



MONITOROVACÍ SYSTÉM BEZPEČNOSTI PREVÁDZKY POTRUBÍ ON-LINE MONITORING THE OPERATION SAFETY ON PIPELINE SECTION

Vladimír Chmelko¹

Key words: on-line monitoring, pipeline, pipe materials

Abstract: Along a transmission gas and oil pipeline there are sections or junctions where sometimes operating conditions vary from the designed conditions. Typically these sections are at the compressor stations, slopes or river, etc.. Calculation of such changes in operating conditions and therefore an actual stress of pipe materials is possible just to a limited extent as considering all such interventions into the operation in the design stage is impossible. The team of experts from the Mechanical Faculty of the Slovak Technical University in Bratislava undertakes a research work focused on calculation of such changes in operation conditions based on monitoring the fatigue damaging on the piping systems exposed to time-varying strain.

1. Úvod

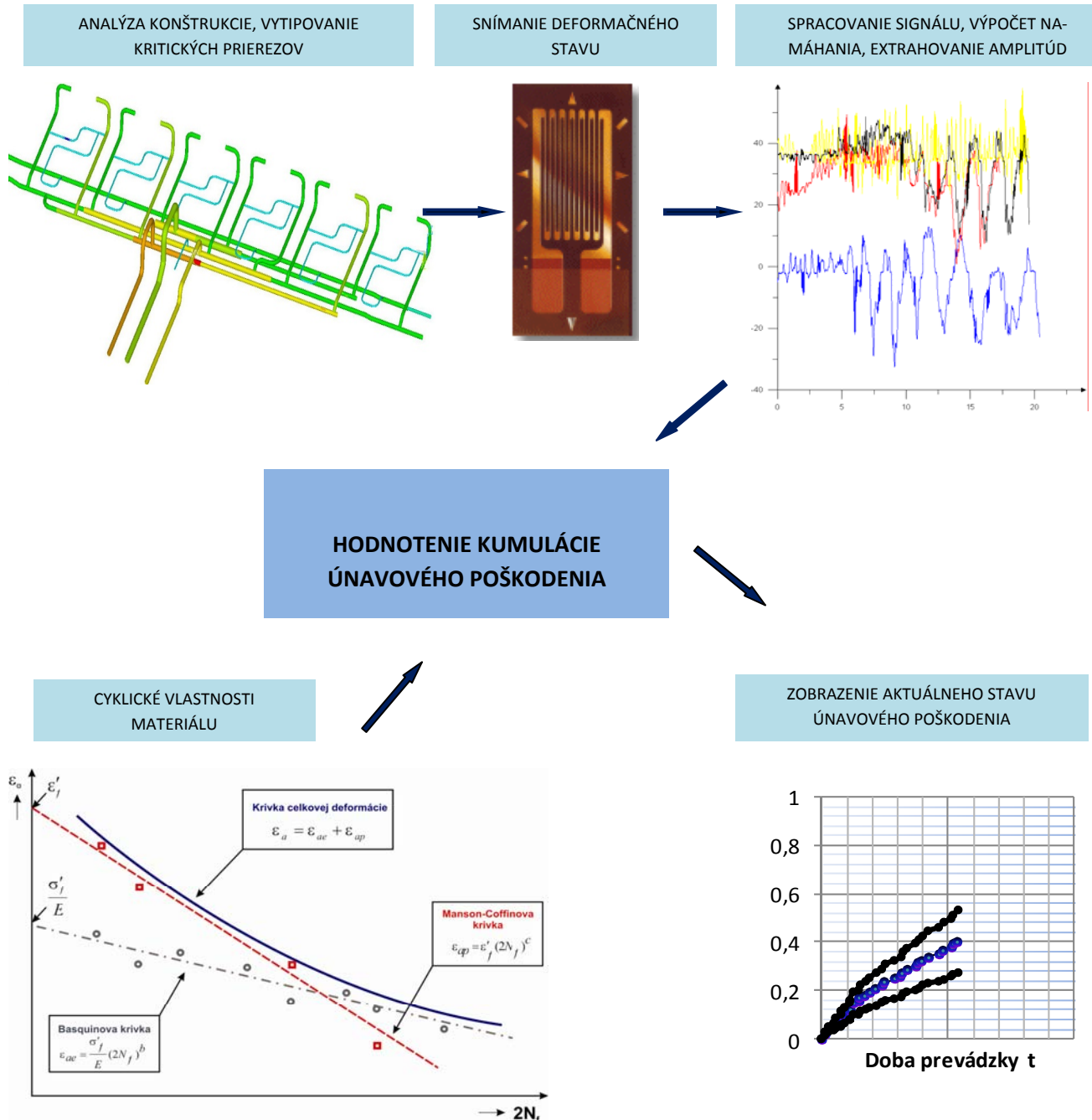
V prevádzke potrubných systémov aj tlakových nádob sa vyskytujú úseky resp. uzly, v ktorých sa niekedy menia prevádzkové podmienky voči pôvodne projektovanému stavu. Takýmito miestami sú napr. prečerpávacie a kompresorové stanice, kde sa vyskytujú rôzne kombinácie aktívnych kompresorov, mnoho technologických zásahov (výmeny podpier, dobudovanie hál, výmena častí potrubí. V prevádzke tlakových nádob a tlakových potrubných systémov sa niekedy vyskytujú tzv. neštandardné situácie, ktorých výpočtové podchytenie a tým posúdenie skutočného namáhania materiálu potrubí je možné len v obmedzenej miere, keďže predvídať mnohé spomenuté zmeny v prevádzke je prakticky nemožné. V minulosti bolo riešených viacerých výskumných úloh, ktorých cieľom bolo posúdiť niektoré neštandardné javy v prevádzke takýchto zariadení pomocou výpočtových modelov, ich výsledky sú však len obtiažne overiteľné. Pokrok v meracej a počítačovej technike ako aj v niektorých výpočtových postupoch hodnotenia bezpečnosti prevádzky dnes umožňuje nasadiť do prevádzky systémy kontinuálneho sledovania (monitorovania) dôležitých fyzikálnych veličín.

V rámci výskumnej úlohy riešil tím pracovníkov Strojníckej fakulty STU v Bratislave monitorovanie únavového poškodenia potrubných systémov, ktoré sú v prevádzke vystavené časovo premenlivému zaťažovaniu. Následkom takejto prevádzky môže byť postupná degradácia materiálu vedúca až k únavovému lomu, ktorý je podľa štatistík stále najčastejšou príčinou havárií kovových konštrukcií.

¹ Vladimír Chmelko, Strojnícka fakulta STU v Bratislave, Ústav aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Námestie slobody 17, 821 31 Bratislava, tel:00421 57296225, vladimir.chmelko@stuba.sk

2. Princíp monitorovania únavového poškodenia

Monitorovanie únavového poškodenia priamo v prevádzke je komplexný problém. Spočíva v priebežnom a nepretržitom sledovaní časového priebehu deformácie vo vytipovaných kritických miestach (opatrených snímačmi deformácie) a hodnotení jej vplyvu na únavovú životnosť materiálu v sledovanom mieste konštrukcie. K tomuto hodnoteniu je navyše potrebné poznať cyklické vlastnosti kritického uzla materiálu (obr. 1). V porovnaní s dnes už bežne používaným monitorovaním vibrácií, alebo aj monitorovaním kvality ovzdušia a iných procesov, je únavové poškodenie náročnejšie na sledovanie in-time, nakoľko meraná veličina (časový priebeh deformácie) sama nie je cieľovou veličinou, ktorá sa porovnáva s dovolenými hodnotami, ale je len jednou zo vstupných veličín do výpočtového hodnotenia kumulácie únavového poškodenia. Jednotlivé kroky a procesy monitorovacieho systému priblížime podobnejšie.



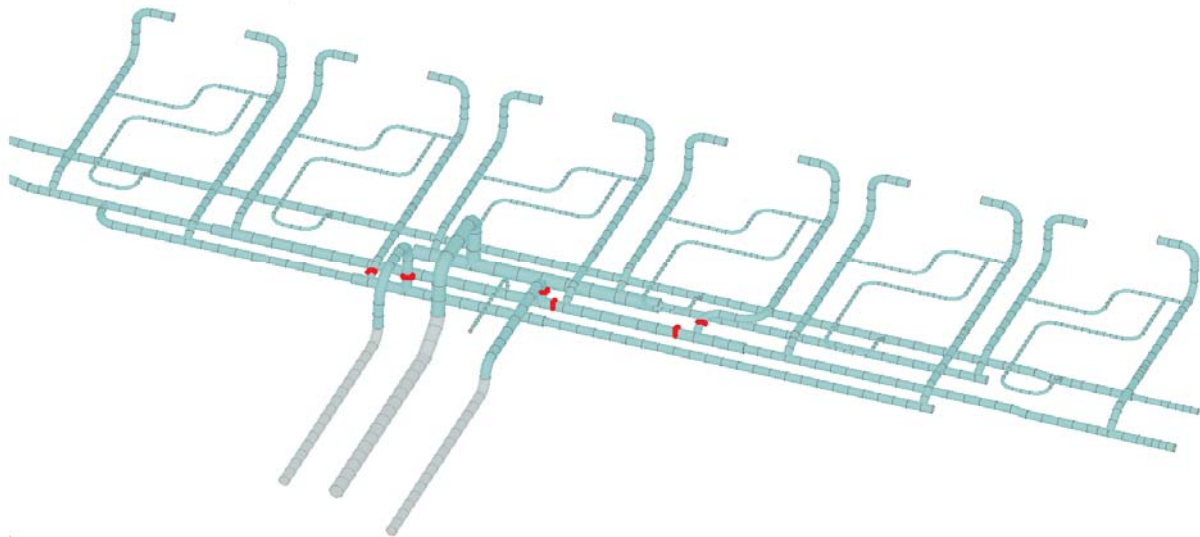
Obr. 1 Schéma monitorovacieho reťazca.

3. Rozbor monitorovacieho reťazca

Jednotlivé kroky a procesy vykonávané pri monitorovaní únavového poškodenia konkrétneho konštrukčného uzla sú schématicky usporiadané do reťazca na obr. 2.

3.1. Analýza konštrukcie

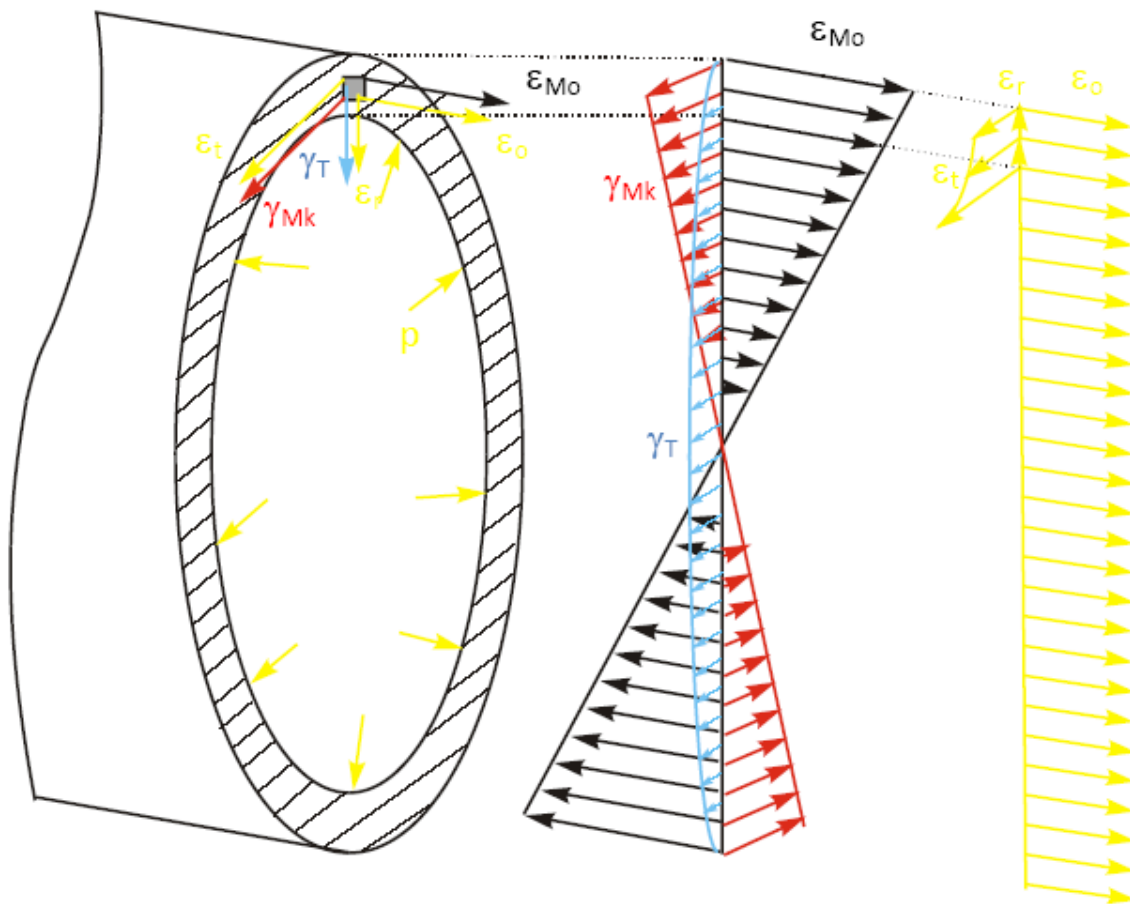
Nie je možné ani účelne sledovať a hodnotiť všetky prierezy konštrukcie. Prvým krokom je preto napätovo-deformačná analýza konštrukcie. Spočíva vo vytvorení čo najvernejšieho matematického modelu konštrukcie, na ktorom možno modelovo sledovať vplyv rôznych prevádzkových stavov – v prípade potrubných dvorov sú to najmä neštandardné stavy typu samobudeného kmitania v slepých odbočkách, otváranie ventilov (hlavne antipumpážneho) a pumpáž kompresora. Verný model musí obsahovať účinky podpier vrátane ich skutočných predpätí a nelineárnych charakteristík, skutočnú geometriu potrubí, ktorá sa nie vo všetkých detailoch zhoduje s dokumentáciou, účinky technologického postupu montáže a vplyv zeminy v podzemných častiach potrubí. Výsledkom sú oblasti konštrukcie s najvyššími hodnotami napätí a deformácií. Takýto komplexný model treba v ďalších krokoch spresniť metódami submodelingu [1]. Na konci takejto analýzy by mali byť známe konkrétne prierezy s najvyšším stupňom namáhania vrátane reálnych vrubových účinkov (obr. 2).



Obr. 2 Kritické prierezy pre nasadenie snímačov monitorovacieho systému.

3.2. Snímanie zaťaženia

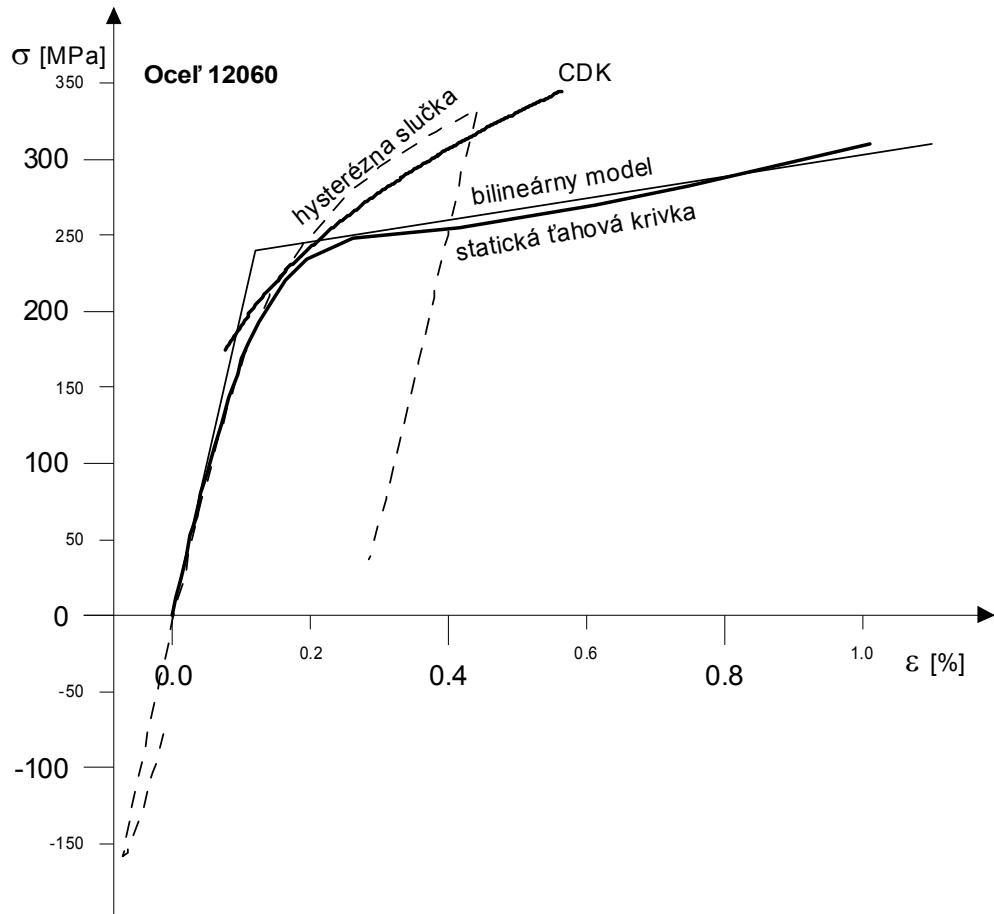
V kritických prierezoch alebo v ich blízkosti je potrebné inštalovať snímače deformácie bez ovplyvnenia povrchu potrubí. Spôsobom inštalácie sú vhodné najmä odporové tenzometrické snímače, pre ktoré je dnes možné zaručiť dlhoročnú životnosť. Snímače je potrebné umiestniť po obvodu vytipovaných prierezov vo vyhotovení trojosých ružíc s pravidelným rozstupom (napr. 120°), aby bolo možné pomocou metodiky [2] vyhodnotiť výslednice vnútorných síl všetkých pôsobiacich účinkov v sledovanom priereze (deformácie od účinku vnútorného tlaku, prídavný ohyb a krútenie, obr. 3).



Obr. 3 Deformačný stav potrubia zaťaženého vnútorným tlakom (ϵ_t , ϵ_r , ϵ_o), prídavným ohybom (ϵ_{Mo} , γ_T) a krútením (γ_{Mk}).

3.3. Spracovanie meraných signálov

Merané priebehy deformácie navyš nevnstupujú do výpočtu priamo, ale okrem úvodného spracovania signálu (ako je filtrácia, selektovanie extrémov, vypustenie „nepoškodujúcich amplitúd“,...) a analýzy 3-osoého deformačného stavu prierezu je potrebné ho pomerne náročným algoritmom spracovať na extrahovanie amplitúd deformácie zaťažovacieho procesu. Selekcija meraných hodnôt deformácie s ohľadom na potreby ďalšieho výpočtu je nevyhnutná jednak pre rýchlosť výpočtov a jednak pre redukciu veľkých objemov dát, ktoré by zaťažovali pamäťové médiá. Priebehy dát po tomto úvodnom spracovaní je vhodné archivovať pre potreby spätnej analýzy prevádzky. Trojosový deformačný stav je ďalej potrebné spracovať na výsledný priebeh deformácie v najviac zaťaženom vlákne prierezu, ktorý je v prípade neproporcionálneho zaťaženia vhodné sledovať vektorovo. Pre výpočtové hodnotenie kumulácie únavového poškodenia je potrebné získať makroblok harmonických cyklov deformácie pomocou štandardizovanej rain flow metódy [3]. Vzhľadom na problém prepočtu deformácie, ktorá je priamo meraná tenzometrickými snímačmi, na napätia (obr. 4) autori pracujú so signálmi v tvare deformácii. Problém, ktorý bolo potrebné vyriešiť, spočíva v získaní priebehu plastickej deformácie bez merania síl (v reálnej prevádzke to prakticky nie je možné) z priebehu celkovej deformácie, ktorú merajú tenzometre [5, 6].



Obr. 4 Porovnanie rôznych napätovo-deformačných kriviek a ich modelov pre oceľ 12060. Nameranej hodnote deformácie odpovedá hodnota napätia v závislosti od zvoleného modelu deformačnej charakteristiky materiálu.

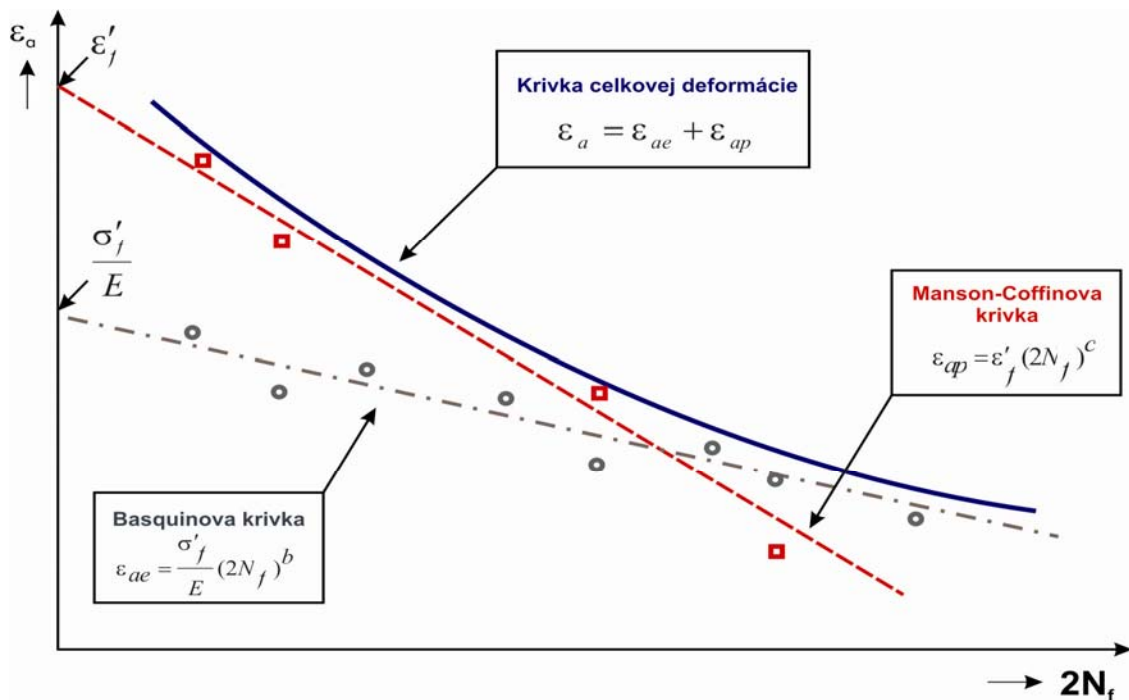
3.4. Cyklické vlastnosti materiálu

Výpočtové hodnotenie kumulácie únavového poškodenia znamená spojiť parametre zaťaženia v konkrétnom objeme materiálu (kritické miesto konštrukcie) s jeho cyklickými vlastnosťami. Je potrebné získať úplnú Manson-Coffinovu krivku v tvare

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (1)$$

kde σ_f' (ϵ_f') je koeficient únavovej pevnosti (ťažnosti) materiálu,
 b (c) je koeficient únavovej pevnosti (ťažnosti),
 N_f je počet cyklov do lomu.

Takúto závislosť je možné získať napr. pomocou elektrohydraulického pulzátora na vzorkách materiálu reprezentujúcich kritické miesto konštrukcie v režime zaťažovania riadenou silou a riadenou deformáciou (obr. 5). Priame meranie tejto závislosti navyše umožňuje získať prehľad o rozptyle cyklických vlastností meraného materiálu a výpočtovo ho podchytiť v hodnotení únavového poškodenia [7].



Obr. 5 Úplná Manson-Coffinova krivka získaná priamym meraním v elektrohydraulickom pulzátore.

3.5. Hodnotenie kumulácie únavového poškodenia

Výber vhodnej hypotézy kumulácie únavového poškodenia je veľmi široký. Autori pracujú so signálmi deformácií, preto uprednostňujú výpočtové hodnotenie kumulácie únavového poškodenia priamo vo forme hysterézných energie vytvorenej plasticou zložkou deformácie [4] v tvare

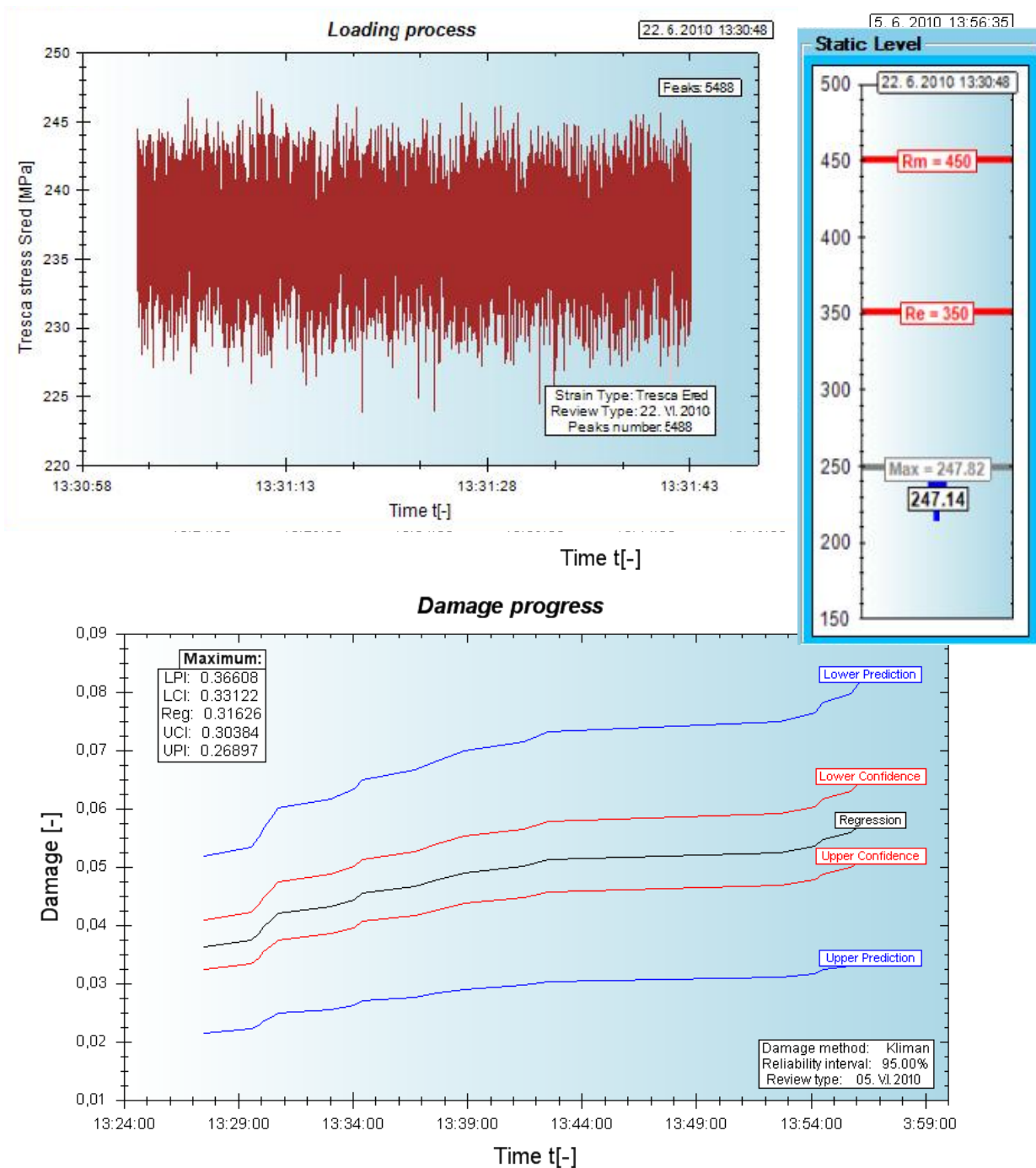
$$D_{ak} = \sum_i n_i \cdot \frac{\Delta W_i}{\Delta W_{Li}} = \sum_{i=1}^r 2 \cdot n_i \cdot \left[\frac{\varepsilon'_f}{\varepsilon_{api}} \right]^{\frac{1}{c}} \quad (2)$$

kde ΔW_i je hysterézna energia od jednej zaťažovacej amplitúdy na hladine i ,
 ΔW_{Li} je hysterézna energia do lomu pre i -tu hladinu amplitúdy zaťaženia,
 n_i je počet zaťažovacích amplitúd na i -tej hladine,
 ε_{api} je amplitúda plastickej deformácie i -tej hladiny v makrobloku zaťažovacích cyklov.

Podrobnejší popis a odvodenie použitého vzťahu je v [5] a [8].

3.6. Zobrazenie aktuálneho únavového poškodenia

Zmyslom monitorovacieho systému je poskytovať okamžitú informáciu o stave čerpania únavovej životnosti kritických miest potrubného systému. V prípade výpočtového podchytenia rozptylu cyklických vlastností materiálu je možné aktuálne únavové poškodenie zobraziť ako pásmo, v ktorom sa hodnota poškodenia nachádza s požadovanou pravdepodobnosťou výskytu vlastností materiálu (obr. 6)



Obr. 6 Zobrazenie aktuálneho stavu únavového poškodenia v jednom kritickom mieste konštrukcie spolu s priebehom namáhania a statickou bezpečnosťou prierezu potrubia. Rozptylové pásmo reprezentuje nehomogenitu cyklických vlastností materiálu.

Zobrazenie aktuálneho stavu únavového poškodenia kritických miest potrubných systémov je možné internou sieťou alebo internetom poskytnúť zodpovedným a zainteresovaným osobám na základe prístupových práv.

4. Záver

Tento stručný prehľad systému on-line monitorovania únavového poškodenia kritických miest potrubných systémov načrtol zložitú, hĺbkú a rozsah problému. Tak rozsiahly a komplexný monitorovací systém je unikátom svojho druhu a v tomto čase sa pripravuje jeho tretia inštalácia. Požiadavka na sledovanie kumulácie únavového poškodenia v kritických miestach konštrukcií súvisí aj s možnosťou výskytu tzv. neštandardných prevádzkových situácií a potrebou hodnotenia ich vplyvu na bezpečnosť ďalšej prevádzky (smernica EÚ 37/1998). Skutočné prevádzkové namáhanie konštrukcie môže byť odlišné oproti projektovanému (napr. nižšie), z čoho pri monitorovaní skutočného postupu únavového poškodenia môže vyplývať kvalifikované predĺženie prevádzkyschopnosti konštrukcie. V opačnom prípade môže monitorovací systém včas upozorniť na potrebu výmeny kritického uzla konštrukcie, prípadne skrátenie prevádzkyschopnosti pre neprípustné riziko lomu.

Literatúra

- [1] Il'kaev R., Seleznev V., Aleshin V., Klishin G.: Numerical simulation of gas pipeline networks, URSS Moscow, 20.
- [2] Poděbradský, J.: Určenie zložiek prevádzkového zaťaženia tenzometrickým meraním. Strojnícky časopis, 43, 1992, 472-478.
- [3] Amzallag, C.-Gerey, P.-Robert, J.L.-Bahuaudt, J.: Standardization of the Rainflow Counting Method for Fatigue Analysis. International Journal of Fatigue, 16, 1994, s. 287.
- [4] Kliman, V.: Fatigue Life Prediction for a Material Under Programable Loading Using Cyclic Stress-Strain Properties. Materials Science & Engineering, 68, 1984 s.1.
- [5] Garan, M.-Chmelko, V.: Continual monitoring of fatigue damage by sensing of deformation state in root of saw-cut. In: 8th International scientific conference APPLIED MECHANICS 2006. Srdí, ČR.
- [6] Chmelko, V.: Príspevok k teórii únavovej životnosti reálnych konštrukcií. Kandidátska dizertačná práca. Strojnícka fakulta STU v Bratislave, 2006.
- [7] Kliman, C.-Jelemenská, J.-Füleky, P.: Odhad únavovej životnosti pri náhodnom zaťažovaní s uvážením nehomogénosti mechanických vlastností materiálu. Strojnícky časopis, 44, 1993, č.3, s.277-289.
- [8] Klesnil, M. a kol.: Cyklická deformácia a únava kovov. Veda, Bratislava 1987.