

Jaromír Máca - Bohuš Leitner *

ÚNAVA MATERIÁLU – RIZIKOVÝ FAKTOR PRI NAVRHOVANÍ A EXPLOATÁCII TECHNICKÝCH SYSTÉMOV

FATIGUE OF MATERIAL – A RISK FACTOR OF DESIGN AND EXPLOITATION OF TECHNICAL SYSTEMS

Únava materiálu častí rozličných technických systémov patrí k najčastejším príčinám vzniku medzných stavov a z nich vyplývajúcich prevádzkových havárií. Článok obsahuje všeobecnú formuláciu problému posudzovania spoľahlivosti technických systémov, stručnú charakteristiku základných oblastí vstupujúcich do výpočtového odhadu únavovej životnosti technických systémov a rozbor rizikových položiek pri jeho praktickej aplikácii.

1. Úvod

Hodnoteniu únavovej životnosti konštrukčných častí rozličných technických systémov sa venuje mimoriadna pozornosť na celom svete, pretože havárie zapríčinené únavovým porušením majú nezriedka charakter katastrofy. Dominantnou snahou pritom je priblíženie podmienok výpočtu resp. experimentu skutočným prevádzkovým podmienkam, v ktorých je skúmaný systém exploatovaný, pričom cieľom je redukcia neznalosti pôsobiacich faktorov okolia a najmä ich interakcii s procesmi prebiehajúcimi v samotnom systéme.

Moderný výpočet rozličných technických systémov (najmä veľkorozmerných strojných a stavebných konštrukcií) preto z hľadiska možnosti vzniku rôznych prevádzkových havárií vyžaduje, aby v čo najväčšej miere rešpektoval dynamickú a najmä náhodnú povahu všetkých pôsobiacich prevádzkových faktorov a z nich vyplývajúcich prevádzkových zaťažení.

2. Všeobecná formulácia posudzovania spoľahlivosti technických systémov

V súčasnosti prezentovaná teória a metódy hodnotenia spoľahlivosti a jej čiastkových charakteristík vychádza v zásade z dvoch hlavných prístupov, z ktorých sa odvodzujú ďalšie teoretické východiská a praktické metodiky, zamerané na určitú skupinu systémov [1].

Prvý prístup je založený na idealizácii, pevných modelových predstavách a využití tradičných výpočtov charakteristík spoľahlivosti. V tomto prípade hovoríme o tzv. *apriórnej* (vlozenej) spoľa-

Material fatigue of parts of different technical systems belongs to the most frequent causes of boundary states rise and relating operation breakdowns. The paper contains general formulation of reliability of technical systems judging, brief characteristic of basic areas to be taken in account as input into a calculated estimation of technical systems fatigue life and analysis of risk items by its practical application.

1. Introduction

Extraordinary attention is dedicated to the evaluation of fatigue life of construction parts of different technical systems all over the world because breakdowns caused by fatigue failure have often a character of catastrophe. It should be a dominant effort to bring conditions of calculation or experiment near to the working conditions in which the investigated system is exploited. The aim is to reduce unfamiliarity of acting factors of the surroundings and their interactions with processes in the system itself.

A modern way of calculation of any technical systems (e.g. large mechanical or civil structures) therefore demands to respect dynamic and stochastic nature of all influencing working factors and related working loads. The main reason for it is the prevention of their working breakdowns.

1. General formulation of judging of technical systems reliability

Now presented theory and methods of reliability evaluation and its partial characteristics result in principle from two main approaches from which follow further theoretical starting points and practical methodics focuses on certain group of systems [1].

The first approach is based on the idealization, strict modelling conditions and use of traditional calculation of reliability characteristics. We can talk about so called *apriory* (inserted) reliability

* prof. Ing. Jaromír Máca, Csc., Ing Bohuš Leitner

Faculty of Special Engineering, University of Zilina, E-mail: maca@fsi.utc.sk, leitner@fsi.utc.sk

hlivosti, určovanej už počas výskumu, vývoja a čiastočne výrobnéj fázy a determinovanej úrovňou použitých výpočtových, konštrukčných a technologických postupov.

Druhý prístup sa opiera o skutočnú informáciu stochastického charakteru, priamo spojenú s konkrétnymi prevádzkovými režimami sledovaného systému. V tomto prípade ide o tzv. *aposteriornu* (prevádzkovú) spoľahlivosť, charakterizujúcu mieru spoľahlivosti konštrukcie v určitých prevádzkových podmienkach. Prevádzková spoľahlivosť je priamo závislá nielen od miery vlozenej spoľahlivosti, ale taktiež od konkrétnych exploatačných podmienok, výrobnéj disciplíny, úrovne starostlivosti, kvality obsluhy a pod.

Najčastejšie využívanou formuláciou problému posudzovania spoľahlivosti technických systémov [TS] je formulácia matematicko-symbolická, ktorá zároveň podáva istú koncepciu posudzovania spoľahlivosti zvoleného prvku vyjadrenú formou syntézy radu v tvare

$$F_{(t)} \Rightarrow [TS] \Rightarrow \sigma_{x(t)} \Rightarrow Z_{(t)} \Rightarrow T_{(Z \text{ krit})} \Rightarrow R_{(t)},$$

kde $F_{(t)}$, $\sigma_{x(t)}$, $Z_{(t)}$ a $T_{(Z \text{ krit})}$ sú všeobecné náhodné funkcie času s týmto významom:

- $F_{(t)}$ – stochastické prevádzkové zaťaženie systému [TS] ako funkcia času,
- $\sigma_{x(t)}$ – napätie v mieste x, ktoré je odozvou na vstupný proces $F_{(t)}$ a implicitne tiež charakterizuje vlastnosti skúmaného systému [TS],
- $Z_{(t)}$ – proces únavového poškodenia, ktorý je odozvou na proces $\sigma_{x(t)}$ a ktorý zohľadňuje vlastnosti systému [TS] a únavové vlastnosti použitého materiálu,
- $T_{(Z \text{ krit})}$ – proces životnosti pridružený k procesu $Z_{(t)}$, vyplývajúci bezprostredne z priebehu únavového procesu a kde Z_{krit} je hraničná hodnota poškodenia spôsobujúca poruchu resp. haváriu systému [TS],
- $R_{(t)}$ – funkcia udávajúca pravdepodobnosť neporušenia [TS] pri uvažovaných podmienkach prevádzky $F_{(t)}$ a vložených vlastnostiach, pričom všeobecne pravdepodobnosť bezporuchovej prevádzky charakterizuje spoľahlivosť.

Je zrejmé, že z pohľadu posudzovania bezpečnosti konštrukcií ako celku je rozhodujúcim kritériom najmä životnosť do porušenia ich hlavných častí, ktorú možno odhadovať pri zohľadnení rozličných teórií únavového poškodenia. Hlavným dôvodom odlišnosti predikovanej hodnoty životnosti a hodnoty dosiahnutej v reálnej prevádzke je najmä náročnosť presného určenia parametrov pôsobiaceho prevádzkového zaťaženia, vyvolaného pôsobením najvýznamnejších faktorov prevádzkových podmienok a ich intenzít.

3. Charakteristika oblastí vstupujúcich do algoritmu odhadu únavovej životnosti

Ak úvahy o riešení problematiky odhadu únavovej životnosti obmedzíme výhradne na pevnostnú problematiku a neuvažujeme

determined already during research, development and partly a phase of production, which is limited with level of the used calculation, design and technological procedures.

The second approach rests on real information of stochastic nature directly connected with concrete working conditions of the examined system. There is the so-called *aposteriory (working) reliability*, which characterizes measure of structure reliability in certain working conditions. Working reliability depends directly not only on a measure of the inserted reliability but also on real exploitation conditions, discipline of production, level of care, quality of operation etc.

The formulation mathematical-symbolic, which simultaneously gives some ideas about selected element reliability estimation, is the mostly used formulation of technical systems [TS] reliability judgement. It expresses reliability in the form of a series synthesis in the form of

$$F_{(t)} \Rightarrow [TS] \Rightarrow \sigma_{x(t)} \Rightarrow Z_{(t)} \Rightarrow T_{(Z \text{ krit})} \Rightarrow R_{(t)},$$

where $F_{(t)}$, $\sigma_{x(t)}$, $Z_{(t)}$ and $T_{(Z \text{ krit})}$ are general random functions of time with the following meaning:

- $F_{(t)}$ – stochastic working load of system [TS] as a time function,
- $\sigma_{x(t)}$ – stress in x-location, which is a reaction on the input process $F_{(t)}$ and characterises implicitly quality of the tested system [TS] too,
- $Z_{(t)}$ – process of fatigue failure which is a reaction on the process $\sigma_{x(t)}$ and which takes in account a character of the system [TS] and fatigue characteristics of used material,
- $T_{(Z \text{ krit})}$ – process of life connected with the process $Z_{(t)}$, which follows from the course of fatigue process and when Z_{krit} is order value of failure causing breakdown of the system [TS],
- $R_{(t)}$ – function describing probability of non failure of [TS] during defined working conditions $F_{(t)}$ and inserted qualities which generally characterises reliability as probability of working without failure.

It is obvious that from point of view of complex structure safety judgement the fatigue life of their principal parts is the most decisive criterion. It can be estimated after different theories of fatigue failure. The main reason for difference of predicted life value from the real one reached under real working conditions are namely difficulties which we are meeting during exact determination of acting working load parameters. These are caused by some of the most significant factors of working conditions and their intensities.

3. Characteristic of areas entering the algorithm of fatigue life estimation

If we limit our meditation about fatigue life estimation just on strength problems and do not take in an account related theories

súvisiace metódy teórie mechanizmov, dynamiky strojných agregátov a ďalších vedných disciplín, potom vo všeobecnosti ide o štyri základné oblasti záujmu, súvisiace s:

- výberom kritických miest konštrukcie, budú analyzované,
- určením namáhania vo vybraných kritických miestach a jeho následným spracovaním metódami vhodnými pre odhad životnosti,
- návrhom resp. posúdením pevnostných a únavových vlastností materiálu skúmaných častí na základe zvolených materiálových charakteristík a
- výberom výpočtového postupu – hypotézy kumulácie únavového poškodenia, ktorý uvedie do súvislosti informácie o zaťaženiach a materiálových vlastnostiach časti systému. Výstupom je kvantifikovaný odhad únavovej životnosti analyzovanej časti.

Po získaní a vyhodnotení uvedených skupín informácií a ich vhodnej aplikácii možno získať konkrétne hodnoty odhadu únavovej životnosti skúmaných častí systému, ktoré významne determinujú spoľahlivosť konštrukcie ako celku a sú dôležitou informáciou pri posudzovaní rizík spojených s jej bezpečným prevádzkovaním.

2.1 Prevádzkové podmienky – zdroj prevádzkových zaťažení

Z obr. 1 je zjavné, že prevádzkové podmienky sú hlavným zdrojom prevádzkového zaťaženia (budenia), ktoré spôsobuje namáhanie skúmaného technického systému. Aj napriek tomu, že sú základnou východiskovou informáciou pre kvantifikovaný odhad spoľahlivosti každého technického systému, sa doteraz nepodarilo nájsť univerzálny spôsob ich opisu ako celku, ktorý by bol prakticky použiteľný za každých okolností. Skúsenosti z realizovaných analýz životnosti neustále dokazujú, že práve problematike vplyvu prevádzkových podmienok na úroveň kumulácie únavového poškodenia sa nevenuje stále dostatočná pozornosť.

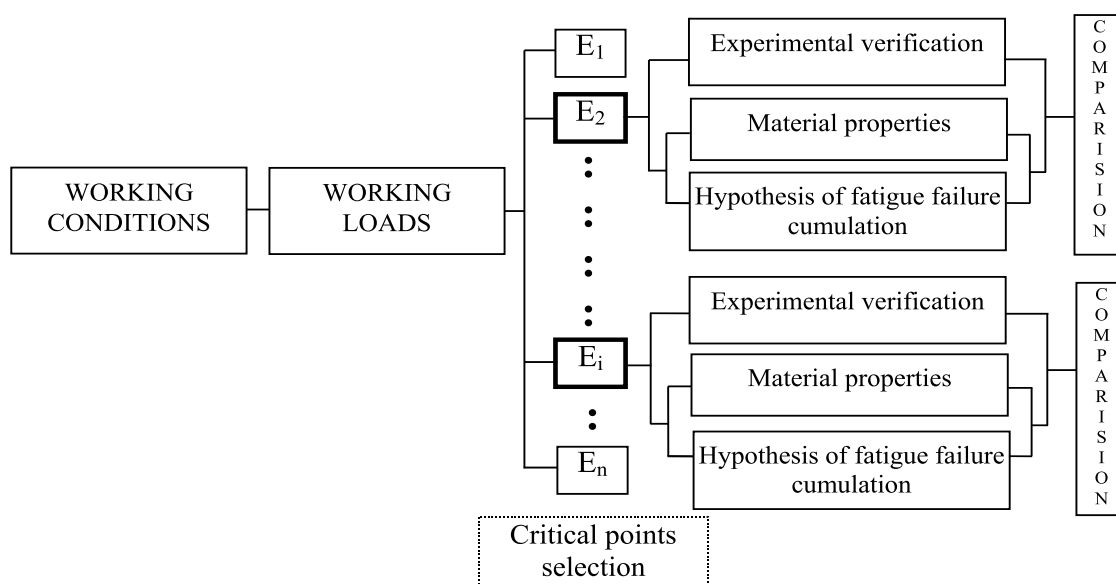
such as the theory of mechanics dynamics of machine units and further scientific disciplines then generally we can deal with 4 principle areas of interest related with:

- choice of structure critical points, which is analysed further,
- determination of stresses in selected critical points and following elaboration with methods suitable for fatigue life estimation,
- proposal or judgement of strength and fatigue properties of investigate parts material based on chosen material characteristics and
- choice of method of calculation – hypothesis of fatigue failure cumulating, which can correlate the information about loads and material properties of the system parts. The output is a qualified estimation of an analysed part fatigue life.

After determination and evaluation of above mentioned groups of information and after their suitable application we can get concrete values of fatigue life estimation of tested parts of the system which significantly determine reliability of the structure on the whole and which are the important information in judgement of risks connected with its safe working.

2.1 Working conditions – a source of working loads

It follows from Fig. 1, that working conditions are the main source of working load (excitation), which causes stresses of the examined technical system. Despite of that they are principal input information for quantified estimation of reliability of each technical system. It was not possible to find any universal way of their complex description until now which could be used in a practical way at any circumstances. Experience from realised analyses of life show that problem of working conditions influence on the level of fatigue failure cumulation is still underestimated.



Obr. 1. Všeobecný postup riešenia problematiky únavovej životnosti
Fig. 1. General procedure of fatigue life problems solutions

Jednotlivé faktory prevádzkových podmienok môžu mať rozličný fyzikálny význam, avšak takmer bez výnimky majú náhodný charakter. Pri skúmaní ich vplyvu na namáhanie častí systému sa vychádza z analýzy skutočných režimov činnosti, na základe ktorej by sa mal zostaviť model typických prevádzkových podmienok – *zaťažovací kolektív*, reprezentujúci súhrn najvýznamnejších faktorov prevádzkových podmienok a početnosti ich výskytu [1, 2, 4].

Pri posudzovaní únavovej životnosti sa vychádza zo základného predpokladu, že únavové poškodenie je vždy podmienené cyklickou deformáciou materiálu, ktorej merateľnou príčinou je vo všetkých prípadoch sila, tlak, rýchlosť, zrýchlenie a pod. Z hľadiska účelu životnostných analýz nie sú dôležité charakteristiky prevádzkového zaťaženia a ich interakcie, ale iba výsledok ich spolupôsobenia vo forme namáhania, resp. deformácie častí konštrukcie.

Prakticky sa najčastejšie využívajú dva základné spôsoby získania relevantných informácií. Prvý spôsob je založený na fakte, že väčšinou je možné merať namáhanie kritických miest priamo na konštrukcii počas jej činnosti v reálnych prevádzkových podmienkach. Ak je meranie realizované za účelom získania vstupných údajov pre odhad únavovej životnosti, potom konštrukciu nemožno merať pri nasadení v ľubovoľných prevádzkových podmienkach (hoci aj najagresívnejších), ale v podmienkach, ktoré sú pre konštrukciu významné, resp. typické. Druhý spôsob je založený na experimentálnom získaní priebehov najvýznamnejších prevádzkových faktorov a realizáciou počítačovej simulácie ich pôsobenia na vytvorený matematický model systému (najčastejšie MKP) určiť namáhanie kritických častí výpočtom.

2.2 Pevnostné a únavové vlastnosti konštrukčných materiálov

Druhou významnou oblasťou pri predikcii únavovej životnosti je určovanie potrebných (najmä mechanických) vlastností použitých konštrukčných materiálov v analyzovaných miestach systému. Pri praktickej realizácii odhadu prevádzkovej únavovej životnosti sa v súčasnosti využíva niekoľko charakteristík (kriviek) použitých konštrukčných materiálov, ktorými možno charakterizovať únavové vlastnosti použitého materiálu.

Najstaršou, avšak dodnes využívanou charakteristikou materiálu je známa *Wöhlerova krivka* (obr. 2a), zachytávajúca závislosť amplitúdy harmonického cyklu sily alebo napätia σ_a od počtu cyklov do lomu N_f , resp. často iba jej jednej hodnoty – medze únavy σ_c [2,3].

Matematicky sa vyjadruje rovnicou (1), alebo s ohľadom na medzu únavy σ_c v tvare (2), resp. s uvažovaním vplyvu strednej hodnoty v tvare (3), kde m , A , σ'_f , b sú materiálové konštanty (σ'_f sa nazýva súčiniteľ únavovej pevnosti a b exponent únavovej pevnosti).

$$\sigma_a^m \cdot N_f = A \quad (1)$$

$$(\sigma_a - \sigma_c)^m \cdot N_f = A \quad \text{resp.} \quad \sigma_a = \sigma'_f \cdot (2 \cdot N_f)^b \quad (2)$$

Individual factors of working conditions can have different physical meaning although nearly without any exception they are of stochastic nature. Exploring their influence on system parts stresses we can go out from analysis of real working modes. It should be a model of typical working conditions built on that base so called load collective representing a collection of the most important working conditions factors and frequency of their occurrence. [1, 2, 4].

The review of fatigue life is built on a basic presumption that fatigue failure is always conditioned by cyclic deformation of material of which a measurable cause is in any case force pressure, velocity, acceleration etc. From the point of view of life analysis purpose there are not important working load characteristics and their interactions but just result of their co-operation in the form of stress or deformation of structure parts.

In real practice there are most often used two elementary ways in which relevant information is obtained. The first one is based on the fact that in most cases it is possible to measure stresses of the structure critical points directly on the structure during its working in real working conditions. If the measurement is realised in order to get input values for fatigue life estimation then the structure cannot be measured at any working condition (although the most aggressive ones) but in conditions which are for the structure typical or relevant. The second way is based on obtaining the most relevant working factors and on computer simulation of their influence on mathematical model of the system (most often FEM) which has as a result calculation of critical parts stresses.

2.2 Strength and fatigue properties of materials of the structures.

The second relevant area for fatigue life prediction is determination of necessary (namely mechanical) properties of used constructional materials in analysed points of a system. Some characteristics (curves) of used constructional materials are utilized during a practical realisation of estimation of working fatigue life which can characterise fatigue properties of used material.

The oldest but until now utilized characteristics of material is the *Wöhler curve* (Fig. 2 a) showing dependence of the harmonic cycle amplitude of force F or stress σ_a on a number of cycles until failure N_f . Sometimes it is used just the only value – fatigue limit σ_c [2,3].

It can be expressed in a mathematical way by equation (1) or taking in account fatigue limit σ_c in form (2) or as the case may be taking in account influence of the mean value in form (3), where m , A , σ'_f , b are the material constants (σ'_f is called fatigue strength coefficient and b is an exponent of fatigue strength).

$$\sigma_a^m \cdot N_f = A \quad (1)$$

$$(\sigma_a - \sigma_c)^m \cdot N_f = A \quad \text{resp.} \quad \sigma_a = \sigma'_f \cdot (2 \cdot N_f)^b \quad (2)$$

$$\sigma_a = (\sigma'_f - \sigma_m) \cdot (2 \cdot N_f)^b \quad (3)$$

Modernejšou materiálou charakteristikou je *Mansonova-Coffinova krivka* (obr. 2b), udávajúca závislosť amplitúdy harmonického cyklu deformácie ε_a od počtu cyklov do lomu $2 \cdot N_f$. Opisuje sa rovnicou (4), kde ε'_f je súčiniteľ únavovej ťažnosti, c je exponent únavovej ťažnosti a E je modul pružnosti

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2 \cdot N_f)^b + \varepsilon'_f \cdot (2 \cdot N_f)^c \quad (4)$$

Pri skúmaní súvislosti medzi Wöhlerovou a Mansonovou-Coffinovou krivkou bolo zistené, že súvislosť existuje a vyhovujúcou vzťahovou rovnicou je tzv. *rovnica cyklickej deformačnej krivky* (obr. 2c), vyjadrená v tvare

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (5)$$

kde K je súčiniteľ cyklickej pevnosti a n je súčiniteľ cyklického spevnenia. Dôležité je, že pri opakovanom namáhaní spravidla neplatí klasický Hookov zákon $\varepsilon = \sigma/E$, ale rozhodujúcu úlohu zohráva práve druhá časť vzťahu (5) [2].

2.3 Hypotézy kumulácie únavového poškodenia

Je prirodzené, že odlišný spôsob spracovania a opisu stochastických prevádzkových zaťažení vyústil aj do odlišných metód odhadu únavového poškodenia. V únave sa tieto metodiky nazývajú *hypotézy kumulácie únavového poškodenia* (HKÚP) a ich účelom je kvantifikovaný odhad úrovne únavového poškodenia spôsobeného procesom určitej dĺžky resp. počtom cyklov. Podľa charakteru vyhodnotených parametrov (blok harmonických cyklov [3, 4] resp. štatistické charakteristiky procesu získané v rámci korelačnej teórie [3, 4] alebo hodnoty AKF príp. SVH z autoregresného modelu procesu [5]) možno aplikovať vhodnú HKÚP, založenú na využití niektorého z uvedených parametrov.

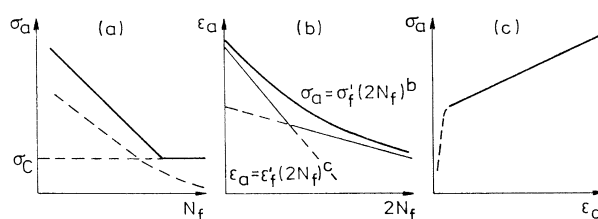
Hypotézy založené na využití získaného bloku resp. makrobloku harmonických cyklov bolo navrhnutých a verifikovaných veľké množstvo. Pri ich aplikácii sa vychádza hlavne z informácií o použitom konštrukčnom materiále a základných charakteristikách makrobloku harmonických cyklov (napr. počet hladín bloku, počet cyklov, počet cyklov do lomu na tej istej hladine a pod.).

Hypotézy založené na *charakteristikách korelačnej teórie* sú menej frekvencované ako predchádzajúce hypotézy a väčšina z nich je príliš teoreticky i výpočtovo náročná na konkrétne praktické použitie. Navyše nie je zatiaľ dostatočne preukázaná ich presnosť [4, 5].

$$\sigma_a = (\sigma'_f - \sigma_m) \cdot (2 \cdot N_f)^b \quad (3)$$

More modern material characteristic is the *Manson-Coffin curve* (Fig. 2b) defining dependability of the amplitude of a deformation harmonic cycle ε_a on a number of cycles until failure $2 \cdot N_f$. It is described by equation (4), where ε'_f is coefficient of fatigue ductility (elongation), c is an exponent of fatigue ductility and E is the Young module.

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2 \cdot N_f)^b + \varepsilon'_f \cdot (2 \cdot N_f)^c \quad (4)$$



Obr. 2. Wöhlerova krivka (a), Mansonova-Goffinova krivka (b), cyklická deformačná krivka (c)

Fig. 2. Wöhler curve (a), Manson-Doffin curve (b), Cyclic deformation curve (c)

By exploring correlation between Wöhler and Manson-Coffin curves it was found that the dependability exists and holds for the relationship equation which is the so called *equation of the cyclic deformation curve* (Fig. 2c) which is expressed in form

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (5)$$

Where K is a coefficient of cyclic strength and n is a coefficient of cyclic strain-hardness. It is important that by repeated loads doesn't hold the classic Hook's law $\varepsilon = \sigma/E$ but the decisive role plays just the second part of equation (5) [2].

2.3 Hypothesis of fatigue damage cumulation

It is natural that different ways of treatment and description of stochastic working loads have as a result different methods of fatigue damage estimation. In the area of fatigue these methods are called *hypothesis of fatigue damage cumulation* (HFDC) and their purpose is a quantified estimation of fatigue damage level estimation caused by a process of certain length or a number of cycles. Depending on character of evaluated parameters (the block of harmonic cycles) [3,4] or statistic characteristics of the process obtained in the frame of correlation theory [3,4] or values of autocorrelation function (ACF) or power spectral density (PSD) from an autoregressive model of process [5] it is possible to apply a suitable HFDC based on using some of the mentioned parameters.

A lot of hypotheses based on utilisation of the obtained *block or macroblock of harmonic cycles* were proposed and verified. By their application one goes out mainly from information about the used construction material and about principal characteristics of macroblock of harmonic cycles (e.g. number of block levels, number of cycles, number of cycles until failure on the same level etc.).

Hypotheses based on the *correlation theory characteristics* are less frequent than the former ones and most of them are too theoretic a computation demanding for concrete practical utilisation. Moreover their accuracy has not been sufficiently proved until now [4, 5].

3. Rizikové faktory pri posudzovaní únavovej životnosti technických systémov

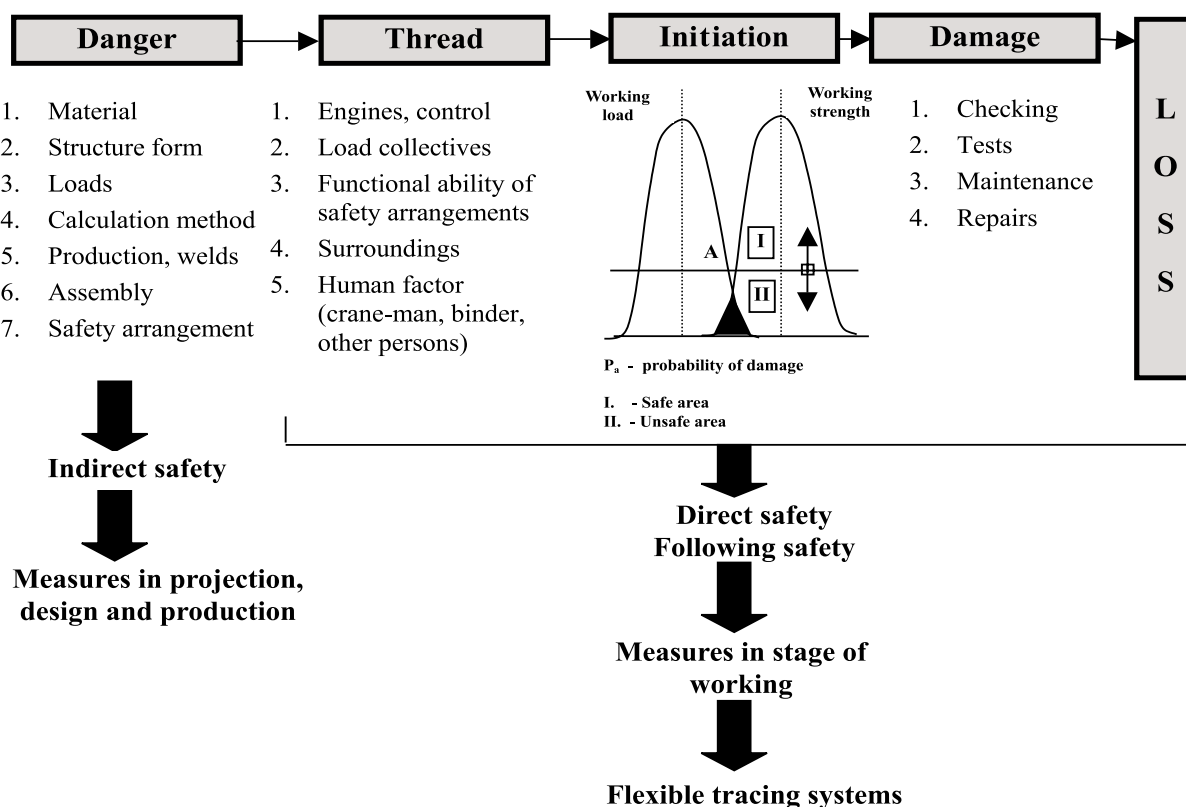
Jednou z oblastí pre aplikáciu metód riadenia rizika pri návrhu a eksploatacii technických systémov je problematika odhadu prevádzkovej pevnosti jednotlivých častí a s ním súvisiaci odhad únavovej životnosti. Realizované analýzy príčin prevádzkových porúch a havárií rozličných technických systémov jednoznačne dokazujú, že takmer vo všetkých prípadoch bol prítomný únavový proces ako dôsledok opakovaného dynamického namáhania, väčšinou v synerгии s ďalším poškodzujúcim procesom, ako korózia, suché trenie, defekty materiálu, výkyvy teploty a pod.

V zmysle smernice Rady Európy 89/392/EÚ by mal každý konštruktér poznať riziká, ktoré sú sprievodným javom ním navrhnutého riešenia, tzn. aj riziká, ktoré sú súčasťou pevnostnej kontroly. Musí vedieť, ktoré rizikové faktory ovplyvňujú pravdepodobnosť poruchy častí systému a navrhnúť užívateľovi opatrenia na ich riadenie tzn. jej minimalizáciu príp. úplné odstránenie. Pre ilustráciu je na obr. 3 analyzovaná kauzálna závislosť vzniku poruchy nosnej ocelevej konštrukcie zdvíhacieho stroja a k nej priradené rizikové faktory súvisiace s odhadom životnosti podľa [6].

3. Risk factors in judgement of technical systems fatigue life

One of areas for application of risk control methods in design and exploitation of technical systems is working strength estimation of their single parts and with it connected fatigue life estimation. The realised analysis of working failure causes and breakdowns of different technical systems shows clearly that nearly in all cases a fatigue process was present as a result of a repeated dynamic load, mostly in synergy with another damaging process such as corrosion, dry friction, material defects, temperature changes etc.

In accordance with the guideline 89/392/EC of the European Council each designer should know the risk connected with accompanying effects of the proposed solution it means also the risks which are components of a strength check. He must know which risk factors influence probability of failure of the system parts and propose to the user some measures for their control it means their minimisation or total elimination. For an illustration is on Fig. 3 analysed a causal dependence of a steel structure of a lifting machine failure a its related a risk factors depending on its fatigue life estimation after [6].



Obr. 3. Rizikové faktory pri odhade životnosti nosných častí zdvíhacieho stroja

Fig.3. Risk factors in estimation of carrying parts of lifting machine life

Výpočet alebo správnejšie odhad životnosti časti konštrukcie sa v skutočnosti často odlišuje od hodnoty dosiahnutej v reálnej prevádzke. Hlavným dôvodom sú najmä problémy spojené s presným

Calculation or rather estimation of the structure parts life often in reality differs from the value reached in real working. Main reasons are namely problems connected with an exact deter-

určením charakteristických parametrov vonkajšieho zaťaženia, ktoré počas prevádzky na konštrukciu pôsobí. Takmer vo všetkých prípadoch nie sú k dispozícii hodnoty únavovej pevnosti pre skúmaný uzol konštrukcie, ale prevažne iba pre vzorky materiálov, čo predstavuje ideálny stav, ktorý sa v reálnych podmienkach nasadenia vyskytuje iba zriedka.

Postup odhadu životnosti jednotlivých prvkov technických systémov a s ním spojené riziká pri predikcii prevádzkovej pevnosti sú založené na definovaní dvoch základných veličín – *zaťaženia* (napätosti, namáhania) a *únosnosti*.

Zaťaženie vzniká ako dôsledok pôsobenia prevádzkových podmienok. V simulačných postupoch je najčastejšie vyjadrené vo forme zaťažovacieho spektra (kolektívu). Skutočné prevádzkové zaťaženia systému vyvolávajú, v závislosti od jeho konštrukcie, v jednotlivých funkčných celkoch rôzne namáhania. Aby bolo možné reálny zaťažovací kolektív v komplexe skúmaného systému definovať je nutné identifikovať druh vonkajšieho zaťaženia, miesto jeho pôsobenia a jeho časovú závislosť. Každý druh prevádzky a rôzne výrobné technológie sú charakterizované rôznymi tvarmi zaťažovacích kolektívov. Bezpečné dimenzovanie funkčných častí systému na únavu je možné iba vtedy, ak konštruktér pozná skutočné zaťaženie konštrukcie už v etape jej návrhu, napr. vo forme databázových údajov. Reálne zaťažovacie kolektívy však v etape konštrukcie zatiaľ nie sú známe a ak známe sú, tak iba pre presne špecifikovanú skupinu systémov. Z tohto dôvodu možno zaťažovací kolektív definovať ako významný rizikový faktor.

Skutočné namáhanie častí konštrukcie je možné zaznamenať iba prostredníctvom aplikácie experimentálnych metód počas technického života systému, čo je v praxi, najmä pre bežné typy strojných konštrukcií ťažko riešiteľné hlavne tam, kde ide o náhodné zaťaženia. Jedným z možných postupov s najvyšším stupňom priblíženia ku skutočnosti je využitie simulačných metód založených na matematických modeloch skúmaného systému alebo jeho častí. Tento postup je prirodzene zaťažený chybou, ktorá je priamo spätá s rizikovým faktorom – zaťažením.

Únosnosť sa vyjadruje v tvare materiálových charakteristík (najčastejšie Wöhlerova krivka), ktoré sú však vo väčšine prípadov k dispozícii iba pre určitú vzorku materiálov. Zohľadnenie prevádzkových parametrov znamená zmenu tvaru krivky a v odbornej literatúre sa hovorí o tzv. prevádzkovej krivke životnosti.

Ďalšími dôležitými rizikovými faktormi pri odhade životnosti sú parametre súvisiace s veľkosťou súčasti a jej tvarom, typom vrubov, povrchovou úpravou a kvalitou jej zhotovenia, frekvenciou zaťažovania, pracovnou teplotou a pod., ktoré ovplyvňujú vlastnosti materiálov a tým aj tvar životnostnej krivky. Bolo dokázané, že najmä nedostatočná znalosť hodnoty smernice únavovej krivky a nezohľadnenie tvarových nelinearit profilov analyzovaných častí môže viesť k výrazným odchýlkam vypočítaných výsledkov.

4. Záver

Významný výskyt prevádzkových porúch a havárií zapríčinených únavovým procesom nás neustále presviedča o tom, že úroveň

minimácie a charakteristickej hodnoty vonkajšieho zaťaženia pôsobiacieho na konštrukciu počas jej prevádzky. V takmer vo všetkých prípadoch nie sú k dispozícii hodnoty únavovej pevnosti pre skúmaný uzol konštrukcie, ale prevažne iba pre vzorky materiálov, čo predstavuje ideálny stav, ktorý sa v reálnych podmienkach nasadenia vyskytuje iba zriedka.

Procedúry odhadu životnosti jednotlivých prvkov technických systémov a s ním spojené riziká pri predikcii prevádzkovej pevnosti sú založené na definovaní dvoch základných veličín – *load* (stress, strength) and *loading capacity*.

The *load* rises as a result of working conditions. For the purpose of simulation it is often expressed in the form of loading spectrum (collective) which can be constructed on the base of the known procedures. Real working loads of the system result in dependence on its structure in different loads in single functional systems. To be able to define load collective in complex of the explored system it is necessary to identify a kind of external load, point of its acting and to know its time dependence. Each kind of working and different production technologies are characterised with different forms of collectives. Relating to the safe dimensioning of the single system parts on fatigue it is suitable for a designer to know the real structure load already in the stage of calculation, for example, in a form of database. Real load collectives are not mostly known in the stage of design and if they are known so just for a strictly specified group sort of systems. Therefore, we can define the load collective as a relevant risk factor.

Real stress of a structure part can be recorded just on the base of experimental methods application during technical life of system which is in practice namely for usual types of machine structures just difficult solvable mainly there where the load are of stochastic nature. One of available procedures with high grade of reliability approximation is use of simulation methods based on mathematical model of explored system or its part. This procedure is naturally marked with error which is directly connected with defined risk factor – load.

Loading capacity is expressed in form of material characteristics (most often Wöhler curve) which are usually available just for some material samples. Taking in account the working parameters means a change of curve form, which is called in special literature as a working life curve.

Further important risk factors in life estimation are the parameters related with dimensions of a part, its form, type of notch [7], state and quality of surface, loading frequency, working temperature etc. which have influence on material properties and connected form of life curve. It was proved that namely insufficient knowledge of fatigue curve derivation value and insufficient taking in account of form nonlinearity of profiles of analysed parts of structures lead to relevant differences calculated values of life from the real ones.

4. Conclusion

Relevant occurrence of working failures and breakdowns caused by fatigue process show us all the time that our level of knowledge

vedomostí o tejto oblasti a najmä ich aplikácia nie sú stále na požadovanej úrovni. Preto cieľom príspevku bola charakteristika najvýznamnejších faktorov vstupujúcich do výpočtového odhadu únavovej životnosti a poukázanie na niektoré riziká súvisiace s definovaním faktorov vystupujúcich v postupe odhadu únavovej životnosti a s tým súvisiacimi rizikami vzniku nestability technických systémov. Je zrejmé, že ak informácie o pôsobiacich faktoroch prevádzkových podmienok nebudú dostatočné, budú v algoritme odhadu životnosti vážne chyby a predikovaná hodnota bude výrazne odlišná od skutočnej hodnoty dosiahnutej v reálnej prevádzke.

in this field and namely its application are still not on the wanted level. Therefore, the aim of this paper was to characterise the most relevant factors going into the calculated estimation of fatigue life and to show some risks connected with the defining of factors acting in the procedure of fatigue life estimation and with correlated risks of instability rise of technical systems. It is evident that in case of insufficient information about acting factors of working conditions rise in the algorithm of life estimation relevant errors and estimated value will be significantly different from the real one.

Literatúra – References

- [1] BÍLÝ, M. – SEDLÁČEK, J.: *Spolehlivost' mechanických konstrukcí*. Veda, Bratislava 1983
- [2] BÍLÝ, M.: *Únava složitých konstrukcí*. Letná škola únavy materiálů 96, VŠDS, Rajecké Teplice 1996.
- [3] KLIMAN, V.: *Únavová životnost' a hodnocení spolehlivosti v reálných zatěžovacích podmínkách*. Letná škola únavy materiálů 96, Rajecké Teplice 1996.
- [4] ČAČKO, J. – BÍLÝ, M. – BUKOVECZKY, J.: *Meranie, vyhodnocovanie a simulácia prevádzkových náhodných procesov*. Veda, Bratislava 1984.
- [5] LEITNER, B.: *Metódy analýzy a popisu prevádzkových náhodných procesov*. Zborník vedeckých prác FŠI, FŠI ŽU, Žilina 2000.
- [6] SINAY, J.: *Riziká technických zariadení – manažérstvo rizika*. TU Košice – VSŽ, a. s. Košice, OTA, Košice 1997.
- [7] LEŽDÍK, V.: *Plnená elektróda na zváranie grafitických liatin*. Dizertačná práca, ŽU, Strojnícka fakulta, Žilina 1997.