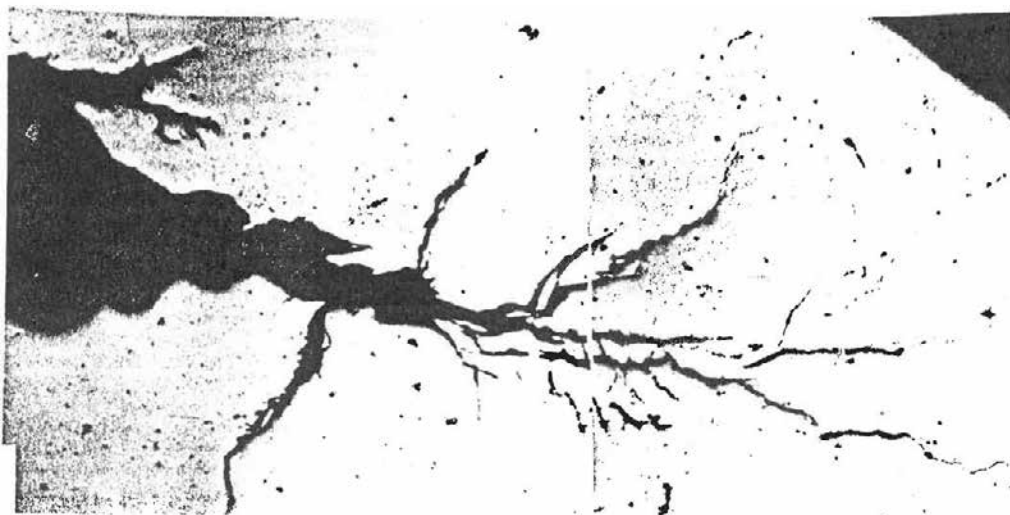


Obr. 13





Obr. 15



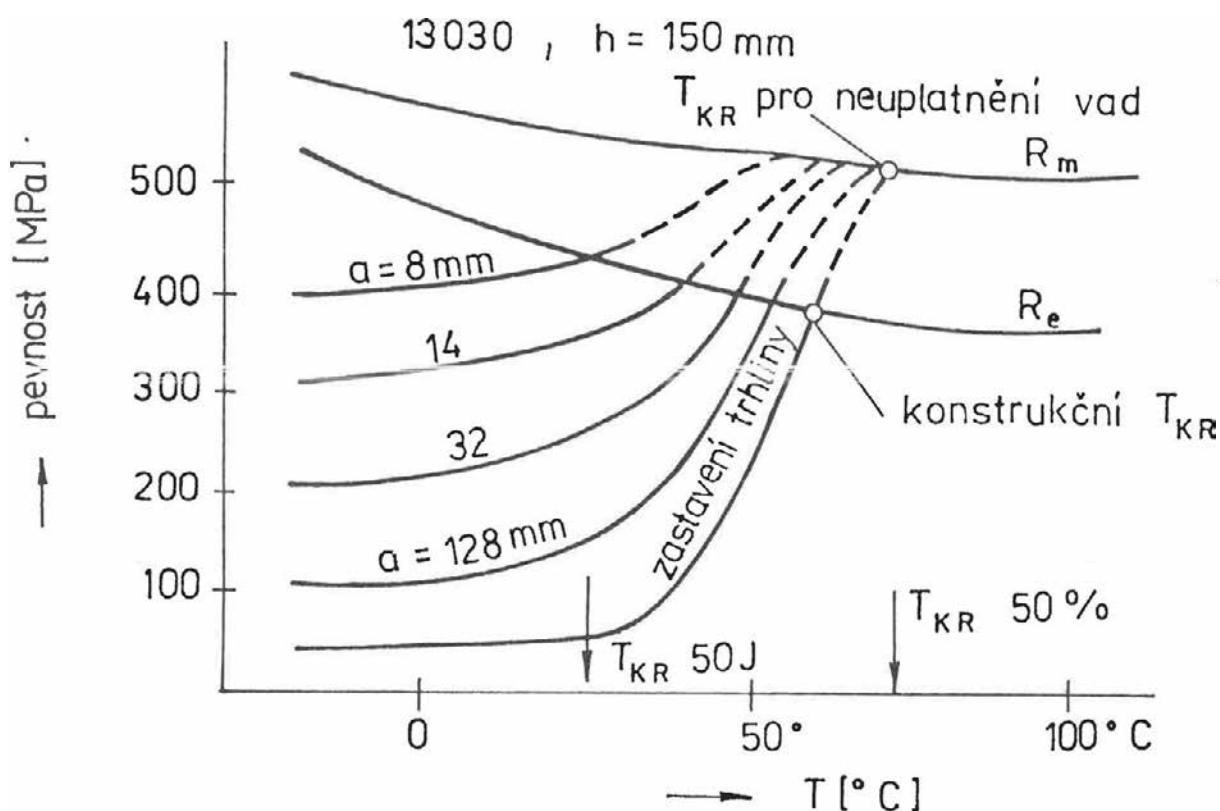
Obr. 16

provozním namáháním. Efekt velikosti v uvedeném smyslu lze vysvětlit několika modely. Tak především jde o polohu přechodové teploty rozdělující lomy tvárné a kvazikřehké. Čím větší je těleso, tím vyšší je tato přechodová teplota. Statická pevnost proto záleží na přechodové teplotě u těles s makro vadami a vruby. Pro různé průřezy prismatických těles z ocele 11 523 je závislost na obr. 17.

Další efekt velikosti souvisí s úrovní v tělese nahromaděné energie elastické napjatosti. Dodávání energie do čela trhliny je rozhodující hnací síla pro pohyb trhlín kvazikřehké povahy. To plyne ze zákonů lomové mechaniky. Z této představy byla odvozena bezrozměrná veličina, kterou lze nazvat konstrukční houževnatost:

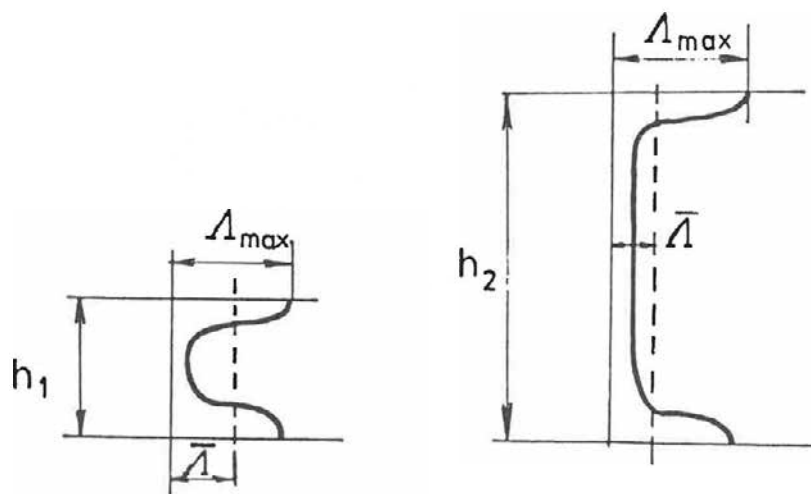
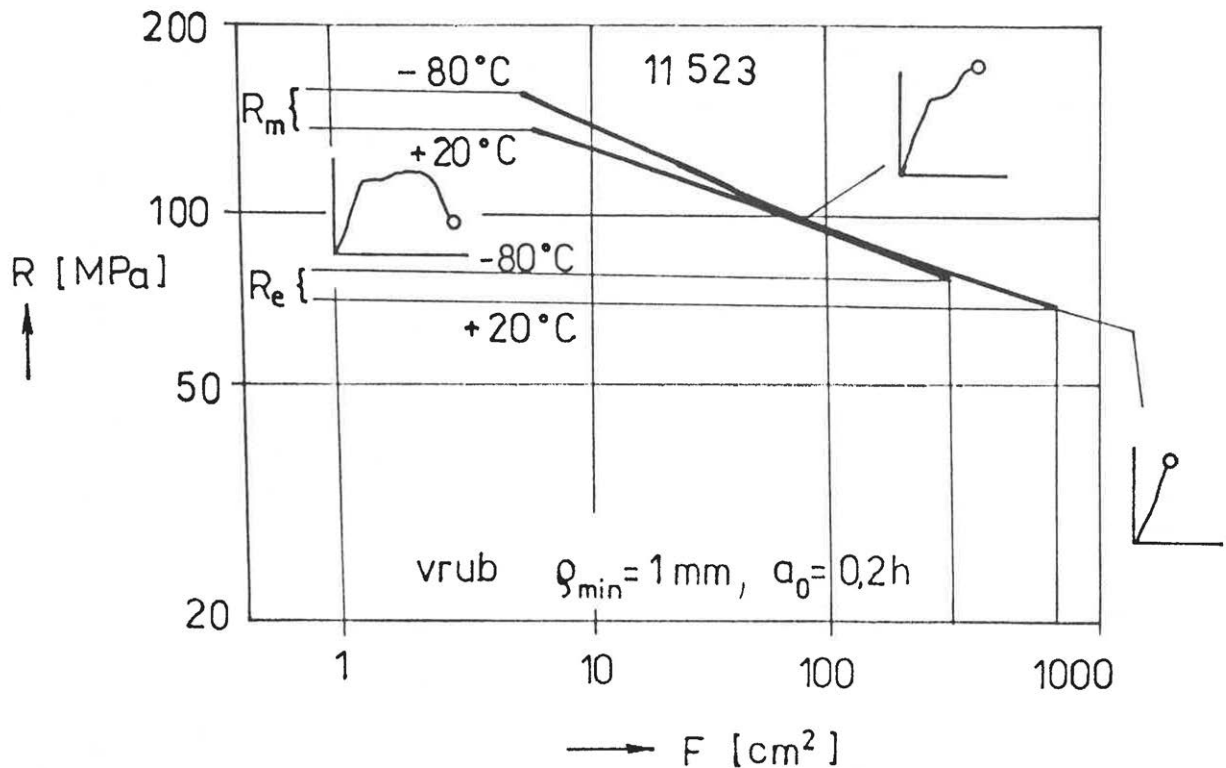
$$\frac{\Lambda_c E}{\sigma^2 L}, \quad (3)$$

kde L je charakteristický rozměr tělesa (např. průměr tlakové válcové nádoby nebo potrubí) a Λ_c je specifická energie pro vznik jednotky nové volné plochy v tělese, závislá u daného materiálu na teplotě. Čím menší je tento faktor, tím snáze vznikne kvazikřehký lom tělesa. Tloušťka stěny těles má vliv na úroveň spotřebované energie na čele prostupující trhliny.



Obr. 17

V tenké povrchové vrstvě, kde je dvojosá napjatost, je největší plastická zóna na čele trhliny. Proto je zde největší odpor proti šíření rychlých trhlin a trhliny jsou bržděny. Uvnitř tělesa je napjatost objemná a velikost plastické zóny na čele trhliny nejmenší. Jestliže hodnotíme poměrný odpor proti šíření rychlé trhliny (postupu rychlého smykového lomu), bude tím snazší porušení tělesa, čím tlustší je jeho stěna (viz obr. 18). Konečně se uplatňuje statistický faktor velikosti, neboť čím je těleso rozměrnější, tím větší je pravděpodobnost výskytu větších a četnějších vad, tím větší je exponovaný povrch tělesa a tím větší jsou místní odchylky od průměrných mechanických vlastností.



Obr. 18

8) Význam provozní diagnostiky

To co bylo řečeno ukazuje na nezbytnost komplexních využití všech experimentálních metod zjišťujících rozvoj lokálních poměrných deformací, procesy šíření defektů a změny geometrie těles v provozu i ve výzkumných laboratořích. Poměrné lokální deformace nám mohou určovat nejenom pole napětí a jeho změny při zatěžování těles, ale také nestability ve vývoji poškození v místech defektů a koncentraci napětí. Informace o rozvoji vad, zejména trhlin, nám podává metoda akustické emise při kombinaci se změnami lokálních deformací. Měření rozměrů těles během zatěžování může ukazovat jak na stav vlastních pnutí a jeho redistribuci, tak na změny silového toku v tělese. Velmi důležité je zjišťování defektoskopického obrazu vad a srovnávání s výchozím stavem. Při rozboru havárií je kromě toho třeba kvalifikovaně uplatnit mikro- a makrofraktografii. V mnoha případech nemáme působící síly a momenty a zde je celá řada metod k jejich přímému a nepřímému zjišťování. Obecně je třeba zaznamenávat všechny vnější účinky na konstrukce, a to jak silové, tak teplotní i vliv agresivity prostředí. Toto monitorování vyžaduje speciální automatizovanou techniku. Velký význam budou mít optické metody včetně laserů pro málo dostupná nebo vzdálenější místa konstrukce.

9) Příklad na poruše výložníku velkorýpadla

Podle sdělení provozovatele byly po několika letech provozu zjištěny trhliny v koutových svarech spojujících pásy "T" profilů, které tvoří nosnou strukturu zavětřovaného výložníkového ramene velkorýpadla. Trhliny byly orientovány kolmo k délce nosníků (kolmo k nominálnímu tahovému napětí a předpokládanému zbytkovému vlastního pnutí) a mají charakter zřejmě únavového typu, vyvolaného šířením původních skrytých trhlin, vzniklých při svařování poměrně silnostěnných pásů. Namáhání výložníkového ramene je ohybové s vyšší statickou složkou od váhy na něm zavěšené konstrukce i zbytkového vlastního pnutí, a přídatnými cyklickými napětími od práce stroje v provozu. Tato cyklická namáhání lze obtížně určit výpočtem, neboť jsou vyvolána prací velkorýpadla v různě složeném terénu a mají povahu stochastickou. Proto byla předběžně určena z rozkmitu konce výložníku použitím laserového měření jeho pohybů. Výložník opisuje eliptickou dráhu, která ukazuje na přednostní namáhání ohybem, ale s přídatným krutem. Největší počet cyklů byl při rozkmitu ± 1 cm ve směru kolmém k ose výložníku. Počet efektivních cyklů je takový, že za rok můžeme namáhání považovat za vysokocyklické při pulzujícím charakteru cyklů. Podle teorie je největší rozkmit asi ± 50 MPa (výjimečně v tvrdé zemině), ale nejvýše 10^2 za rok. Pro mez únavy je podle měření rozhodující rozkmit v nepříznivých podmínkách práce asi ± 30 MPa při $N = 5,5 \cdot 10^6$ cyklů za rok.

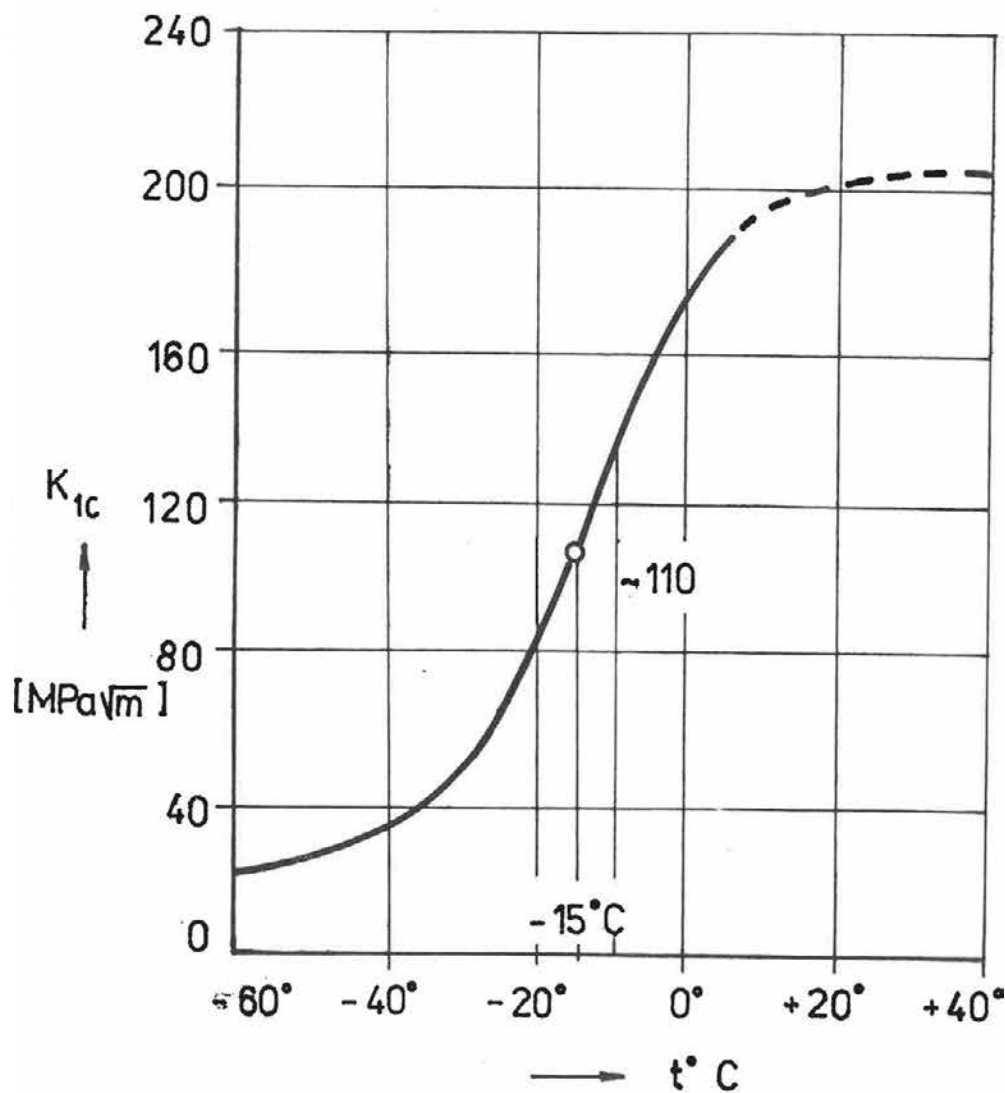
Materiál pásů je konstrukční ocel o pevnosti kolem 480 MPa a mezi kluzu asi 340 MPa s nižším uhlíkem a zvýšeným obsahem manganu. Je zajištěn přiměřený ekvivalent uhlíku pro zabezpečení dobré svařitelnosti. Materiál vykazuje vhodnou čistotu a dobrou strukturu. Mez únavy malého vzorku materiálu namáhaného střídavě tahem-tlakem (při $R = -1$) je přibližně 160 MPa při mezních cyklech namáhání 10^7 . Vlivem velké tloušťky pásnice (50 mm) a účinkem svarového spoje lze odhadnout skutečnou mez únavy při normální teplotě materiálu na 75 MPa, při čemž jsme uvažili i korekci na zvýšení sekundární Wöhlerovy křivky o 20 % vlivem skutečného spektra zatěžování. Podle měření na výložníku, i podle teoretických výpočtů včetně dynamických efektů, vychází střední složka napětí bez zbytkového pnutí asi

110 MPa a amplituda napětí o něco vyšší než ± 30 MPa. Uvážíme-li prahové hodnoty, zavírací napětí, můžeme počítat s efektivní amplitudou $(\sigma_a - \sigma_o) = \pm 30$ MPa. Z toho plyne horní napětí 140 MPa, dolní 80 MPa a charakter cyklů $R = 0,6$. Pro tyto hodnoty lze říci, že bez trhlin ve svarových spojích se v provozu nebudou vyskytovat havárie výložníku stroje.

Pro orientaci byly určeny z hodnoty lomové houževnatosti mezní veličiny trhlin a jejich labilita. Pro zimní provoz při extrémních podmínkách (-15°C ; obr. 19) lze odhadnout lomovou houževnatost $K_{1C} \approx 110 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, prahovou hodnotu pro počáteční rozvoj trhlin asi na $K_{th} \approx 8 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. Tyto hodnoty je nutné ověřit na pokusném svarovém spoji stejné technologie a při stejných svářečích. Z toho plyne:

- a) Kritická velikost trhliny půlkruhového čela (odpovídá tahovému napětí i zkušenosti z vzniklých trhlin) je:

$$\sqrt{a_{KR}} = \left(\frac{1}{Y} \cdot \frac{K_{1C}}{\sigma_h} \right) \approx \frac{1}{1,5} \cdot \frac{110}{140} \rightarrow a_{KR} = 0,27 \text{ m} = 27 \text{ cm}$$

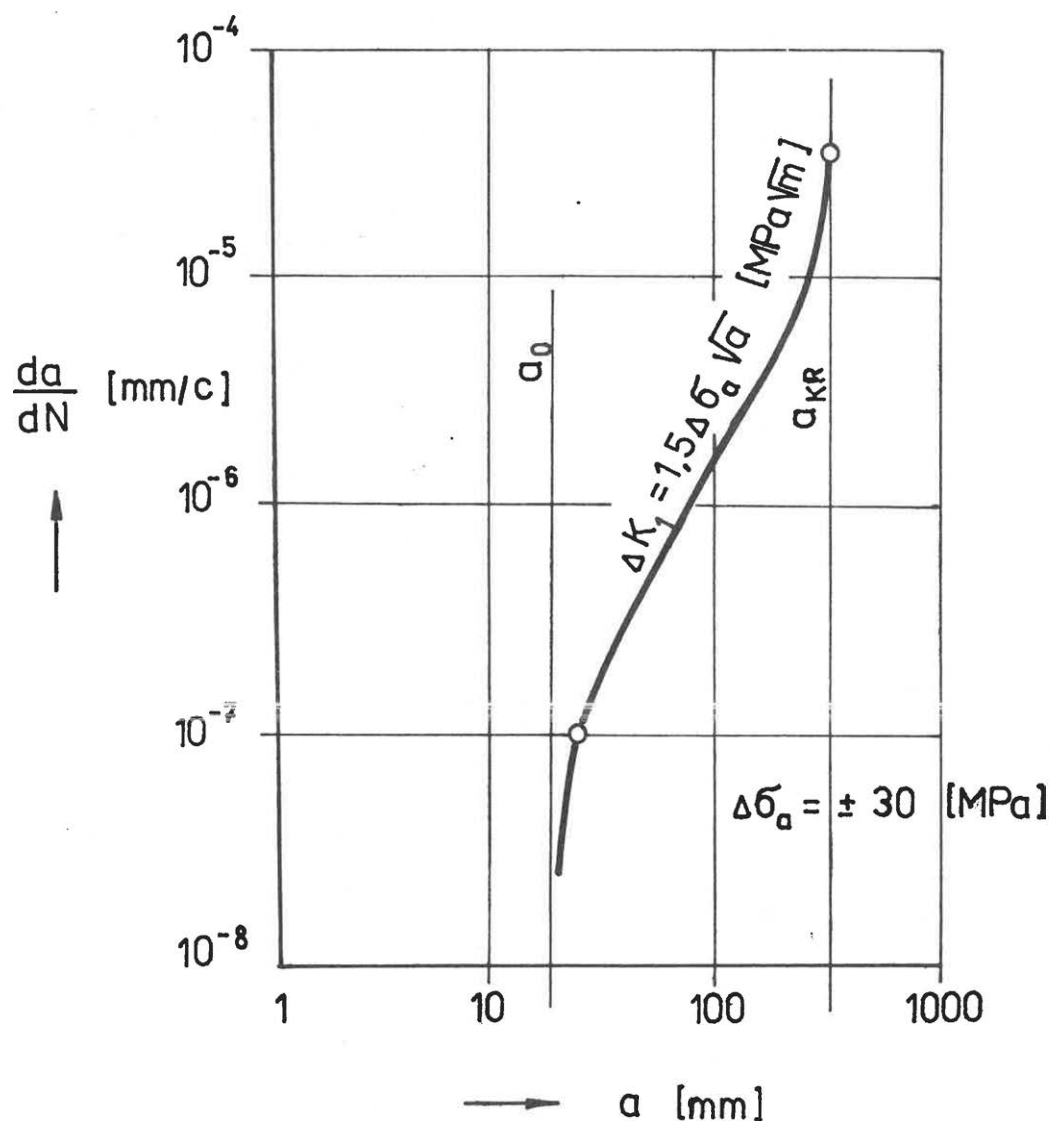


Obr. 19

b) Zastavená trhlina:

$$\sqrt{a_0} = \left(\frac{1}{Y} - \frac{K_{th}}{\sigma_a} \right) \approx \frac{1}{1,5} \cdot \frac{8}{50} \rightarrow a_0 = 0,016 \text{ m} = 16 \text{ mm}.$$

Malé defekty ve svarech jsou tudíž přijatelné, neboť jsou stabilní, pokud není příliš vysoké vlastní pnutí lokální. S většími trhlínami je nutné počítat jako s živými. Rychlost šíření trhlín z výchozích větších počátečních trhlín je pro uvedenou hodnotu efektivního rozkmitu napětí naznačena v obr. 20. Zbytková životnost N je orientační veličina s ohledem na složitost provozních podmínek i neurčitost kvality svarů.



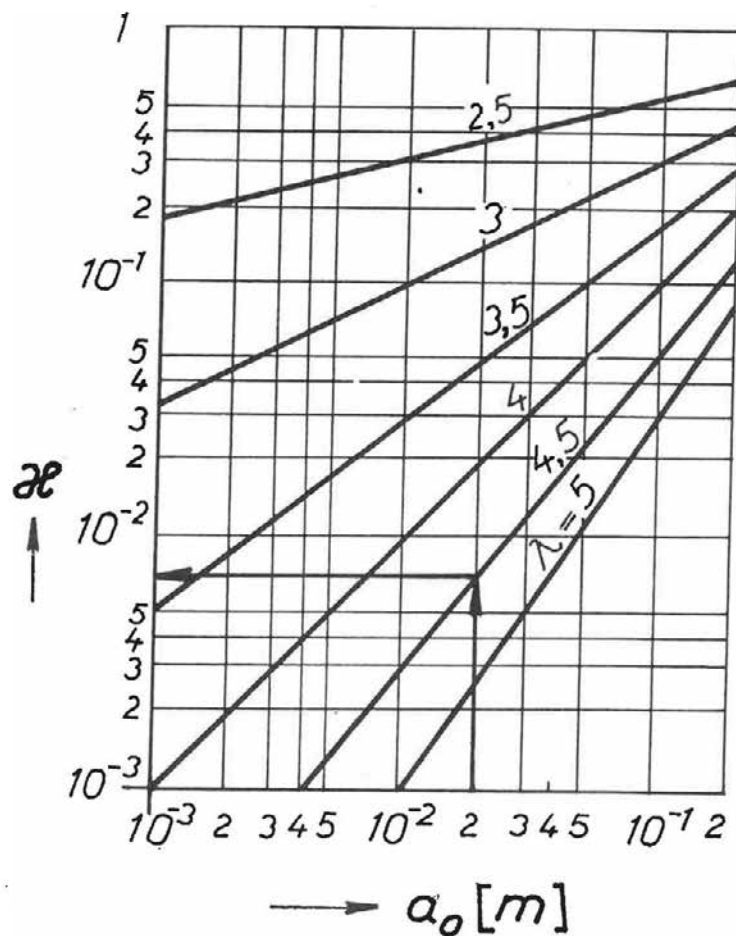
Obr. 20

Pro její stanovení na spodní hladině mohou sloužit diagramy na obr. 21. V obr. 21a se určí hodnota α z výchozí velikosti počáteční trhliny. Pro hodnotu $20 \text{ mm} = 0,02 \text{ m}$ a exponent zákona šíření trhlin makroskopické velikosti u dané oceli $\lambda \approx 4,5$ (maximální hodnota pro zjednodušený zákon růstu velké trhliny) plyne $\alpha \approx 7 \cdot 10^{-3}$. Z diagramu na obr. 21b pak plyne

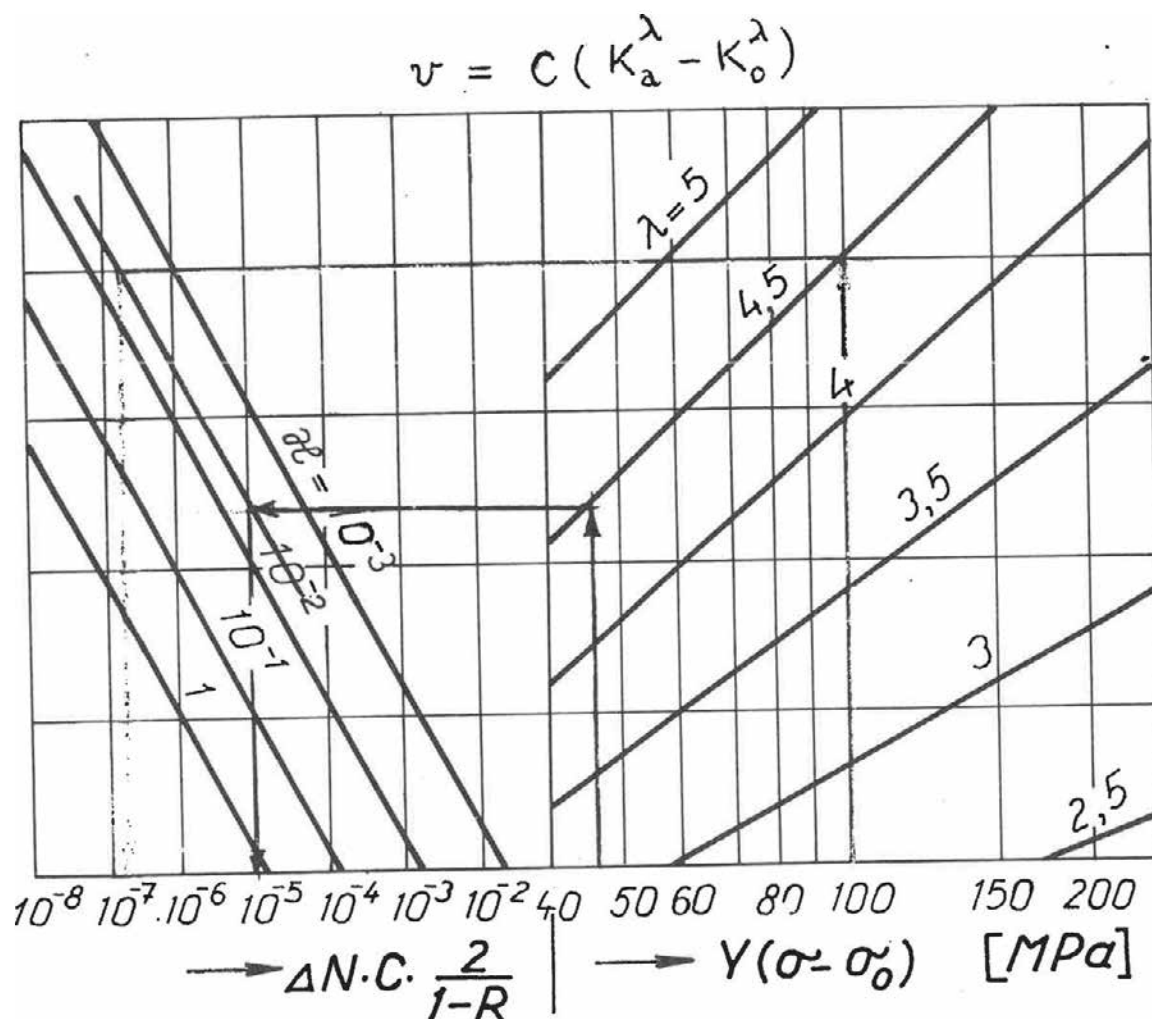
$$\Delta N.C. \frac{2}{1-R} \approx 10^{-5}$$

a pro $R = 0,6$ a materiálovou konstantu zjednodušeného zákona šíření vyvrážděných únavových trhlin $C \approx 10^{-12}$ je zbytková životnost asi

$$\Delta N \approx \frac{1-R}{2} \cdot \frac{10^{-5}}{10^{-12}} = 2 \cdot 10^6$$



Obr. 21a



Obr. 21b

Nadkritické počáteční trhliny by se rozšířily do porušení výložníku poměrně rychle (během několika měsíců). Z toho plyne, že je nutné svary opravit velmi pečlivě a stav výložníku pravidelně kontrolovat (zejména v zimním období). Obecně je nutné v zimě nasazovat stroje na méně náročný provoz, pokud je nebezpečí poškození svarů.

Literatura

- 1) Kol. autorů: Statistické základy pevnosti konstrukcí 2, Academia Praha, 1982.
- 2) Němec J., Drexler J.: Endurance of Mechanical structures, Elsevier 1990.
- 3) Kol. autorů ČKD Praha: Dynamické jevy, namáhání a porušování pojezdu lokomotiv, NADAS Praha, 1986.
- 4) Němec J.: Pevnost a životnost potrubí vysokotlakých tranzitních plynovodů, SNTL Praha, 1989.