

VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Doc. Ing. Stanislav Vejvoda, CSc.

**PODMÍNKY PRO DLOUHODOBÝ PROVOZ ZAŘÍZENÍ**

CONDITIONS FOR LONG TERM OPERATION OF PLANTS

TEZE PŘEDNÁŠKY

K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ  
V OBORU „KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ“



BRNO 2004

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

zařízení, dlouhodobý provoz, materiál, poškozování, náhlé poškození, postupné poškozování, únava, koroze, křehký lom, creep, vodíkové zkřehnutí, údržba, opravy, diagnostika, provozní měření, čidlo, zbytková životnost, deterministická analýza, pravděpodobnostní analýza

## **KEY WORDS**

plant, long term operation, material, damage, sudden damage, gradual damage, fatigue, corrosion, brittle crack, creep, hydrogen brittleness, maintenance, repair, diagnostic, operational measurement, sensor, residual lifetime, deterministic analysis, probabilistic analysis

## Obsah

1	Úvod .....	5
2	Požadavky kladené na konstrukce včetně tlakových zařízení .....	5
3	Mechanismy poškozování materiálu zařízení a jejich matematický popis .....	9
4	Systém řízeného stárnutí zařízení výrobní jednotky .....	20
5	Diagnostický systém .....	24
6	Pravděpodobnostní analýza .....	34
7	Zhodnocení a perspektivy dalšího vývoje .....	36
8	Literatura .....	37
9	Poděkování .....	39
10	English summary .....	39

**Stanislav Vejvoda** se narodil 30. června 1940 v Zdražanech u Nového Bydžova. V letech 1957 až 1962 studoval na Vojenské akademii v Brně, obor vojensko – průmyslový, specializaci ženíjní, stavební a zemní stroje a mechanizace stavebních prací. V roce 1974 na základě obhajoby získal vědeckou hodnost kandidáta technických věd v oboru Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí. V roce 1992 obhájil habilitační práci na téma a byl jmenován docentem pro obor Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí. Po ukončení studia v r. 1962 pracoval jako statik v Projekci a konstrukci velkostrojů společnosti VÍTKOVICE v Bílině. Od počátku července 1964 doposud pracuje v Ústavu aplikované mechaniky Brno, který byl do roku 1994 součástí Výzkumu a vývoje společnost VÍTKOVICE a v roce 1994 byl transformován do společnosti typu s.r.o., nyní vlastněné společností ÚJV Řež. Do roku 1974 pracoval jako výzkumný a poté jako vědecký pracovník. Od roku 1992 je ředitelem ústavu.

Od roku 1977 přednáší na VUT v Brně, Fakultě strojního inženýrství, Ústavu procesního a ekologického inženýrství, v současné době garantuje tři předměty: Konstrukce procesních zařízení I, Konstrukce procesních zařízení II a Stavba procesních zařízení. Od roku 2000 je na částečný úvazek zaměstnán na VUT v Brně. Od roku 1992 vyučuje v kurzech pro inženýry a technology svařování na VUT v Brně a VŠB-TU Ostrava a v kurzech pro výpočtáře a konstruktéry tlakových nádob na VUT v Brně.

V roce 1986 absolvoval 6,5 měsíční studijní pobyt ve Failure Associates Analyses, Department of Fracture Mechanics, Palo Alto, California, USA.

Za dobu jeho pedagogické činnosti získali pod jeho vedením dva inženýři vědeckou hodnost CSc. Jako školitel se podílel na výchově několika zahraničních studentů, kteří na VA v Brně získali vědeckou hodnost CSc. V současné době jsou pod jeho vedením dva absolventi VUT v Brně FSI v doktorandském studiu na ÚPEI této fakulty.

Ve své profesionální činnosti se zabýval výpočty pevnosti a životnosti ocelových konstrukcí a strojních zařízení, tlakových nádob pro klasické a jaderné elektrárny, chemický, petrochemický a potravinářský průmysl, velkostrojů pro těžbu uhlí, zařízení pro metalurgický průmysl a válcovny. Odborně se věnoval hodnocení mezních stavů pevnosti (prostá pevnost, únava, creep, křehký lom), teorii a vývoji diagnostických systémů, řízeného stárnutí/životnosti strojních dílů, ocelových konstrukcí a tlakových nádob. Je spoluautorem Normativně technické dokumentace INTERATOM-ENERGO pro zařízení jaderných elektráren typu VVER a hlavním koordinátorem a tvůrcem Normativně technické dokumentace Asociace strojních inženýrů pro zařízení jaderných elektráren typu VVER.

Je členem a má funkce v následujících odborných a společenských organizacích: International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology, člen Board of Directors pro období 1999 až 2007, z toho Vice-President a Secretary 1999 až 2001, President společnosti 2001 až 2003; Asociace strojních inženýrů ČR, člen celostátního výboru; Společnost pro mechaniku, člen celostátního výboru 2001 až 2003; Asociace výzkumných organizací, člen předsednictva od 1994 do 2003; člen The American Society of Mechanical Engineers (ASME) a člen Lions Club Brno Špilberk. Byl předsedou mezinárodní konference SMiRT 17 - Structural Mechanics in Reactor Technology, pořádané v srpnu 2003 v Praze. Byl či je členem vědeckého výboru mezinárodních konferencí řady FAILURES a CAPE v Jižní Africe, mezinárodní konference Design, Inspection, Maintenance and Operation of Cylindrical Steel Tanks and Pipeline v Praze 2003. Byl či je garantem nebo spolugarantem konferencí s mezinárodní účastí: Velkostroje, těžební technika a dopravní cesty a konference, Pravděpodobnost porušování konstrukcí. Spolueditor sborníků z konferencí Korozie a její vliv na pevnost a životnost konstrukcí z oceli. Je členem Editorial Board časopisu Journal of Process Mechanical Engineering. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, London, UK. Je členem oborové rady 36-34-9 Konstrukce a dopravní stavby doktorského studijního programu na Fakultě stavební VUT v Brně.

Uveřejnil 106 odborných článků na tuzemských konferencích, 54 článků v časopisech (3 v zahraničních) a na mezinárodních konferencích, z toho 34 v angličtině a jeden v ruštině. Je autorem nebo spoluautorem 8 učebních textů. Mezi významnější úspěšně řešené výzkumné úkoly lze zařadit 37.

# 1 Úvod

V posledních letech jsou kladeny stále náročnější požadavky na provozní spolehlivost a výkonnost technologických zařízení. Požadavky na únosnost konstrukcí rostou rychleji, než výrobci ocelí stačí zvyšovat jejich pevnostní vlastnosti. Vede to k rychlejší degradaci pevnostních vlastností materiálů a funkcí zařízení v provozních podmínkách. Provozovatelé přitom mají zájem provozovat zařízení nad dobu předpokládanou projektem. Proto se stále více uplatňují systémy řízeného stárnutí zařízení výrobních jednotek.

Samotný výpočet poměrných deformací, vnitřních sil a napětí pro zkušební a nejvyšší provozní zatížení nepostačuje k zaručení provozní spolehlivosti a bezpečnosti navrhovaných zařízení. Musí být také posouzena bezpečnost a odolnost materiálu zařízení proti dosažení jednotlivých mezních stavů, např. deformace, únosnosti, stability, porušení, trhlin, lomu, korozi pod napětím apod. Vznik mezních stavů se připouští s daným součinitelem bezpečnosti, případně se připouští dosažení pouze etapy iniciace povrchového defektu, nikoliv již etapa jeho růstu ať s vlivem nebo bez vlivu korozního prostředí. Vypracování těchto posouzení se neobejde bez znalostí o úrovni zatížení a jeho změně v čase, o vlivu prostředí, ve kterém bude zařízení pracovat, o mechanických a fyzikálních konvenčních a nekonvenčních vlastnostech použitých materiálů, o technologii výroby, o způsobech přepravy a montáže zařízení, o úrovni jeho obsluhy a v neposlední řadě o možných hmotných a společenských následcích poruch a havárií apod. Významným parametrem je také přijatelnost finančních nákladů vynakládaných provozovatelem zařízení na jejich opravu a údržbu.

Při výrobě tlakových nádob a ocelových konstrukcí jsou běžně užívány svarové spoje, přestože bývají zdrojem iniciace trhlin, které mohou vést až k haváriím s vážnými následky, spojenými s hmotnou ztrátou nebo ztrátou lidských životů. Snahou konstruktéra a technologa musí být snížení rizika havárií při užití svarových spojů na minimum. Značná pozornost musí věnována navrhování svarových spojů a volbě vhodné technologie svařování a kontrole jakosti svarových spojů.

## 2 Požadavky kladené na konstrukce včetně tlakových zařízení

### 2.1 Obecné požadavky

Konstrukce musí být navržena pro daný účel a pro předpokládané zatížení, což ovlivňuje výběr vhodného materiálu. Konstrukce musí být navržena a provedena tak, aby [14]:

- 1) byla s požadovanou pravděpodobností schopna užívání k danému účelu po dobu předpokládané životnosti a to s ohledem na pořizovací náklady,
- 2) s odpovídajícím stupněm spolehlivosti odolávala všem zatížením a vlivům, jejichž výskyt lze během výroby a užívání očekávat a měla přiměřenou trvanlivost vzhledem k nákladům na udržování,
- 3) nebyla neopravitelně poškozena neočekávanými událostmi, jakými jsou výbuchy, nárazy, lidské omyly a pod.

### 2.2 Možnosti konstruktéra a technologa

Konstruktér a technolog mají zejména následující nástroje ke splnění uvedených požadavků na konstrukci:

- přiměřený návrh a výpočet konstrukce,
- volba vhodných materiálů,

- konstrukční úpravy vyžádané provozními zkušenostmi,
- vhodná technologie výroby,
- dodržování předepsaného výrobního postupu,
- systém zabezpečování jakosti,
- stanovení podmínek pro provoz konstrukce,
- návrh metod a rozsahu nedestruktivních kontrol během provozu,
- návrh diagnostického systému,
- stanovení podmínek řízeného stárnutí konstrukce.

Přiměřenost návrhu, výpočtu a technologie výroby je také ovlivněna požadavky zákazníka, k jakému účelu zařízení požaduje. Např. zařízení vyráběné pro práci za nízkých teplot v sibiřských podmínkách by bylo příliš drahé pro použití v našich zeměpisných podmínkách. Souvisí s tím jak výběr materiálu, tak konstrukční řešení extrémně namáhaných detailů, zejména svarových spojů. Pro práci za extrémně nízkých teplot by mnohé svařence musely být nahrazeny výkovky nebo odlitky (i za cenu nižší pevnosti), které však neobsahují zbytková napětí po svařování a mohou být tvarovány tak, aby minimálně narušovaly silový tok. Mnohá zařízení z oceli totiž nelze celá vyžíhat na snížení úrovně zbytkových napětí a nebo přetížít za zvýšených teplot, aby se zbytková napětí po svařování redistribuovala (přemístila) do oblastí s nižší úrovní napětí. Redistribuce napětí nastane díky lokálním plastickým deformacím vzniklým při přetížení, které se po odlehčení nevrátí na nulu, ale představují „klíny“ vložené do konstrukce, vyvolávající vhodné nové pole zbytkových napětí. Takto vytvořená nová pole zbytkových napětí mohou mít dokonce opačné znaménko (ne velikost), než pole napětí od běžného zatížení. Materiál při přetížení musí být dostatečně houževnatý, aby v něm nevznikly trhliny, např. v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje, anebo dříve vzniklé defekty při přetížení nevyrostly nad nepřipustnou velikost.

Odolnost konstrukce vůči koroznímu prostředí se dá ovlivnit jak použitím vhodného plátování nebo návaru na povrchu základního materiálu, tak úpravou chemického složení média.

Výběr materiálu závisí na úrovni namáhání, rychlosti zatěžování, teplotě, při které bude zatěžován, na vlivu prostředí, ve kterém bude zatěžován a na citlivosti materiálu vůči těmto vlivům. Musí být také respektovány podmínky svařitelnosti materiálů.

Konstrukční úpravy mají vliv na životnost konstrukce, na odolnost proti porušení materiálu křehkým lomem a vlivem korozního prostředí. Např. zvětšením poloměru zaoblení, plynulým vybroušením přechodu v oblasti svarového spoje poklesne úroveň napětí a pružně-plastické deformace v tomto lokálním místě. O životnosti konstrukce při opakovaném zatěžování totiž rozhodují lokální oblasti s vysokou úrovní proměnné úrovně napětí a pružně-plastické deformace. U takto namáhaných konstrukcí je nevhodné používat neprůvary ve svarech a nebo vyztužení přivařená koutovým svarem. Štěrba mezi plechy nebo pásnicemi totiž představuje trhlinu, i když s počátečním malým zaoblením na čele. Při určité úrovni napětí a zadaném počtu cyklů zatížení je dokonce použití některých typů svařenců již předem vyloučeno. Pokud bychom je chtěli přesto použít, bylo by třeba volit vhodné poměry spojovaných tlouštěk stěn, vybrousit plynulé přechody svarů, odstranit nepřipustné defekty a zejména dostatečnou životnost svařence prokázat experimentálně únavovými zkouškami.

Dodržení předepsaného výrobního technologického postupu včetně postupu svařování významně ovlivní bezpečnost a spolehlivost konstrukce, ovlivní totiž strukturu materiálu, rozložení a množství defektů, zejména v oblasti svarových spojů. Je třeba dodržovat předepsané metody svařování, použité základní a přídatné materiály a jejich rozměry, polohy svařování, úkosy, postup kladení housenek a vrstev, tepelné zpracování, vysoušet elektrody,

vhodným způsobem upevnit části svařence před a v průběhu svařování, použít potřebné přísady na opracování dosedacích ploch a pod.

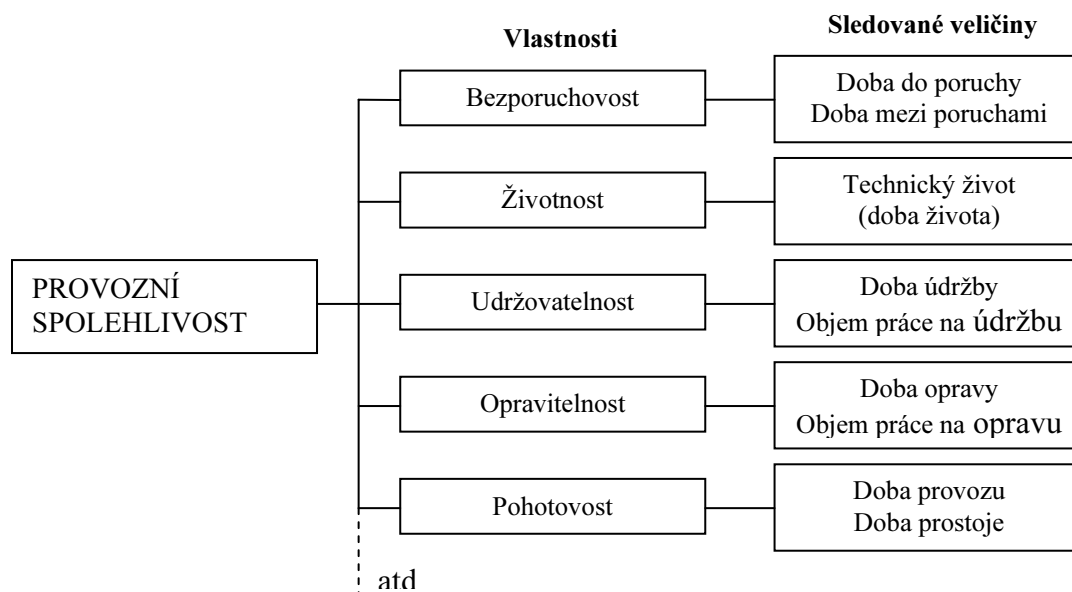
Požadovanou jakost výrobku nelze dosáhnout bez uplatnění systému zabezpečování jakosti, kdy každý zná rozsah zodpovědnosti, pravomocí a je dostatečně vyškolen pro činnosti, které má vykonávat. Musí být uplatňován systém kontrol a nápravných opatření.

Nedestruktivní zkoušky ve výrobě umožní vytvořit mapy defektů po svařování. Uchování výsledků těchto „nulových“ zkoušek má velký význam při určování zbytkové životnosti konstrukce během provozu po následných předepsaných nedestruktivních kontrolách během plánovaných odstávek zařízení.

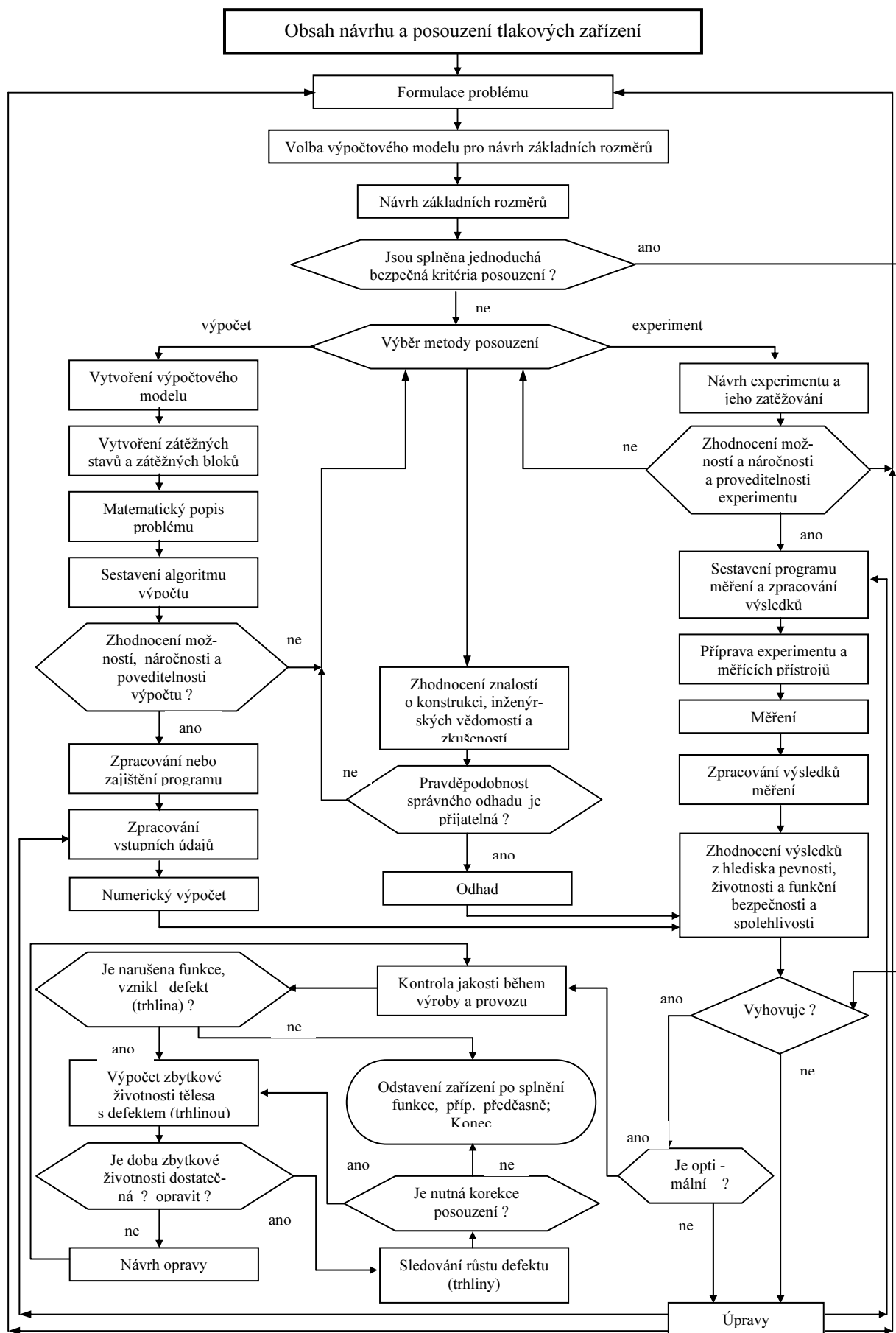
Dodržováním předepsaného způsobu používání konstrukce ovlivní uživatel (majitel) její skutečnou provozní spolehlivost. K průběžnému hodnocení postupného poškozování materiálu konstrukce napomohou diagnostické systémy, pracující ON-LINE nebo OFF-LINE. Jejich součástí je sběr a ošetření dat o vlivu média a odezvě materiálu na zatížení (teplota a rychlost proudění média, tlak média, úroveň hladiny média, teplota kovu, lokální napětí a deformace, rychlost zatěžování a pod.) a jejich průběžná analýza systémy ON-LINE nebo experty pomocí systémů OFF-LINE po předepsané době provozu. Diagnostické systémy umožní získat údaje o skutečných zatíženích za provozu zařízení. Závěry z jejich analýzy jsou podkladem pro řízené stárnutí zařízení.

### 2.3 Provozní spolehlivost konstrukcí včetně tlakových nádob

Provozní spolehlivost se dle ČSN 010102 chápe jako obecná vlastnost (schopnost) výrobku plnit po stanovenou dobu požadované funkce při zachování provozních parametrů výrobků daných technickými podmínkami. Tato schopnost závisí na mnoha činitelích, jako např. na jakosti projekce, konstrukce, výrobního provedení, montáže, dodržení předepsaných provozních podmínek, předpisů pro obsluhu, údržbu a opravy. Velkou důležitost má také přesná specifikace požadovaných technických, ekonomických a provozních parametrů výrobku, podmínek provozního zatížení, předpisů pro obsluhu a kritérií poruch. Provozní spolehlivost se popisuje dílčími vlastnostmi, sledovanými veličinami a jejich parametry, jak je ukázáno na obr. 2.1.



Obr. 2.1.



Obr. 2.2



## 2.4 Základní algoritmus návrhu, posuzování tlakových nádob a kontroly jejich jakosti během výroby a provozu

Proces návrhu a posouzení pevnosti, životnosti a seismické odolnosti tlakových zařízení musí zaručit jakost výrobku, ovlivněnou kvalitou zpracování projektu, konstrukčních návrhů, výroby, montáže, provozu, kontrol jakosti, údržby a oprav. Je znázorněn na vývojovém diagramu na obr. 2.2 a má zejména obsahovat:

- návrh základních rozměrů tlakového zařízení,
- získání vztahu mezi zatěžujícími účinky, poměrnými deformacemi a vnitřními silovými účinky,
- stanovení mezní podmínky, popisující mezní stavy, které souvisejí s deformací, napjatostí a porušením spojitosti materiálu, ze které je tlakové zařízení vyrobeno,
- kontrolu jakosti tlakového zařízení během výroby a provozu,
- stanovení doby zbytkové životnosti tělesa s defektem a predikci jeho chování během provozu, případně návrh způsobu opravy.

Řešení všech těchto úloh je velmi složitý a náročný proces. Názor, že stačí sledovat kvalitu zařízení pouze během výroby je již překonán. Zejména u zařízení složitých technologických celků se nelze obejít bez hodnocení kvality provozování zařízení. Proto jsou stále více využívány možnosti provozní diagnostiky, která se v poslední době stává významnou součástí systému řízení stárnutí zařízení výrobní jednotky.

## 3 Mechanizmy poškozování materiálu zařízení a jejich matematický popis

### 3.1 Mechanizmy poškozování materiálu

Účinkem provozních zatížení je materiál zařízení výrobní jednotky postupně poškozován. Zatížení je jak mechanického původu (tlak; účinek hmotnosti; síly od potrubních systémů, způsobené tlakem a účinkem vlastní hmotnosti a hmotnosti média; seismické zatížení), tak deformačního původu (teplotní pole, síly vzniklé omezením volné teplotní dilatace potrubních systémů, předpětí a pod.). Působí také vliv prostředí (chemický vliv prostředí, proudění média a pod.). Tento výčet zatížení lze doplnit dalšími vlivy, které způsobí např. teplotní a deformační degradace materiálu, vodíkové zkrěhnutí, lidské chyby a pod.

Proces poškozování materiálu musí být matematicky popsán, aby bylo možné stanovit úroveň jeho poškození. Tento proces je značně složitý a jeho matematický popis je většinou založen na experimentálních zkouškách materiálu. Často se obdrží jednoduché vztahy, např. křivka životnosti typu Wöhlera pro hodnocení poškozování materiálu v oblasti vysokocyklové únavy. Tyto jednoduché vztahy popisují chování materiálu a proces jeho poškozování v makroobjemu materiálu. Nejsou tak dokonalé, aby podrobně popsaly změny ve struktuře materiálu během jeho postupného poškozování při zatížení. Jejich nepřesnost je kompenzována dostatečně vysokými součiniteli bezpečnosti.

Matematické popisy procesu poškození materiálu mají být založeny na postupech uznávaných nebo obhajitelných (nové přístupy) před dozornými orgány a musí být uživatelem osvojeny. Použitelné matematické popisy procesů poškozování materiálů anebo podklady pro jejich vypracování lze např. nalézt v [11],[20], [24], [28] až [30] a [35].

Význačnost jednotlivých degradačních mechanismů je rozdílná u jednotlivých částí zařízení výrobní jednotky. U zařízení výrobní jednotky lze určit, které z degradačních mechanismů je nejvýznačnější poškozují. Zkušeností z provozu zařízení lze využít při výběru čidel diagnostického systému a jejich rozmístění. Význačným mechanismem poškozování materiálu při opakovaném zatěžování bývá nejčastěji únava materiálu, vyvolaná účinky

zatížení mechanického původu a teplotními účinky od proudících médií. Únava materiálu také zahrnuje etapu postupného růstu defektů ponechaných v materiálu, zejména v oblasti svarových spojů. U jiných zařízení, např. u potrubí bez návaru, může být významná eroze. U dalších zařízení anebo v jejich oblastech může být dominantní poškozování korozí (plošnou, důlkovou anebo korozí pod napětím). U reaktorů pracujících v chemickém průmyslu může být nejvýznamnější poškozování vodíkovým zkřehnutím.

Zařízení výrobního bloku a jejich materiál se nejspíše poškodí:

a) náhle:

- \* dosažením mezního stavu plastické únosnosti,
- \* křehkým lomem,
- \* ztrátou stability,
- \* rezonancí, která může být zakončena ztrátou stability a lomem.

b) postupně:

- \* únava (mechanická, teplotní, vibrační, vliv prostředí); etapa do iniciace defektu a etapa jeho růstu;
- \* creep (tečení za zvýšených teplot);
- \* současné působení creepu a únavy;
- \* praskání vlivem prostředí (korozní únava, korozní praskání, vodíkové zkřehnutí);
- \* plošná a lokalizovaná koroze za účinku atmosféry;
- \* erozní a třecí koroze;
- \* teplotní a deformační stárnutí;
- \* mechanické opotřebení.

## 3.2 Matematický popis vybraných mechanismů poškozování materiálu

### 3.2.1 Únava materiálu

a) Vysokocyklová únava

Konstrukční křivka životnosti s lineární závislostí  $\log N - \log \sigma_{a,nom}$ :

$$[N_o]_1 = N_C \left[ \frac{\beta_n \beta_\sigma \sigma_C}{\varphi_w \varphi_s \varphi_f n_\sigma \beta \sigma_{a,nom}} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{FR}} \right) \right]^m \quad (3.1)$$

$$[N_o]_2 = \frac{N_C}{n_N} \left[ \frac{\beta_n \beta_\sigma \sigma_C}{\varphi_w \varphi_s \varphi_f \beta \sigma_{a,nom}} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{FR}} \right) \right]^m$$

Za dovolený počet cyklů  $[N_o]$  se bere menší ze dvou vypočtených hodnot v (3.1). Pro  $n_\sigma \sigma_{a,nom} \leq \beta_n \beta_\sigma \sigma_C / (\varphi_w \varphi_s \varphi_f \beta)$  se bere  $[N_o] = \infty$ . Lomové napětí při uvážení vlivu středního napětí cyklu dle Smitha:

$$\sigma_{FR} = \frac{\sigma_C}{\psi} = \frac{\sigma_C \sigma_{AC}}{\sigma_C - \sigma_{AC}} \quad (3.2)$$

kde:  $\sigma_{a,nom}$  – amplituda nominálního napětí,  $\sigma_C$  – mez únavy pro souměrně střídavý cyklus napětí,  $\sigma_{AC}$  – mez únavy pro mívivý cyklus napětí,  $N_C$  – počet cyklů na mezi únavy,  $\beta_n$  – součinitel vyjadřující vliv jakosti povrch,  $\beta_\sigma$  – součinitel vyjadřující vliv velikosti tělesa,  $\beta$  – součinitel vrubu,  $\varphi_w$  – součinitel vyjadřující vliv svařování na snížení únavové pevnosti,  $\varphi_s$  – součinitel vyjadřující vliv prostředí na snížení únavové pevnosti,  $\varphi_f$  – součinitel vyjadřující vliv radiace na snížení únavové pevnosti,  $n_\sigma$  –

součinitel bezpečnosti vůči napětí,  $n_N$  – součinitel bezpečnosti vůči počtu cyklů,  $\psi = 0$  až  $0,25$  – součinitel závislý na pevnosti v tahu [39].

#### b) Nízkocyklová únava

Díky plastické vratné deformaci  $\varepsilon_{ap, vr}$  (řádově  $10^{-5}$ ) lze následující konstrukční křivku životnosti typu Manson-Coffin (3.3) použít nejen v oblasti nízkocyklové, ale také v oblasti vysokocyklové únavy materiálu. V oblasti vysokocyklové únavy se projeví vliv součinitelů  $\beta_\sigma$  a  $\beta_n$ .

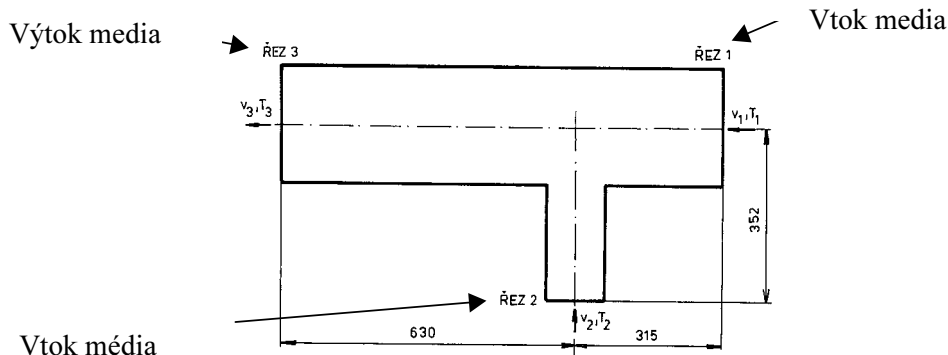
$$\frac{\varepsilon_{at}}{\varphi_w \varphi_s \varphi_f} = \frac{\varepsilon'_f - 0,35 \varepsilon_{p, \max}}{n_\sigma (2[N_o]_1)^{-c}} + \frac{\varepsilon_{ap, vr}}{n_\sigma} + \beta_\sigma \cdot \beta_n \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{n_\sigma} \left[ \frac{1}{(2[N_o]_1)^{-c}} + \frac{\varepsilon_{ap, vr}}{\varepsilon'_f} \right]^{b/c} \quad (3.3)$$

$$\frac{\varepsilon_{at}}{\varphi_w \varphi_s \varphi_f} = \frac{\varepsilon'_f - 0,35 \varepsilon_{p, \max}}{(2n_N [N_o]_2)^{-c}} + \varepsilon_{ap, vr} + \beta_\sigma \cdot \beta_n (\sigma'_f - \sigma_m) \left[ \frac{1}{(2n_N [N_o]_2)^{-c}} + \frac{\varepsilon_{ap, vr}}{\varepsilon'_f} \right]^{b/c}$$

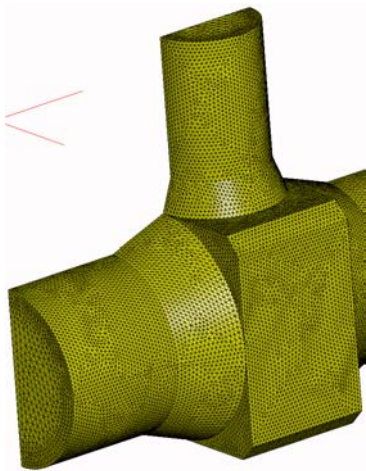
kde:  $\sigma'_f$  - součinitel únavové pevnosti,  $\varepsilon'_f$  - součinitel únavové tažnosti,  $b$  - exponent únavové pevnosti,  $c$  - exponent únavové tažnosti,  $\varepsilon_{at}$  – amplituda celkové poměrné deformace,  $\sigma_m$  – střední nominální napětí cyklu,  $\varepsilon_{p, \max}$  – max. hodnota plastické poměrné deformace. Pro známé hodnoty  $\varepsilon_{at}$ ,  $\sigma_m$ ,  $\varepsilon_{p, \max}$  se za dovolený počet cyklů  $[N_o]$  do iniciace trhliny bere menší z obou hodnot vypočtených z rovnic (3.3).

Součinitel  $\varphi_w = 1$ , pokud  $\varepsilon'_f$ ,  $\sigma'_f$ ,  $b$ ,  $c$  určí zkouškou hladkých vzorků ze svarového spoje, nikoliv pouze ze základního materiálu. Pokud se změní pro základní materiál,  $\varphi_w$  bere se z intervalu  $0,6 \leq \varphi_w < 1$  v závislosti na typu svaru, metodě svařování a následném tepelném zpracování. Součinitel  $\varphi_w$  udává poměr  $\varepsilon_{at, SS} / \varepsilon_{at, ZM}$ , kde  $\varepsilon_{at, SS}$  je amplituda celkové deformace pro  $N_f = 10^4$  cyklu při zkoušce vzorků ze svarového spoje a  $\varepsilon_{at, ZM}$  také pro  $N_f = 10^4$  cyklu, ale ze základního materiálu. Součinitel  $\varphi_s$  se určí experimentálně, součinitel  $\varphi_f$  se vypočte např. dle vztahu uvedeného v [23].

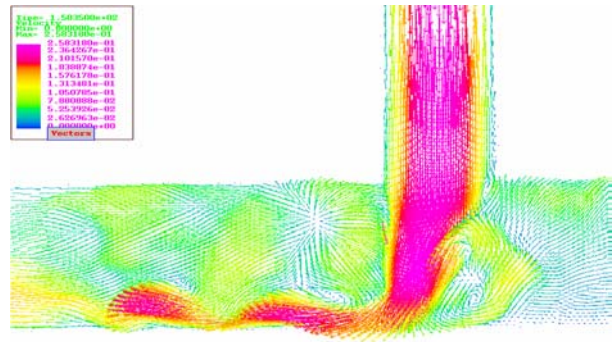
Zvláštním případem je únava při dvoufrekvenčním zatěžování (rezonance, seismicita), např. u potrubních systémů. Návod pro její použití je možné nalézt v [23]. Pro teplotní únavu, vibrační únavu a vliv prostředí je třeba změřit křivky životnosti výše uvedeného typu, avšak za daných podmínek. K teplotní únavě dochází např. v oblasti T kusu potrubního systému při mísení proudících médií o proměnných teplotách [3], obr. 3.1. až obr.3.5. Vliv prostředí se projeví za přítomnosti dostatečné vysoké úrovně chemizmů v médiu.



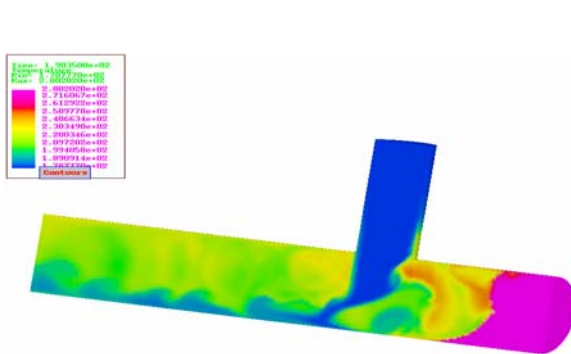
Obr. 3.1. Analyzovaná oblast odbočnice potrubního systému



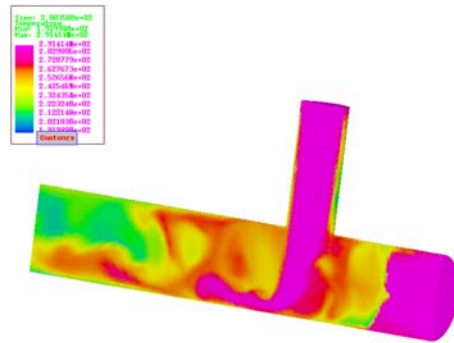
Obr. 3.2. Dělení řešené oblasti na prvky pro výpočet MKP



Obr. 3.3. Ustálený stav, vektory proudu vody



Obr. 3.4. Teplotní pole vodního proudu,  
 $T_2 = 180^\circ\text{C}$ ,  $t = 90.350 \text{ s}$



Obr. 3.5. Teplotní pole vodního proudu  
 $T = 290^\circ\text{C}$ ,  $t = 100.350 \text{ s}$

### 3.2.2. Korozní praskání pod napětím

#### a) Podmínky vzniku koroze pod napětím

Poškození materiálu zařízení za koroze pod napětím představuje degradační mechanismus, vznikající při tak vysoké úrovni napětí za působení korozního prostředí a dané citlivosti materiálu ke korozi pod napětím, že součinitel intenzity napětí  $K_I$  převyšuje prahovou hodnotu  $K_{ISCC}$ , nad kterou nastává zrychlení růstu trhliny za koroze pod napětím, [16] až [19]. Proces koroze pod napětím může poškodit nejen hladký povrch pláště, ale také materiál v oblasti štěrbin, kde podmínky pro iniciaci poškození jsou mnohem příznivější. Jedná se např. o oblast spojení teplosměnné trubky s trubkovnicí nebo kolektorem, anebo o neprovařený kořen v místě spoje pláště se dnem stojaté válcové nádrže [40]. Korozní praskání pod napětím zahrnuje několik mechanismů:

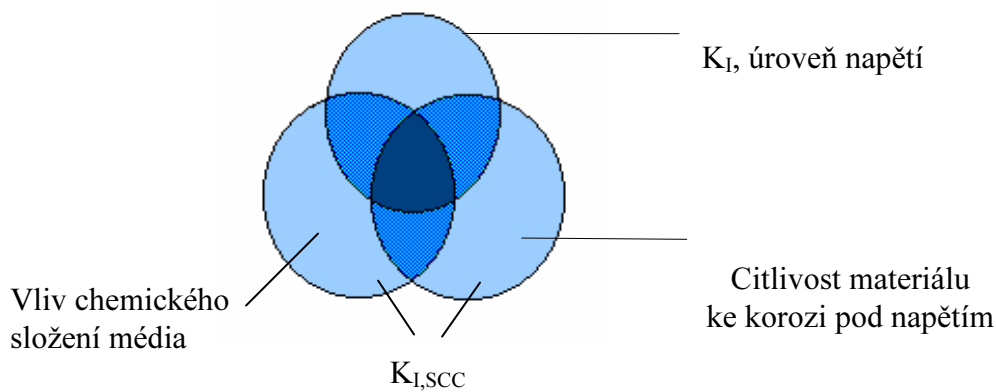
- \* Intergranulární korozní praskání pod napětím (IGSCC) při zcitlivnění oblastí ochuzených o chrom v zónách teplotně ovlivněných svařováním, vysoké úrovně napětí včetně zbytkových po svařování a korozního prostředí daného vysokým obsahem kyslíku nebo jiných kontaminantů.

- \* Transgranulární korozní praskání pod napětím (TGSCC) obvykle za přítomnosti halogenidů a sulfidů, není nutně ovlivněno zcitlivněním hranic zrn, je však ovlivněno vysokým lokálním zbytkovým napětím po svařování nebo lokální deformací za studena.
- \* Korozní praskání pod napětím za přítomnosti chloridů obsažených v korozním prostředí (ECSCC) vznikem elektrochemické reakce způsobené korozním prostředím za vysokého napětí a vlivu mikrostruktury materiálu na jeho zcitlivnění.

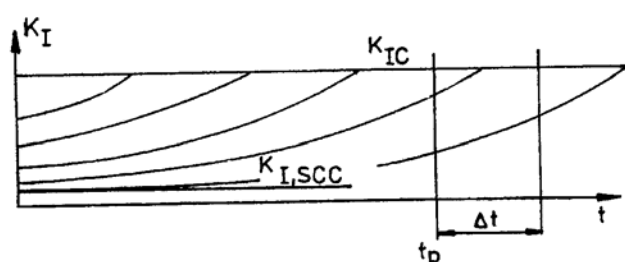
K parametrům majícím vliv na vznik procesu koroze pod napětím náleží zejména:

- (1) úroveň napětí a jeho změna v čase;
- (2) chemické složení média;
- (3) citlivost materiálu ke korozi pod napětím;
- (4) tlak média;
- (5) teplota média.

Obvykle se vliv prvních tří parametrů, uváděných jako nejvýznamnějších, znázorňuje množinami, obr. 3.6. Pokud jsou všechny tři parametry přítomny a to na takové úrovni, že  $K_I \geq K_{I,SCC}$ , nastanou podmínky vhodné pro korozi pod napětím. Pokud alespoň jeden z těchto tří parametrů chybí, ke korozi pod napětím nedojde. Úroveň napětí a velikost přítomné vady (trhliny) ovlivní velikost součinitele intenzity napětí  $K_I$ . Obecně lze napsat, že  $K_I = \sigma Y \sqrt{\pi a}$ . Vliv chemického prostředí a citlivosti materiálu ke korozi pod napětím se projeví na velikosti kritické hodnoty součinitele intenzity napětí  $K_{I,SCC}$ . Podmínky experimentálního stanovení hodnoty  $K_{I,SCC}$  jsou dány příslušným předpise. Obecně lze říci, že se jedná o tak nízkou počáteční hodnotu  $K_I$ , která s dostatečnou časovou rezervou  $\Delta t$  nedosáhne za předpokládanou dobu technického života zařízení  $t_p$  hodnoty lomové houževnatosti  $K_{IC}$ , obr. 3.7. Křehký lom za působení korozního prostředí totiž nastane, až když  $K_I$  dosáhne hodnoty lomové houževnatosti  $K_{IC}$ . Korozní prostředí přitom urychlí růst trhliny a tím zkrátí dobu, během které  $K_I$  hodnoty  $K_{IC}$  dosáhne.



Obr.3.6.



Obr. 3.7.

Při výpočtu napětí, použitých k prokázání odolnosti materiálu proti jeho porušení za koroze, se uvažují skutečná zatížení a jejich změny v čase, změřené řídicím a instrumentačním systémem (I and C) a monitorovacím a diagnostickým systémem (MDS). Pokud nejsou tyto údaje dostupné, lze vzít projektové zatížení. Pro výpočet napětí v následném období lze vzít zatížení změřené systémy I and C a MDS za obdobné předchozí období. Při jejich nedostupnosti lze vzít projektové zatížení s počtem opakování úměrným předpokládané době provozu.

Obecně lze dobu, po kterou na materiál zařízení působí chemické příměsi v prostředí, rozdělit na:

- (1) najetí na nominální výkon výrobní jednotky;
- (2) nominální výkon výrobní jednotky;
- (3) přechodové režimy s počátkem a návratem na nominální výkon výrobní jednotky;
- (4) odstavení výrobní jednotky do chladného stavu;
- (5) technologická odstávka v chladném stavu.

Pro hodnocení odolnosti materiálu proti poškození korozí pod napětím jsou nejvýznamnější:

- (a) nominální výkon výrobní jednotky;
- (b) přechodové režimy, během kterých se obsah chemických příměsí v médiu zvýší nad přípustné limity.

Příznivé podmínky pro poškození povrchu materiálu korozí mohou nastat během technologických odstávek v chladném stavu. Po převážnou dobu provozu bývá výrobní jednotka v energetice, chemickém nebo petrochemickém průmyslu provozována na nominálním výkonu, kdy napětí se mění nevýznamně. Pokud během ní nastanou podmínky vhodné pro korozi pod napětím, jedná se o korozi praskání. Doba, po kterou vznikají přechodové režimy se změnou zatížení a vlivu prostředí obvykle nepřekročí 5 % z celkové doby provozu, a to včetně doby najetí na 100 % výrobní jednotky a její odstavení do chladného stavu.

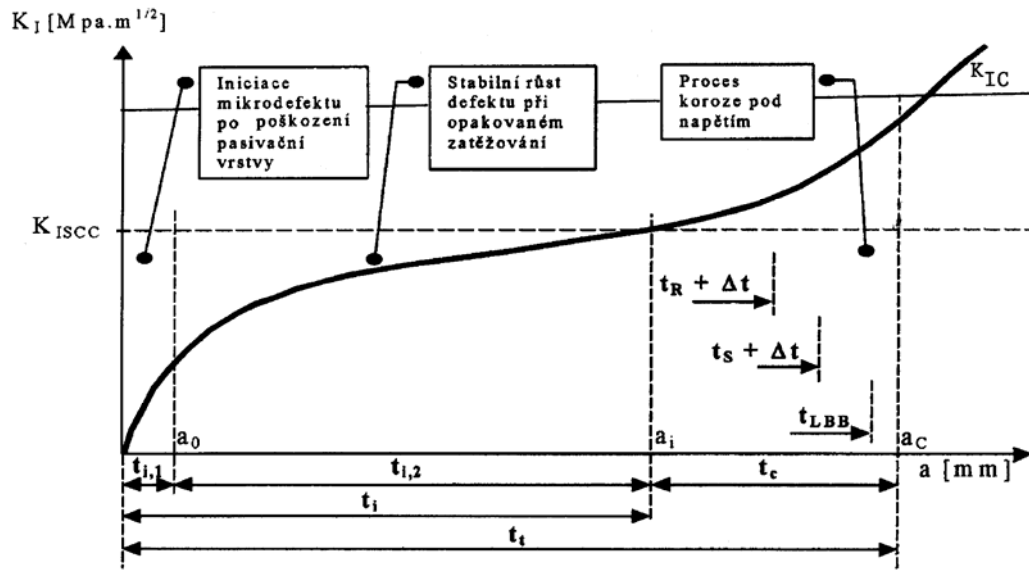
Při hodnocení odolnosti materiálu zařízení proti poškození korozí pod napětím se určuje:

- (1) doba  $t_i$  do iniciace defektu schopného růstu za koroze pod napětím;
- (2) doba  $t_c$  růstu defektu za podmínek koroze pod napětím, přičemž se rozlišuje:
  - (a) korozi praskání při neměnném teplotně-mechanickém namáhání,
  - (b) korozi únavy při proměnném teplotně-mechanickém namáhání (je třeba uvažovat cykly napětí se součinitelem asymetrie  $r > 0,65$  a frekvencí  $f > 0,017 \text{ s}^{-1}$ ).

#### ***b) Doba do poškození materiálu za koroze pod napětím***

Po výrobě lze povrch tělesa považovat za nepoškozený s hloubkou defektu blízkou nule,  $a = 0$ . Za působení napětí v materiálu a korozi prostředí se povrch tělesa včetně jeho pasivační vrstvy postupně poškozuje, až se vytvoří mikrodefekt o hloubce  $a_0$ . Následné působení korozi prostředí a napětí vede k dalšímu růstu mikrodefektu do velikosti makrodefektu  $a_i$ , kterému odpovídá součinitel intenzity napětí  $K_I = K_{ISCC}$ . Růst defektu může urychlit proměnná změna napětí. Po dosažení podmínky  $K_I \geq K_{ISCC}$  se rychlost růstu defektu značně urychlí vlivem iniciovaného mechanismu poškození materiálu za koroze pod napětím. Tento mechanismus se uplatňuje jak za pomalé změny úrovně napětí (cca  $d\epsilon/dt < < 10^{-3}$ ), kdy se jedná o korozi praskání, tak za častější změny napětí, kdy se jedná o korozi

únavu. Schematicky je proces poškozování tělesa za koroze pod napětím ukázán na obr.3.8, [40].



Obr. 3.8.

Dobu do vzniku defektu o velikosti  $a_0$  lze označit  $t_{i,1}$ , dobu růstu defektu z  $a_0$  na  $a_i$  lze označit  $t_{i,2}$ . Celková doba do iniciace procesu koroze pod napětím je:

$$t_i = t_{i,1} + t_{i,2} \quad (3.4)$$

Doba procesu koroze pod napětím do vzniku kritické velikosti defektu  $a_c$  je označena  $t_c$ . Celková doba  $t_t$ :

$$t_t = t_{i,1} + t_{i,2} + t_c \geq (t_p \text{ nebo } t_R \text{ nebo } t_{LBB}) + \Delta t \quad (3.5)$$

musí být delší, než doba předpokládaného technického života zařízení  $t_p$ , případně doba do připravované opravy  $t_R$  plus časová rezerva  $\Delta t$ , vyjadřující bezpečnostní přírůstek času. Doba provozu může být ohraničena průnikem rostoucí trhliny na druhý povrch, který by mohl nastat v čase  $t_{LBB} < t_c$ , kdy nastane průsak média.

Celý proces poškozování materiálů za koroze pod napětím lze rozdělit do tří následujících etap:

### (1) Etapa iniciace mikrodefektu o hloubce $a_0 \approx 0,05 \text{ mm}$

Mikrodefekt o hloubce  $a_0 \approx 0,05 \text{ mm}$  [17] může např. v austenitické oceli vzniknout chemickým působením média jako důlek (pitting) nebo povrchová únavová trhлина při proměnném zatěžování.

Při chemickém působení média lze dobu do vzniku mikrodefektu o hloubce  $a_0 \approx 0,05 \text{ mm}$  určit např. ze vztahu:

$$t_{i,1} = C_{t1} [\text{Cl}^-]^{-m_1} (V_{\text{cor}} - V_c)^{-m_2} \quad (3.6)$$

Pro dané prostředí a daný materiál lze korozní potenciál  $V_{\text{cor}}$  a kritický potenciál  $V_c$  určit ze vztahu stanovených experimentálně:

$$V_c = (a_1 + b_1 \sigma) + (a_2 + b_2 \sigma) \ln [\text{Cl}^-] \quad [\text{MPa, ppm; mV}] \quad (3.7)$$

a) v závislosti na obsahu kyslíku:

$$V_{\text{cor}} = c_0 + c_1 [\text{O}_2] + c_2 [\text{O}_2]^2 + c_3 [\text{O}_2]^3 \quad [\text{ppb; mV}] \quad (3.8)$$

b) v závislosti na obsahu iontu mědi:

$$V_{\text{cor}} = c_0 + c_1 \ln [\text{Cl}^+] \quad [\text{ppb}; \text{mV}] \quad (3.9)$$

Konstanty  $C_{t1}$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  a exponenty  $m_1$  a  $m_2$  je třeba určit experimentálně zkouškou vzorků z daného materiálu a v daném prostředí. U experimentálně určených číselných hodnot konstant, použitých ve vztazích (3.6) až (3.9), je třeba uvést oblast přípustného použití. Funkce (3.6) až (3.9) mohou obecně mít jiný tvar a záviset na jiných parametrech. Napětí  $\sigma$  v (3.7) působí kolmo na rovinu, ve které mikrodefekt leží.

**(2) Etapa růstu defektu z velikosti  $a_0$  za podmínek, že součinitel intenzity napětí  $K_I < K_{\text{ISCC}}$ .**

Tato etapa je zakončena dosažením  $K_I = K_{\text{ISCC}}$ , čemuž odpovídá makrodefekt o hloubce  $a_i$ . Růst defektu z velikosti  $a_0$  na velikost  $a_i$  může být kromě vlivu chemických příměsí a úrovně napětí také ovlivněn proměnným napětím. V případě, že bude zjištěna rychlost změny deformace  $\dot{\epsilon} > 10^{-3}$ , je třeba vliv proměnného zatížení uvážit.

**(a) Neměnné napětí,  $\dot{\epsilon} < 10^{-3}$**

Pro výpočet doby  $t_i$  do dosažení makrodefektu o velikosti  $a_i$  při působení chemických příměsí a neměnném napětí ( $\dot{\epsilon} \leq 10^{-3}$ ) lze např. použít vztah:

$$t_i = t_{i,1} + t_{i,2} = t_{i,1} + t_{i,1} \left( \frac{a_3}{\sigma^2} - 1 \right) = t_{i,1} \frac{a_3}{\sigma^2} \quad (3.10)$$

kde  $\sigma$  je napětí na poškozovaném povrchu, působící kolmo na rovinu defektu.

Průměrnou rychlost růstu defektu v etapě iniciace při neměnném napětí lze vyjádřit vztahem:

$$v_i = C_{t2} [\text{Cl}^-]^{m_1} (V_{\text{cor}} - V_c)^{m_2} \quad [\text{ppm}, \text{mV}; \text{mm/s}] \quad (3.11)$$

Při této rychlosti dosáhne defekt v čase  $t$  velikosti:

$$a = a_0 + v_i (t - t_{i,1}) \quad (3.12)$$

Konstanty  $C_{t2}$   $a_3$  je třeba určit experimentálně na vzorcích z daného materiálu a v daném prostředí. Pro danou velikost defektu  $a$  lze vypočítat hodnotu součinitele intenzity napětí  $K_I$  a porovnat ji s prahovou hodnotou  $K_{\text{ISCC}}$ . To zpětně umožní korigovat vztah (3.10) a následujícím postupem zpřesnit dobu  $t_{i,2}$ :

- 1) Pro danou úroveň napětí v oblasti defektu určit z podmínky  $K_I = K_{\text{ISCC}}$  hodnotu  $a_i$ .
- 2) Pomocí (3.12) určit dobu  $t_{i,2}$ :

$$t_{i,2} = \frac{a_i - a_0}{v_i} \quad (3.13)$$

**(b) Napětí se mění,  $\dot{\epsilon} > 10^{-3}$**

Cyklická změna napětí způsobuje růst defektu. Za jeden cyklus se defekt zvětší o hodnotu:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_I)^m \quad (3.14)$$

Nechť za čas  $t_{i,2}$  se každý  $k$ -tý typ cyklu opakuje  $n_j$  krát, potom defekt vyrostl o hodnotu:



$$a_i - a_o = \sum_{j=1}^k n_j \left( \frac{da}{dN} \right)_j \quad (3.15)$$

Přírůstek defektu o hodnotu  $\left( \frac{da}{dN} \right)_j$  bude určován průběžně po proběhnutí každého z cyklů. Potom při současném působení chemických příměsí a proměnného napětí vztah (3.16) nabude tvaru:

$$a_i - a_o = v_i t_{i,2} + \sum_{j=1}^k f_j t_j \left( \frac{da}{dN} \right)_j \quad (3.16)$$

kde  $f_j$  je frekvence  $j$ -tého typu cyklu, který probíhá po dobu  $t_j$ . Celková doba  $t_{i,2} = t_1 + t_2 + \dots + t_j + \dots + t_k$ .

### (3) Etapa růstu defektu za koroze pod napětím

Růst defektu za koroze pod napětím má být posuzován expertním přístupem OFF-LINE. Pokud během provozu třeba také krátkodobě nastanou podmínky vhodné pro růst defektu za koroze pod napětím, lze použít postup hodnocení popsany níže. Defekt o počáteční hloubce  $a_i$  roste za koroze pod napětím, pokud je splněna podmínka:

$$K_I \geq K_{ISCC} , \quad (3.17)$$

kde součinitel intenzity napětí  $K_I$  se vypočte pomocí vztahů lomové mechaniky.

Růst defektu za koroze pod napětím je pro bainitické oceli ohraničen dovolenou hloubkou defektu  $[a] = a_c/n_{KL}$ , kde  $n_{KL}$  je součinitel bezpečnosti. Přitom se defekt může zvětšit o hodnotu  $\Delta a = [a] - a_i$ . U dílů z austenitických ocelí a u antikorozičních návarů lze růst defektu ohraničit dosažením povrchu stěny, tj. průnikem média stěnou o tloušťce  $s$ . Přitom se defekt může zvětšit o hodnotu  $\Delta a = s - a_i$ . Prostá pevnost je zaručena, pokud zbývající průřez přenese zatížení mechanického původu.

Doba růstu defektu za koroze pod napětím se vypočte ze vztahu:

$$t_c = \frac{\Delta a}{v_c} \quad (3.18)$$

U stěn tvořených různými druhy ocelí, včetně antikorozičního návaru, se vypočte doba růstu  $t_{ci}$  každou z rozdílných částí, přičemž se použije hodnota  $\Delta a$ , určená výše. Potom celková doba růstu defektu celou stěnou je dána součtem:

$$t_c = \sum_{i=1}^k t_{ci} , \quad (3.19)$$

kde  $k$  je počet rozdílných vrstev stěny, kterými může růst defekt rozdílnou rychlostí o celkovou hodnotu  $\Delta a$  za koroze pod napětím.

Rychlost růstu defektu za koroze pod napětím se vypočte ze vztahů:

(1) Pro bainitické oceli

(a) Korozní praskání

$$v_c = C_c (K_I)^{m_c} = F(K_I, O_2 \text{ nebo } V_{cor}, S) \quad [\text{mm/s}] \quad (3.20)$$

(b) Korozní únava

$$v_c = \frac{da}{dN} f = f C_c (\Delta K_I)^{m_c} = F(\Delta K_I, K_{I,\min}/K_{I,\max}, f, O_2 \text{ nebo } V_{\text{cor}}, S) \quad [\text{mm/s}] \quad (3.21)$$

(2) Pro austenitické oceli

(a) Korozní praskání

$$v_c = C_c (K_I)^{m_c} = F(K_I, O_2 \text{ nebo } V_{\text{cor}}, K_e, \text{EPR}) \quad [\text{mm/s}] \quad (3.22)$$

(b) Korozní únava

$$v_c = \frac{da}{dN} f = f C_c (\Delta K_I)^{m_c} = F(\Delta K_I, K_{I,\min}/K_{I,\max}, f, O_2 \text{ nebo } V_{\text{cor}}, K_e, \text{EPR}) \quad [\text{mm/s}] \quad (3.23)$$

Konstanta  $C_c$  a exponent  $m_c$  ve vztazích (3.20) až (3.23) se určí experimentálně, např. ve shodě s postupem NTD A.S.I., Sekce V [19]. Ve vztazích (3.20) až (3.23) značí:  $O_2$  – obsah kyslíku [ppb],  $f$  – frekvence [Hz],  $K_e$  – součinitel elektrické vodivosti prostředí [mV], EPR – elektrochemická potenciokinetická reaktivace [ $\text{C cm}^{-2}$ ],  $S$  – obsah síry [%].

Při proměnné rychlosti růstu defektu tloušťkou stěny se určí:

Doba růstu defektů  $t_c$  při korozním praskání:

$$t_c = \int_{a_i}^{a_L} \frac{da}{C_c (K_I)^{m_c}} \quad [\text{s}] \quad (3.24)$$

Doba růstu defektů  $t_c$  při korozní únavě:

$$t_c = \int_{a_i}^{a_L} \frac{da}{f C_c (\Delta K_I)^{m_c}} \quad [\text{s}] \quad (3.25)$$

U bainitických ocelí je horní mez integrálů v (3.24) a (3.25) vzata  $a_L = \min \{[a]; s\}$  a u austenitických ocelí  $a_L = s$ . U stěn z ocelí různého typu se postupuje ve shodě s (3.19).

### 3.2.3. Poškození materiálu vodíkovým zkřehnutím

V reaktorech na výrobu čpavku dochází k difusi vodíku do materiálu. K obdobnému procesu může docházet také u dalších zařízení v chemickém průmyslu, případně při svařování nevysušenými elektrodami. Při pozvolném ochlazování stěny nádoby vodík postupně vydifunduje z materiálu ven, ne však úplně z oblasti čela trhlin (vodíková past). Pokud rychlost ochlazování stěny tlakové nádoby je větší než cca 25 °C/hod., nestačí vodík z materiálu vydifundovat. Shromažďuje se v dutinách, které při poklesu teploty stěny tlakové nádoby pod 100 °C svoji rozpínavostí při změně v molekulární formu namáhá tlakem. Při teplotě pod 100 °C totiž přechází vodík z atomární formy do molekulární, která má větší objem. Dochází k rychlému růstu trhlin, zejména při napětí kolmém na rovinu trhliny nad 0,7  $R_{p0,2}$ . Na lomové ploše je zjišťován podíl interkrystalického lomu, přičemž k dolomení dochází transkrystalickým lomem s typickou jamkovou morfologií.

Mechanismus poškozování materiálu vodíkovým zkřehnutím je dle [12] a [13] značně teplotně ovlivnitelný a lze tvrdit, že k degradaci materiálu vlivem přítomnosti vodíku, difusně absorbovaného ve struktuře materiálu, může dojít při splnění tří následujících základních podmínek:

- 1) materiál tlakové nádoby je ochlazován rychlostí vyšší než 25 °C/hod.;

- 2) teplota v dané oblasti materiálu se nachází v rozmezí od 20 °C do 200 °C;
- 3) napětí kolmé na rovinu trhliny dosahuje úrovně vyšší než cca 0,7  $R_{p0,2}$  včetně zbytkových napětí po svařování.

Doba do porušení vzorků vyrobených ze základního materiálu a tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje, namáhaných konstantním zatížením, lze vypočítat ze vztahu:

$$t_p = B \cdot \sigma_o^b, \quad (3.26)$$

kde  $\sigma_o$  je působící napětí,  $B$  a  $b$  jsou konstanta a exponent, určeny experimentálně.

#### (a) Prahová hodnota součinitele intenzity napětí ve vodíkovém prostředí

Schematicky je růst trhliny s nadifundovaným vodíkem ukázán na obr. 9.1. K růstu trhliny dochází, pokud okamžitá hodnota součinitele intenzity napětí  $K_I$  překročí prahovou hodnotu součinitele intenzity napětí  $K_{ISH}$ . Hodnota  $K_{ISH}$  je závislá na teplotě a dle Gerbericha ji lze vyjádřit vztahem:

$$K_{ISH} = \frac{R \cdot T}{A \cdot V^*} \ln \left( \frac{c_{krit}}{c_o} \right) - \frac{R_{p0,2}}{2A}, \quad (3.27)$$

kde:

$R$  – univerzální plynová konstanta, [J/(mol. K)],

$T$  – teplota materiálu, [K],

$A$  – konstanta, pro ocel 15 421.9 bylo změřeno

$$A = 0,4 \text{ [mm}^{-0,5}\text{]},$$

$V^*$  - parciální molekulární objem vodíku v procesní zóně, [m<sup>3</sup>/mol],

$c_o$  – obsah difusního vodíku v mřížce, [-],

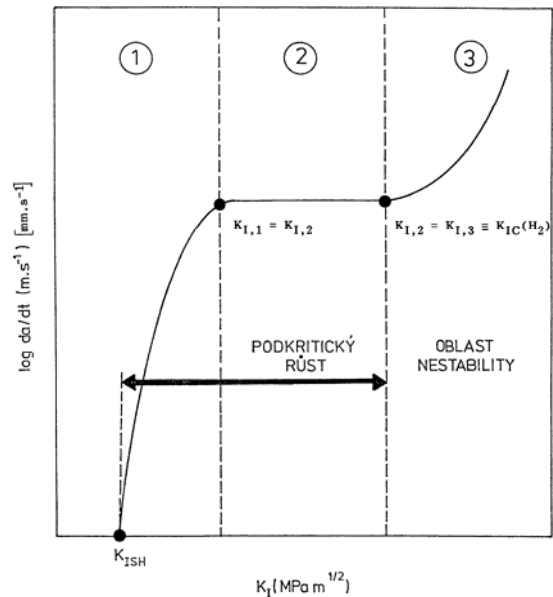
$c_{krit}$  - kritický obsah vodíku v procesní zóně, [-].

#### 3.3 (b) Růst trhliny v materiálu ve vodíkovém prostředí

Všeobecně se přijímá, že korozní trhlina iniciovaná vodíkem roste s druhou mocninou:

$$\frac{da}{dt} = C \left[ \frac{K_I}{K_{ISH}} - 1 \right]^2, \text{ [mm/s]} \quad (3.28)$$

kde konstanta  $C \approx 10^{-5}$  [mm.s<sup>-1</sup>].



Obr. 3.9.

Obecně lze rychlost růstu trhliny v materiálu s nadifundovaným vodíkem ve všech třech fázích, ukázaných na obr. 3.9, vyjádřit následujícími vztahy, použitelnými pro stav rovinné deformace:

- 1) pro 1. fázi dle obr. 3.9

$$\frac{da}{dt} = \frac{2(1-\mu)}{3} \frac{1}{d^{1,5}} \left[ D_o \exp \left( -\frac{Q}{R \cdot T} \right) \right] \frac{V^*}{R \cdot T} \frac{c_o}{c_{krit} - c_o} (K_I - K_{ISH}), \quad (3.29)$$

2) pro 2. fázi dle obr. 3.9

$$\frac{da}{dt} = \frac{4,5}{d} \left[ D_o \exp\left(-\frac{Q}{R.T}\right) \right] \frac{V^*}{R.T} R_{p0,2} \frac{c_o}{c_{krit} - c_o}, \quad (3.30)$$

3) pro 3. fázi dle obr. 3.9

$$\frac{da}{dt} = \frac{4,5}{E \cdot d^2 \cdot R.T} \left[ D_o \exp\left(-\frac{Q}{R.T}\right) \right] \frac{c_o}{c_{krit} - c_o} (K_I - K_{ISH})^2, \quad (3.31)$$

kde:

d – lineární průměr primárního austenitického zrna, [m],

$D_o$  – difúzní koeficient vodíku, [ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],

Q - aktivační energie pro difúzi vodíku v  $\alpha$  - mřížce, [J/mol],

$\mu$  - Poissonovo číslo.

## 4 Systém řízeného stárnutí zařízení výrobní jednotky

### 4.1 Význam systému řízeného stárnutí zařízení výrobní jednotky

Materiál a funkce zařízení jsou během provozu průběžně poškozovány. Mohou však být poškozeny také náhle. V době zpracování projektu zařízení nemusí být známy všechny požadavky zákazníka a stejně tak skutečné provozní podmínky. Během technického života zařízení se požadavky na ně kladné budou vyvíjet. Mnohdy může být doba, po kterou se mělo zařízení bezpečně, spolehlivě a za přijatelných nákladů, vynakládaných na údržbu a opravy, prodloužena nad dobu předpokládanou v projektu. Jedná se zejména o zařízení pracující na klasických a jaderných elektrárnách, v chemickém a petrochemickém průmyslu a potravinářském průmyslu, [1], [15] a [26]. Původně předpokládaná doba provozu např. 30 let rychle uběhne a přitom vyvstane otázka, zda zlikvidovat zařízení a za jakou cenu, zda postavit zařízení založené na nových moderních technologiích anebo během provozu cíleně řídit stárnutí materiálu a funkce zařízení. Modernizace zařízení, je-li ekonomicky přijatelná, má umožnit splnění kritérií bezpečnosti definovaných v období provozu zařízení. Ekonomické analýzy a hlediska minimalizace poškozování přírody musí být vzaty v úvahu také.

U výrobních jednotek, výše jmenovaných průmyslových odvětví, je účelné nasadit systém řízeného stárnutí již při jejich prvním uvedení v činnost. Budou tak odstraněny pochybnosti o stavu zařízení před pozdějším nasazením takového systému.

Součástí systému řízeného stárnutí zařízení výrobní jednotky je vytvoření Katalogu mechanismů stárnutí materiálu, způsobujících jeho postupné poškozování v provozních podmínkách. Musí se vztahovat na všechna zařízení zahrnutá do systému řízeného stárnutí. Vypracovaný přehled musí poskytovat zejména následující závěry:

- 1) Systém řízeného stárnutí je proveditelný a plně provozuschopný;
- 2) Existují oblasti, pro které musí být použita přiměřená opatření;
- 3) Některá používaná opatření pro údržbu nejsou podložena zákonem nebo vyhláškou a proto mohou být vynechána.

Základní program musí být zpracován sdruženou pracovní skupinou všech potřebných profesí, využívajících následující kritéria a metody:

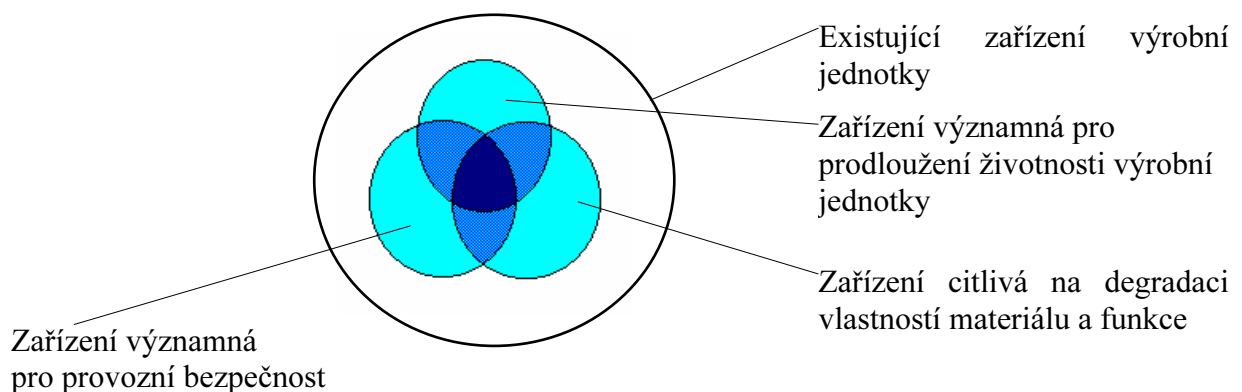
- 1) Kritéria a metody použité pro popsání systému budou brát ohled na požadovanou úroveň provozní bezpečnosti;
- 2) Katalog fenoménů stárnutí materiálu obsahující informace o jejich iniciaci a hlavních vlivech a kritéria pro identifikaci kritických oblastí zařízení. Katalog mechanismů poškození musí být založen na zkušenostech a znalostech, které budou periodicky zdokonalovány s rozvojem nových poznatků. Při revizích je vyžadována inovace zkoušek zařízení, podléhajících „Programu stárnutí/životnosti zařízení“. Pro zkoušky a opravy budou využívány nové poznatky vědy a výzkumu.
- 3) Normativně technickou dokumentaci (standards vztahující se k danému typu zařízení), popisující užití katalogu mechanismu stárnutí materiálu pro zkoušky a hodnocení různých typů zařízení.

Řízené stárnutí má význam nejen pro průběžné dosahování úrovně bezpečnosti, ale také pro dosažení provozní spolehlivosti zařízení výrobní jednotky nad dobu původně předpokládanou projektem, např. nad dobu více než 40 let. Toto je významné jak pro provozovatele, tak pro národní ekonomiku. Hluboké znalosti fenoménu stárnutí jsou rozhodující pro každé rozhodnutí zohledňující prodloužení životnosti výrobního bloku.

Doba využití technických schopností výrobní jednotky závisí na prodloužení životnosti omezeného počtu zařízení vzhledem k význačnosti finančních nákladů na jejich opravu a výměnu. Z tohoto důvodu je třeba zařízení výrobní jednotky rozdělit dle následujících kritérií např. do 3 až 4 kategorií, obr. 4.1:

- 1) Zařízení významná pro prodloužení životnosti výrobní jednotky;
- 2) Zařízení významná pro provozní bezpečnost;
- 3) Zařízení citlivá na degradaci vlastností materiálu a funkce;
- 4) Zařízení ostatní.

Do kategorie 1 mají být zařazena zařízení významná pro bezpečnost a provozní spolehlivost, která nejsou zastupitelná, např. reaktor, kompenzátor objemu, parogenerátor, hlavní cirkulační čerpadlo na jaderné elektrárně. Zařízení, která jsou zastupitelná, lze zařadit do kategorie 2. Z přehledu zaříděných zařízení do kategorií musí být zřejmé, že žádné zařízení včetně stavebních konstrukcí, elektrozařízení a točivých strojů nebylo přehlédnuto. Největší rozsah činností souvisejících se systémem řízeného stárnutí je vykonáván pro zařízení zařazená do kategorie 1 a nejmenší pro zařízení zařazená do kategorie 4.



Obr. 4.1. Kritéria pro rozdělení zařízení výrobní jednotky

## 4.2 Návrh struktury

Struktura Programu řízeného stárnutí je graficky znázorněna na obr. 4.2. Prázdný systém je použitelný pro komponenty všech zařízení výrobního bloku. Při jeho implementaci pro daný výrobní blok musí být naplněn daty vztahujícími se k tomuto výrobnímu bloku. Musí být také napojen na příslušné databáze datových skladů provozovatele zařízení, jak je ukázáno v horní části schématu na obr. 4.2. Některé ze zásad budování systému jsou popsány ve zprávě [1].

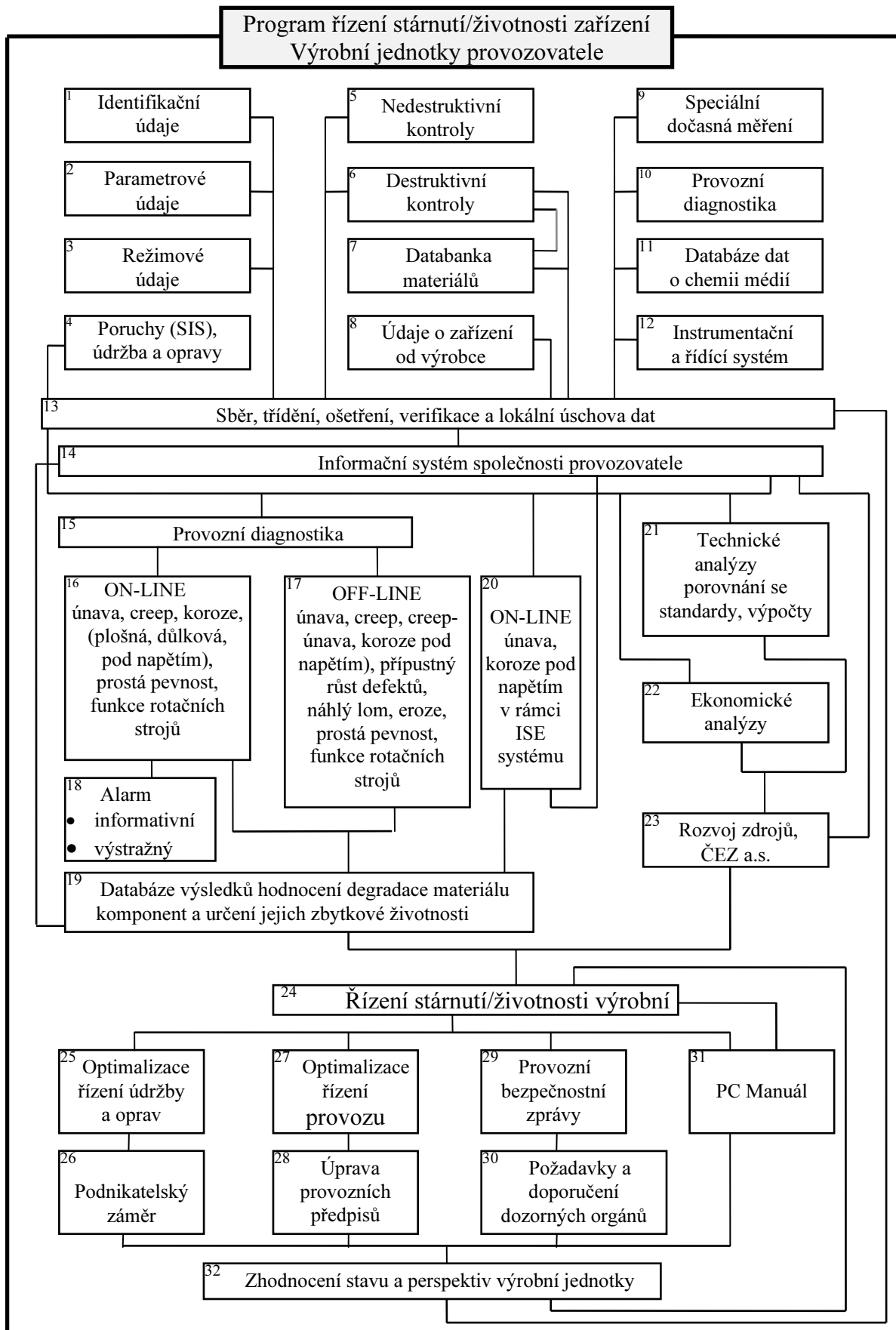
Struktura Programu řízeného stárnutí znázorněná na obr. 4.2 má tři hlavní oddíly:

- 1) Vstupní údaje pro hodnocení (části 1 až 14);
- 2) Analýza vstupních dat a závěry hodnocení (části 15 až 23);
- 3) Výkonná část Programu řízeného stárnutí (části 24 až 32).

Základním nástrojem Programu řízeného stárnutí je diagnostický systém, který musí být napojen na příslušné databáze provozovatele (vlastníka zařízení). Obsahuje třetí oddíl představující Výkonovou část Programu řízeného stárnutí.

### Vytvoření Programu řízeného stárnutí vyžaduje zejména následující činnosti:

- 1) Matematický popis degračních mechanismů a jejich vliv na řízené stárnutí zařízení výrobní jednotky a stanovení postupu pro ovlivnění procesu stárnutí zařízení.
- 2) Stanovení nezbytných parametrů pro hodnocení:
  - a) Hodnocení výrobních podkladů předaných výrobcí zařízení.
  - b) Údaje měření I and C systémem, monitorovacím a diagnostickým systémem a systémem sběru dat množství chemických příměsí včetně zhodnocení funkce systémů a návrhu na jejich nezbytně nutné doplnění.
  - c) Výsledky nedestruktivních kontrol v digitální formě.
  - d) Mechanické a fyzikální veličiny materiálu s uvažováním jejich degradace během provozu zařízení.
  - e) Pasporní údaje v digitální formě.
- 3) Vypracování seznamu nezbytných provozních parametrů a jejich získání.
- 4) Vypracování postupů hodnocení zbytkové životnosti zařízení výrobní jednotky:
  - a) Přístup k hodnocení.
  - b) Zhodnocení stavu rozpracování metodik a jejich naplně.
  - c) Analýza doposud vypracovaných výpočtů pevnosti a životnosti a pro významné části vytvořených komplexních výpočtových modelů k určení napětí a deformací.
  - d) Použití metody neuronových sítí.
  - e) Modifikace stavu hodnocení zbytkové životnosti:
    - (1) základní funkce diagnostického systému;
    - (2) základní předpoklady rozvoje diagnostického systému;
    - (3) struktura diagnostického systému;
    - (4) hodnocení postupného poškozování materiálu, matematické popisy procesu poškozování.
- 5) Zhodnocení stávajícího programu údržby a oprav a postupů řízení provozu.
- 6) Zhodnocení stávajícího systému zakládání dat získaných pomocí NDT.
- 7) Návrh činností nezbytných k zavedení Programu řízeného stárnutí zařízení výrobní jednotky provozovatele:
  - a) Optimalizace řízení provozu.
  - b) Optimalizace údržby a oprav.
  - c) Provozní bezpečnostní zprávy předkládané dozorným orgánům.
  - d) Přípustnost provozu zařízení se zjištěnými indikacemi nebo po jejich opravě či výměně.



Obr. 4.2. Schéma programu řízení stárnutí/životnosti zařízení výrobní jednotky

- e) Zhodnocení stavu a perspektiv zařízení výrobní jednotky.
  - f) Archivace.
  - g) Zpětné vazby na „Program řízeného stárnutí zařízení výrobní jednotky“.
  - h) Vazby na Informační systém společnosti provozovatele.
- 8) Implementace Programu řízeného stárnutí do systému jakosti společnosti provozovatele.
  - 9) Implementace požadavků zákonů, vyhlášek a technických standardů na zajištění požadované úrovně bezpečnosti a provozní spolehlivosti zařízení výrobního bloku do Programu řízeného stárnutí.
  - 10) Využití nových poznatků aplikovaného výzkumu při modernizaci zařízení, zavádění průkaznějších nedestruktivních kontrol a při optimalizaci řízení provozu výrobní jednotky.
  - 11) Ověření činnosti Programu řízeného stárnutí zařízení výrobní jednotky:
    - a) Zpracování dokumentace k programu řízeného stárnutí zařízení pro obsluhu.
    - b) Zpracování průkazné dokumentace o funkci Programu řízeného stárnutí zařízení, přijatelné k akceptaci dozorným orgánům.
    - c) Ověření funkce Programu řízeného stárnutí zařízení.
  - 12) Uvedení v činnost Program řízeného stárnutí zařízení výrobní jednotky, zaškolení obsluhy, zkušební provoz.

## 5 Diagnostický systém

### 5.1 Přístupy určování úrovně a trendu poškození materiálu

Díky nasazení monitorovacího a diagnostického systému je možné hodnotit postupné poškození materiálu dílů zařízení. K posouzení lze použít dvou přístupů, které mohou využívat nástrojů matematické statistiky:

- (1) matematické modely poškození materiálu, použité v diagnostickém systému;
- (2) expertní metalografický systém.

#### 1) *Matematické modely poškození materiálu*

Matematické modely poškození materiálu zabudované do diagnostického systému jsou založeny na matematickém popisu procesu poškození materiálu v provozních podmínkách. Příklady byly popsány v kap.3.

#### 2) *Expertní metalografický systém*

Expertní metalografický systém se zejména použije před nasazením diagnostického systému na provozovaná zařízení k určení stavu poškození jeho materiálu.

U dlouhodobě provozovaných zařízení lze výsledky nedestruktivních a destruktivních zkoušek materiálu využít k určení výchozího stavu poškození materiálu k okamžiku nasazení diagnostického systému a systému řízeného stárnutí zařízení výrobní jednotky.

Na základě zjištěných trendů degradace materiálu během technického života konstrukce bude pomocí metod matematické statistiky predikován další postup degradace materiálu a tím stanovena zbytková životnost konstrukce. Jedná se zejména o teplotní stárnutí a poškození materiálu únavou, creepem, korozí a erozí. Metody matematické statistiky vyžadují dostatečný soubor hodnocených vstupních dat. Zde se předpokládá využití stávajících databází společnosti a jejich postupné doplňování.

Postupy „Expertního metalografického systému“ vyžadují znalost mezní a přípustné degradace materiálu, která zaručuje spolehlivý provoz zařízení na konci technického života zařízení, předpokládaného např. projektem. Vhodná je jistá rezerva, která umožňuje prodloužit skutečný technický život zařízení nad plánovaný.



## 5.2 Metody stanovení odezvy materiálu na zatížení

Odezva materiálu na zatížení během technického života zařízení výrobní jednotky je určována z dat monitorovaných kontinuálně nebo zjištěných periodickými kontrolami (např. obsahu chemických příměsí v médiích):

*1) Pomocí trvale nasazených měřících řetězců systémů I and C (Instrumentačního a řídicího systému), MDS (Monitorovacího a diagnostického systému) a CHEMIS (Monitorování chemických příměsí v médiích) jsou ON-LINE měřeny:*

- poměrná deformace a napětí na povrchu stěny zařízení;
- teploty médií a materiálu zařízení;
- tlak médií;
- množství a rychlost proudění médií;
- úniky média;
- výška hladin médií;
- akustická emise a lokalizace emisních událostí;
- vibrace, hluk;
- posunutí zařízení nebo jejich částí;
- rozměry (změna tvaru);
- chemické příměsí v médiích.

Měřená data jsou ošetřena a včetně času změření jsou založena do denních souborů databází. Interval měření je nastaven ve shodě s frekvencí děje zatěžování. Rozlišují se měřící řetězce pro statické, kvazistatické a dynamické zatížení. Měřící řetězce monitorovacího a diagnostického systému mohou být součástí I & C systému. Finanční náklady na jejich vybudování se tak sníží. Chemické příměsí v médiích jsou obvykle měřena v delších intervalech, např. jedenkrát za den a po vyhodnocení vkládána do databáze např. systému CHEMIS. Data potřebná pro hodnocení poškozování materiálu v provozních podmínkách jsou zakládána do Datového skladu společnosti.

*2) Při periodických kontrolách stavu degradace materiálů jsou využitelné:*

- akustická emise a lokalizace emisních událostí při tlakových zkouškách;
- ultrazvuk;
- rtg. a gama záření;
- vířivé proudy;
- kapilární zkouška;
- magnetická prášková metoda;
- zkouška netěsnosti;
- zkoušení neutronovou radiografií;
- akustická emise;
- zkoušení infračervenou termografií;
- vizuální kontroly (včetně optiky);
- elektrochemie;
- svědečné vzorky;
- metalografie povrchů;
- odběr malých vzorků z povrchové vrstvy;
- odběr částí dílů konstrukce pro zkoušky materiálu.

Dále je možné použít speciální metody:

- měření tloušťek ultrazvukovými tloušťkoměry;

- měření tloušťek povlaků a vrstev elektromagnetickými metodami;
- zjišťování záměn materiálů jiskrovou metodou;
- zjišťování záměn materiálu spektrální metodou.

Výsledky zkoušek musí být zakládány do databází a být přístupné pro hodnocení stavu degradace materiálu a stanovení zbytkové životnosti zařízení. Popis metodiky a použití nedestruktivních zkoušek, zejména v oblastech svarových spojů, lze nalézt ve skriptech [42]. Ideální je, aby systém řízeného stárnutí byl nasazen před prvním spuštěním výrobní jednotky a materiál zařízení bylo možné posuzovat jako nový, nepoškozený.

### 5.3 Závislost časové změny poměrných deformací a napětí na měřených parametrech

Matematické popisy mechanismů poškozování materiálu v provozních podmínkách vyžadují znalost změny napětí  $\sigma$  a poměrných deformací  $\epsilon_t$  v čase a to pro pružně-plastický stav namáhání. Musí být určeny z dat, které jsou během provozu výrobního bloku ON-LINE měřeny a uschovávány v databázích. Jsou to zejména tlak a teplota médií, rychlost a množství proudících médií, teplota kovu, vibrace, posuvy a pod. Prostředí, ve kterém materiál zařízení pracuje, je charakterizován chemickými příměsmi v médiích. Tato data jsou měřena čidly instrumentačního a řídicího systému (I and C systém), monitorovacího a diagnostického systému (MDS), systému CHEMIS a čidly dočasných měření (DM). Pro omezenou životnost tenzometrů se nepočítá s jejich trvalým využitím pro ON-LINE určení napětí a poměrných deformací. Ze změřených veličin lze napětí a poměrné deformace určit:

#### 1) *ON-LINE pomocí:*

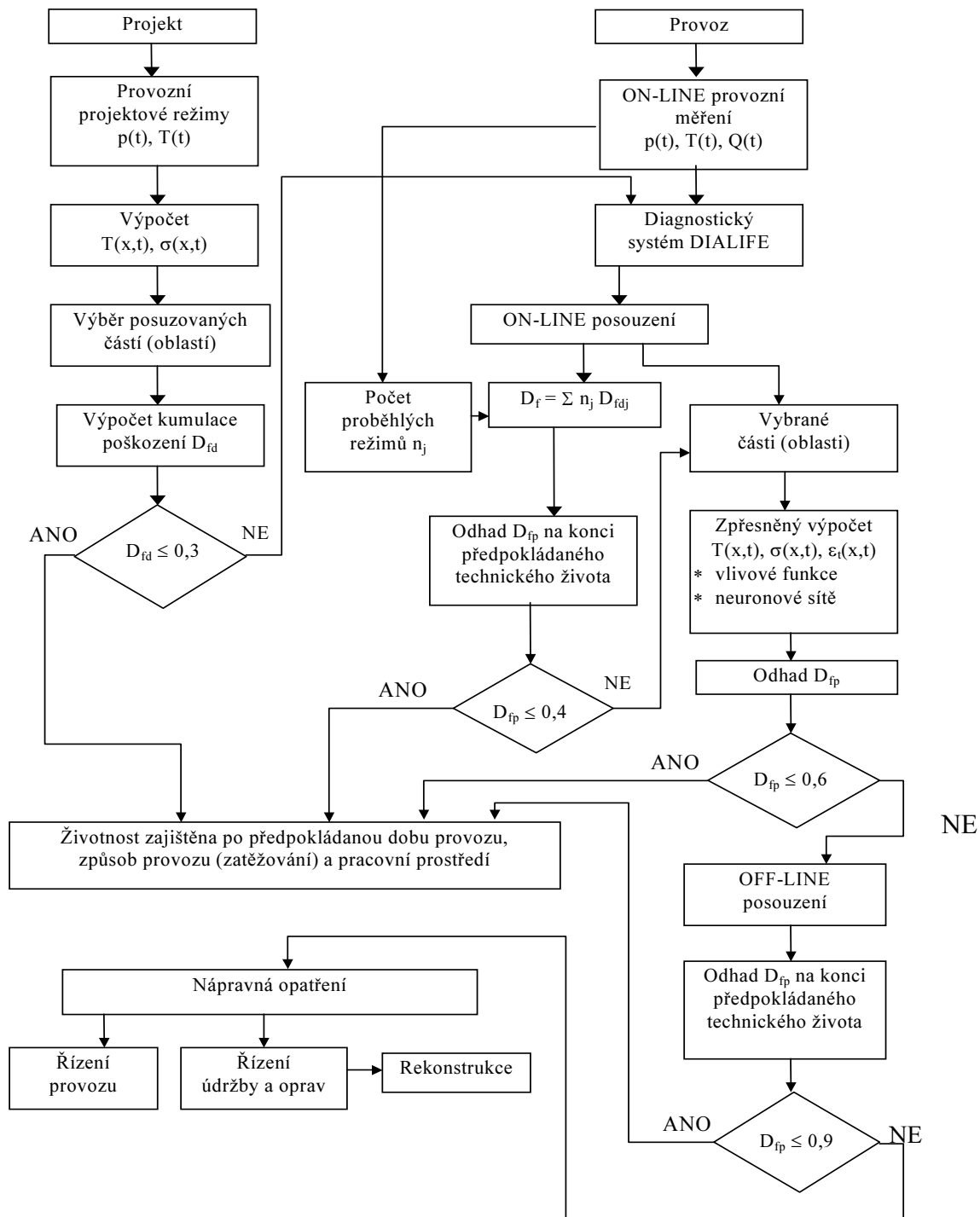
- \* neuronových sítí (NS)
- \* předem vypočtené databáze napětí pro charakteristické změny zatížení
- \* vlivových funkcí

#### 2) *OFF-LINE (obvykle expertní přístup) pomocí:*

- \* neuronových sítí
- \* metody konečných prvků (MKP)

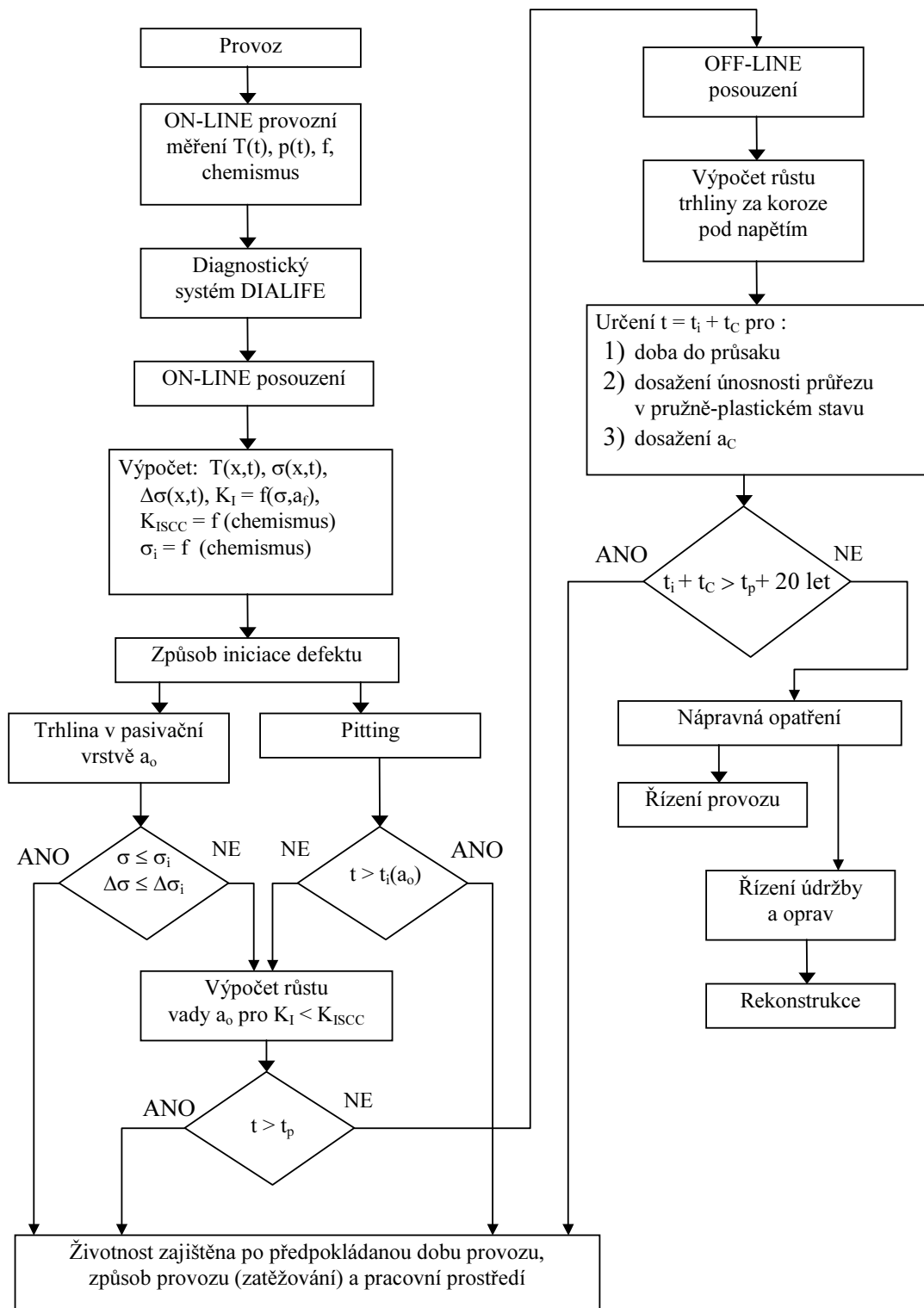
### 5.4 Kritéria pro hodnocení poškozování materiálu

Kritéria pro hodnocení poškozování materiálu jsou uvedena na vývojových diagramech na obr. 5.1 až 5.4. Vývojové diagramy znázorňují postup hodnocení poškozování materiálu vybranými mechanismy, [1].



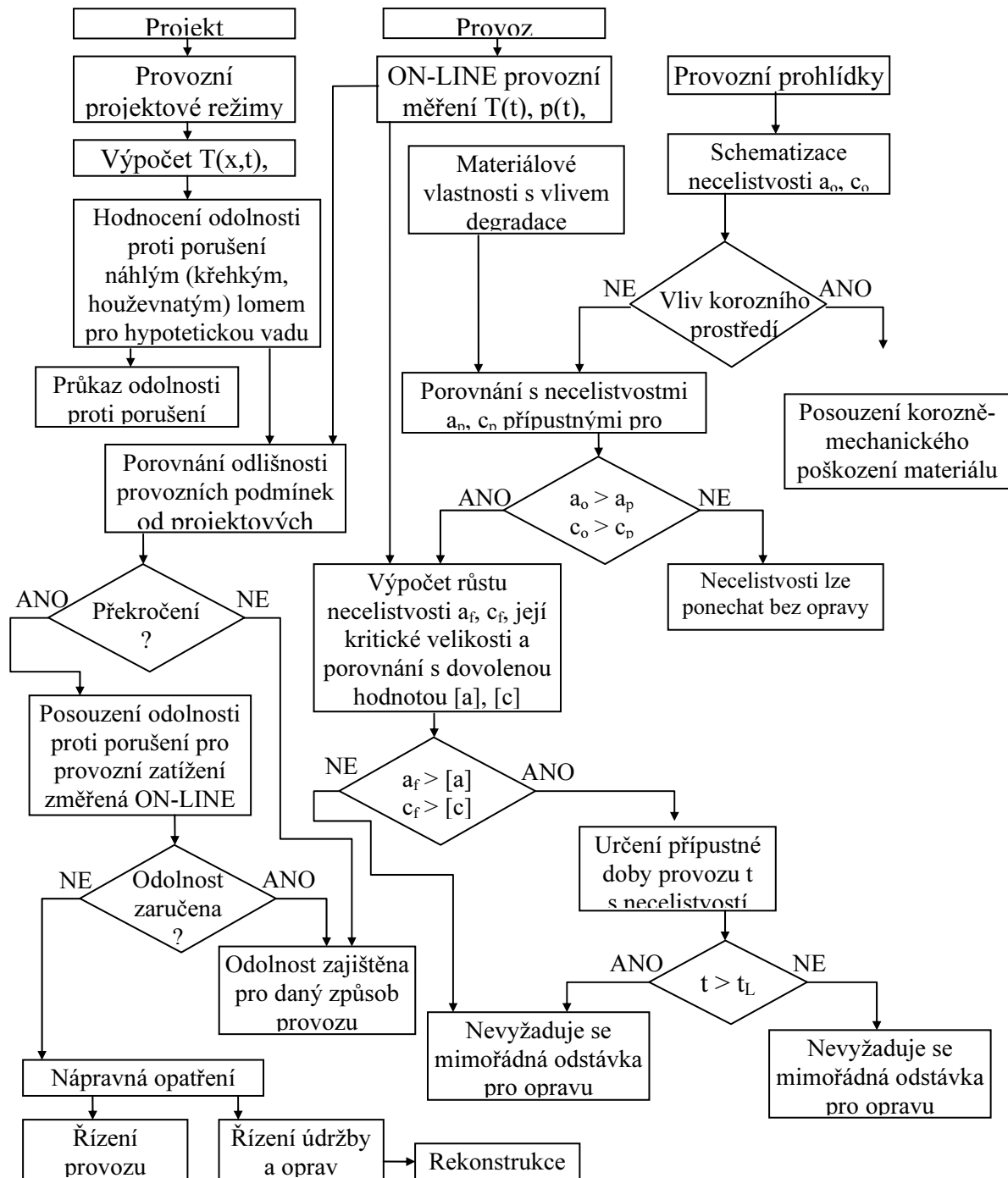
Obr. 5.1. Postup hodnocení poškození materiálu zařízení únavou

$D_{fd}$  - kumulace poškození pro projektové podmínky ( $D_{fdj}$  - projektový režim),  $D_{fp}$  - odhad kumulace poškození na konci předpokládaného technického života zařízení

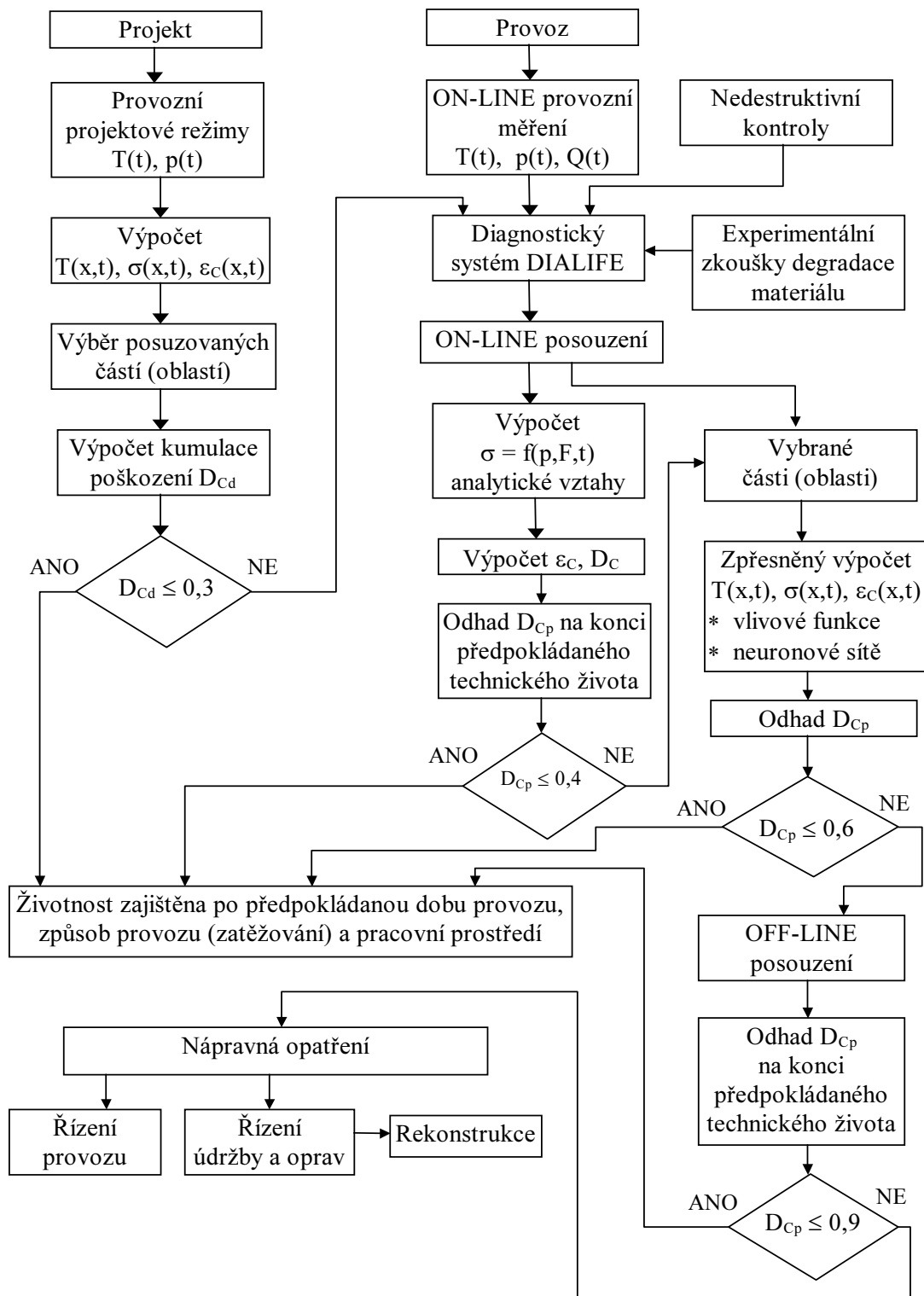


Obr. 5.2. Postup hodnocení korozně-mechanického poškozování materiálu zařízení

$\sigma_i$  - iniciační napětí k porušení pasivační vrstvy;  $t_i$  - doba růstu trhliny v etapě iniciace;  $t_c$  - doba růstu trhliny za koroze pod napětím;  $a_0 \approx 0,05$  mm;  $a_f$  - hloubka vady během provozu;  $a_c$  - kritická velikost vady;  $t_p$  - doba předpokládaného technického života zařízení



Obr. 5.3. Postup hodnocení odolnosti zařízení proti porušení náhlým (křehkým, houževnatým) lomem a stanovení podmínek pro přípustný růst necelistvosti zjištěné plánovanou nedestruktivní kontrolou



Obr. 5.4. Postup hodnocení poškození materiálu zařízení creepem  
 $D_{Cd}$  - kumulace poškození pro projektové podmínky  
 $D_{Cp}$  - odhad kumulace poškození na konci předpokládaného technického života zařízení

## 5.5 Příklady použití diagnostického systému

### 1) Kolesové rypadlo K650/3

Jedním z provozovaných diagnostických systémů je systém DIALIFE vyvíjený v ÚAM Brno. Je např. provozován na JE Dukovany, JE Temelín, AE Mochovce a jedna z jeho modifikací na kolesovém rypadle K 650/3 [32]. Na K 650/3 byla data dlouhodobě měřena tenzometry, akcelerometry, čidly pro měření tlaku a proudu. Pro tři významné poruchy byla činnost a měření vždy na několik měsíců přerušena. Tenzometry a akcelerometry byly umístěny jak na OK, tak na strojní díly. Jedním z míst, do kterých byly umístěny tenzometry byl úzký sloup střední stavby osazený 4 tenzometry G16a,b,c (obr. 5.5) a příčný nosník (obr. 5.6 a 5.7), kde v blízkosti opravené trhliny byla upevněna růžice G20a,b,c



Obr.5.5. Úzký sloup, tenzometry G16a,b,c,d

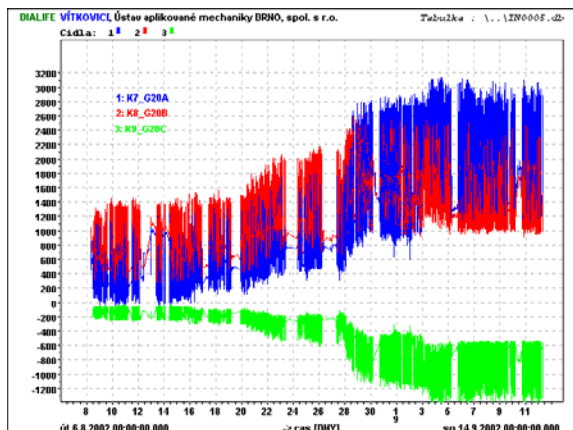
Na obr. 5.8 je ukázán časový průběh dat změřených růžicí G20 a na obr. 5.9 dat změřených růžicí G19, umístěné v dostatečné vzdálenosti od opravené trhliny. Na obou obrázcích jsou data změřená od 08.08. do 13.09.2002. Na obr. 5.8. je zřejmá změna napěťového pole. Příčinou byl opakovaný vznik trhliny. Na obr. 5.9 není patrné, že opakovaně vzniklá trhlina je schopna ovlivnit napěťová pole v místě vzdálenější růžice G19. Příčinou vzniku trhliny bylo vynucené kmitání hydraulického systému pro pohon hydromotorů, kterou dodavatel přes výhrady provozovatele umístil na vrchol střední stavby ocelové konstrukce.



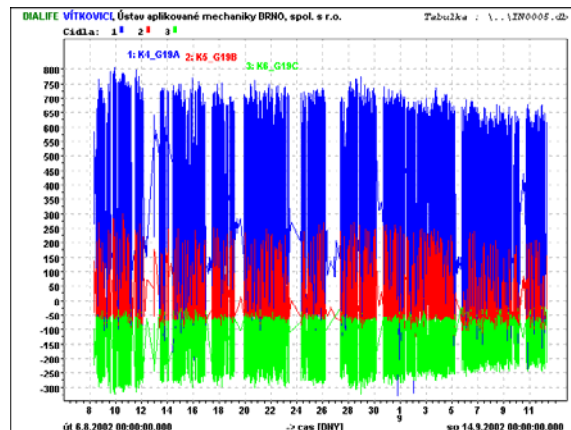
Obr.5.6. Příčný nosník, růžice G19a,b,c



Obr.5.7. Příčný nosník, růžice G20a,b,c



Obr.5.8. Poměrné deformace v místě růžice G20



Obr.5.9. Poměrné deformace v místě růžice G19

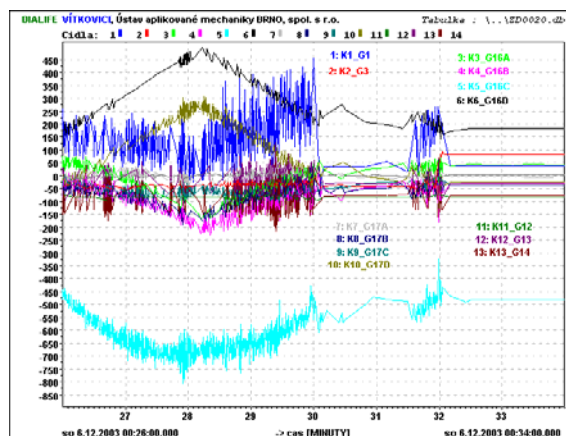


Obr.5.10. Trhlina v hřídeli kolesového rypadla K 650/3

Jednou z poruch, které přerušily měření, byl prasklý hřídel kola rypadla  $\phi$  440 mm, obr. 5.10. Trhlina byla vyvolána proměnným kroutícím momentem vyvozeným rypným odporem dobívané zeminy. Následné vyhodnocení prokázalo, že trhlina musela být přítomna již při instalaci měřicího systému [2]. Její vznik se neočekával a proto až na nový hřídel byly upevněny tenzometry uspořádané do 4 růžic po obvodě. Jedná se o dlouhodobé měření na rotujícím hřídeli. Měřená data jsou přenášena vzduchem systémem WiFi. Problémem je napájení

měřicího systému na rotujícím hřídeli, napájecí baterie musí být dobíjeny. U použitého přístroje jsou schopny napájet měřicí přístroj nepřetržitě tři dny. Již před instalací tenzometrů na hřídel kola byl měřen tlak v hydraulickém systému dvou hydromotorů, ze kterého lze nepřímou vypočítat kroutící moment. Takto změřený časový průběh kroutícího momentu byl použit k výpočtu hřídele kola na únavu. Z použité oceli byly vyrobeny zkoušky pro určení křivky životnosti typu Wöhlera. Bylo prokázáno, že za daného zatížení trhlina iniciovaná z malého radiusu vznikla za cca 6,8 let provozu a úplný lom nastal po 10 letech provozu v době měření. Okamžik lomu 32 minut po půlnoci dne 06.12.2003 je patrný na obr. 5.11.

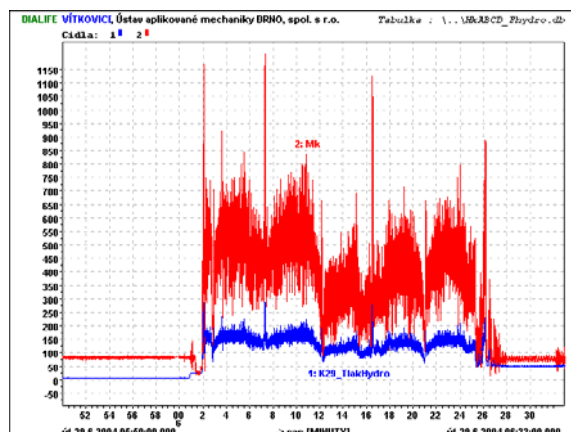
Po instalaci měření poměrných deformací na rotujícím hřídeli kola byly nástroji diagnostického systému DIALIFE a programem TEPO vypočteny a vykresleny časové průběhy vnitřních sil a napětí v měřeném průřezu hřídele [33]. Z obr. 5.12 a 5.13 je patrné, že jak kroutící moment  $M_k$  určený ze změřených poměrných deformací, tak vypoč-



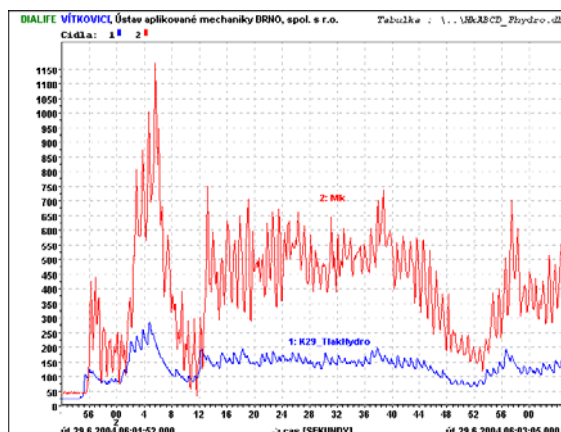
Obr.5.11. Okamžik lomu hřídele kola



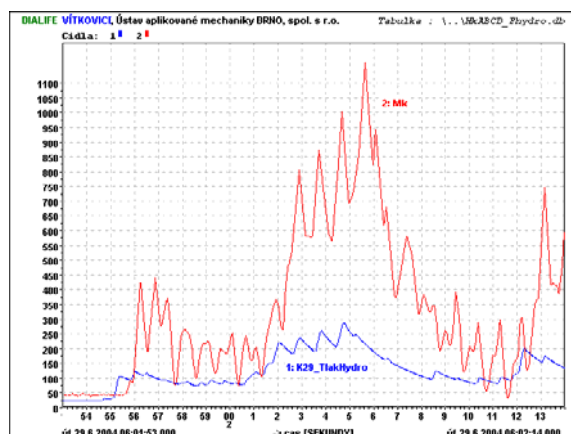
tený ze změřeného tlaku  $p$  v hydraulickém systému hydromotorů, mají shodný charakter. Amplitudy kroučícího momentu vypočteného z tlaku  $p$  jsou až o 10 % vyšší než určené z měření na hřídeli. Důvodem může být účinnost hydromotorů. Na nosném kmitu  $p$  však není patrný kmit superponovaný na nosném kmitu, jak je to vidět na časovém průběhu kroučícího momentu  $M_k$ , určeném z poměrných deformací změřených na rotujícím hřídeli.



Obr.5.12 Časový průběh kroučícího momentu  $M_k$  a tlaku  $p$  hydromotorech, vzorkování 800 Hz



Obr.5.13. Detail časového průběhu kroučícího momentu  $M_k$  a tlaku  $p$  v hydromotorech, vzorkování 800 Hz



Obr. 5.14 Detail časového průběhu kroučícího momentu  $M_k$  a tlaku  $p$  v hydromotorech, vzorkování 800 Hz

Programem TEPON byl časový průběh  $M_k$  změřený dne 29.06.2004 během 10 hod zařazen do 46 tříd dle amplitud pomocí metody stékání deště. Zde je vybrána pouze část tabulky, označená tab. 5.1. Jsou v ní uvedeny také střední hodnoty cyklu a počty výskytu amplitud v dané třídě.

Tab.5.1. Zatřídění kroučícího momentu

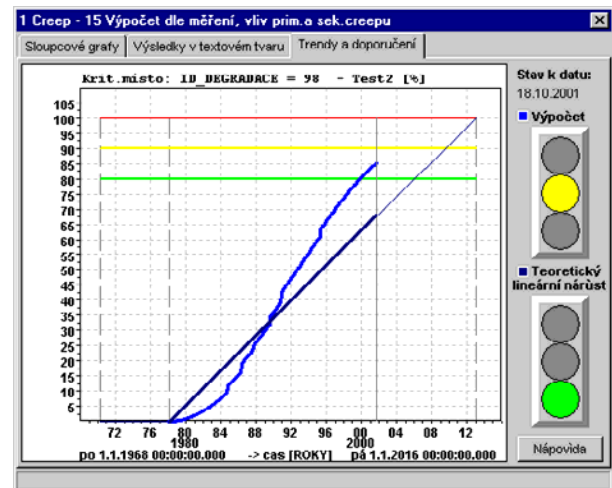
POČTY ZATŘÍDĚNÝCH CYKLŮ KROUTÍCÍHO MOMENTU HODNOCENÉ OBDOBÍ 29.06.2004 od 00:00 do 10:00 hod		
CISLO MERENEHO MISTA= 1 POCET SKUPIN= 46		
Mka	Mkm	N
3.15	793.80	71624.00
13.25	674.20	89.00
23.36	988.27	5841.00
37.44	816.32	5294.00
105.02	830.73	1435.50
119.27	810.53	770.00
132.19	790.32	1635.00
349.19	752.88	44.00
359.96	626.66	3.00

### 3) Zařízení na jaderné elektrárně

Na jaderných elektrárnách Dukovany, Temelín a Mochovce je v činnosti diagnostický systém DIALIFE, vyvíjený v ÚAM Brno. Diagnostický systém využívá data měřená I&C (řídícím a instrumentačním) systémem, diagnostickým a monitorovacím systémem a systémem CHEMIS. Ve více namáhaných oblastech vybraných zařízení jsou pomocí metody neuronových sítí vypočteny časové průběhy poměrných deformací a napětí, použité např. pro stanovení úrovně a trendů poškození materiálu únavou. Na obr. 5.15 je ukázán výsledek hodnocení v jednom z posuzovaných míst. Je na něm porovnán trend poškození materiálu únavou, vypočtený ze změřených dat, s teoretickým trendem, při kterém by na konci života zařízení, předpokládaného v projektu, bylo dosaženo přípustného poškození únavou 100% ve shodě

s normou. Systém DIALIFE umožňuje určit zbytkovou životnost zařízení a jeho výsledky využít v systému řízení stárnutí/životnosti zařízení výrobního bloku

Obr. 5.15. Trend poškození materiálu únavou



## 6 Pravděpodobnostní analýza

Závažné následky havárií v chemickém průmyslu vedly k tomu, že Evropská směrnice Seveso II [Directive 96/082/EEC] zavedla povinnost vypracovat analýzu rizik závažných havárií způsobených nebezpečnými chemickými látkami. Z této direktivy vychází český zákon č. 353/1999 Sb. [7]. Ve vyhlášce Ministerstva životního prostředí č. 8/2000 [8] se uvádí, že přijatelná četnost výskytu možného ohrožení života jedné osoby v důsledku vzniku závažné havárie v okolí objektu nebo zařízení je  $10^{-5}$  pro stávající objekty nebo zařízení a  $10^{-6}$  pro nové objekty nebo zařízení. Pro případ ohrožení života více osob se uvádí přijatelná četnost možného ohrožení jejich života v důsledku vzniku závažné havárie  $F_p = 10^{-3}/N^2$  pro stávající objekty nebo zařízení a  $F_p = 10^{-4}/N^2$  pro nový objekt nebo zařízení, kde  $F_p$  je přijatelná četnost a  $N$  počet ohrožených osob.

Při návrhu stavebních konstrukcí se předpokládá přípustná pravděpodobnost vzniku poruchy či závažné havárie asi  $p_f = 10^{-4}$ , v jaderné energetice  $p_f = 10^{-6}/\text{rok}$  a v ruské literatuře pro reaktory se dokonce uvádí  $p_f = 10^{-7}/\text{rok}$ . Pro klasickou energetiku nám požadované údaje nejsou dostupné. Otázkou tedy je, jaká hodnota je v jednotlivých případech závazná a kdo ji má stanovit, pokud není dána zákonem nebo vyhláškou a jakou úlohu při tom má vlastník zařízení. Lze se domnívat, že zodpovědnost za věrohodnost výsledků výpočtu by měl nést vlastník zařízení, případně osoba, na kterou tuto zodpovědnost delegoval. Riziko je definováno jako „pravděpodobnost vzniku závažné havárie a jejich možných následků“. Pro kvantifikaci rizika lze použít vztah:

$$R = p_f \cdot C, \quad (6.1)$$

kde  $C$  je průměrná očekávaná škoda, ke které by došlo při vzniku poruchy s pravděpodobností  $p_f$ . Hodnota  $C$  může být vyjádřena ve finančních ukazatelích, nebo počtem zraněných či mrtvých, případně jiným ukazatelem [9], [10].

Významné světové normy jako např. ASME CODE doposud používají deterministický přístup k prokázání odolnosti materiálu proti poškození tlakových nádob v provozních podmínkách. Pravděpodobnostní přístup však stále více nabývá na významu. Dokáže postihnout vliv statistického rozložení jednotlivých veličin jako jsou zatížení, rozměry, mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu na pravděpodobnost vzniku závažné havárie či jiné mezní situace a jejich možných následků. Citlivostní analýzou lze vybrat ty z náhodných proměnných, které vykazují největší vliv na rozptyl výsledků. Umožňuje však také vybrat ty, které vykazují nejmenší vliv na rozptyl výsledků a při dalších řešeních je lze považovat jen za deterministické veličiny. Při použití pravděpodobnostní analýzy je třeba mít na zřeteli, zda nás zajímá pravděpodobnost poruchy výrobků daného typu, činného na území např. České republiky a nebo zda nás zajímá pravděpodobnost poruchy konkrétního zařízení o dané

geometrii, materiálových vlastnostech a namáhaného v daných provozních podmínkách a prostředí, s danými statistickými parametry nezávisle proměnných.

Technologické výrobní celky, pracující na klasických a jaderných elektrárnách, v petrochemickém, chemickém a potravinářském průmyslu, představují soubor jednotlivých zařízení a jejich detailů. Každý tento prvek může být během provozu poškozován jiným degradačním mechanismem. Dochází také k postupné degradaci jeho funkce. Znamená to určit pravděpodobnost poruchy  $p_f$  jednotlivých prvků [4], [6]. Existují postupy, které umožňují vypočítat pravděpodobnost poruchy celého souboru z pravděpodobnosti poruchy jednotlivých prvků celku.

Analýza rizika se skládá (zjednodušeně) z těchto kroků:

- rozbor možných rizikových situací a výběr té, která bude analyzována. Sestavení scénáře, tj. sledu „událostí“, které by k takové situaci vedly
- sestavení výpočetního modelu pro takový scénář a vyhledání statistických parametrů relevantních vstupních veličin
- výpočet pravděpodobnosti poruchy  $p_f$  (o metodách viz např. [9])
- určení/odhad následků  $C$
- určení rizika dle (6.1).

Scénář vzniku poruchy [2], [5], [35] až [38] představuje popis sledu možných aktivit či situací, obvykle časově seřazených, které by vedly ke vzniku nepříznivé události havárie, meznímu stavu apod. Havárie zařízení může nastat selháním alespoň jednoho z prvků systému, dosažením mezního stavu jeho poškození, ke kterému může docházet postupně během provozu anebo náhle, např. při poklesu teploty materiálu na úroveň, při které za daných podmínek namáhání v oblasti defektu nastane křehký lom. Havárie jednotlivých prvků systému může mít rozdílné následky. Výpočtu rizika poruchy celého systému musí proto předcházet analýza vlivu selhání jednotlivých prvků systému, důsledků jejich selhání a očekávaného rozsahu způsobených škod. Výsledkem takového rozboru jsou mj. scénáře havarijních situací.

Scénář tedy rozhoduje také o tom, která data bude nutno opatřit pro stanovení příslušného rizika. Dále spolurozhoduje (spolu s účelem analýzy rizika) o metodě analýzy a případně o modelu, který má být pro analýzu rizika konstruován. Scénář havarijní situace musí postihnout všechny faktory, které mají vliv na přesnost určení rizika závažné havárie  $R$  a na přesnost výpočtu pravděpodobnosti vzniku poruchy  $p_f$ . Obsahuje zejména informaci o geometrii posuzovaného zařízení a jeho funkci v celém systému, o pracovních podmínkách, metodách a četnosti nedestruktivních kontrol a jejich výsledcích, o historii výroby posuzovaného zařízení, jeho zatížení, mechanických a fyzikálních vlastnostech použitých materiálů, parametrech charakterizujících korozní prostředí a příčinách citlivosti materiálu k tomuto prostředí, o podmínkách uložení (např. závěsy potrubních systémů) a jejich možné degradaci, o matematických popisech procesů poškozování materiálu včetně degradaci jeho mechanických a fyzikálních vlastností. Musí být popsána odezva materiálu zařízení na zatížení a vliv prostředí. Musí být také definována kritéria pro určení a hodnocení havarijních situací.

Analýzy havarijních situací musí respektovat přesnost použitých nedestruktivních metod. Pokud např. nedestruktivní metoda neodhalila přítomnost defektu v materiálu, musí být uvažována přítomnost hypotetického defektu rovného nejmenší velikosti defektu, který je použitá nedestruktivní metoda ještě schopna nalézt. Také je nutno respektovat, že materiál je v provozních podmínkách průběžně degradován. Nenalezení defektu během plánované kontroly může pouze prokazovat pomalejší trend poškozování materiálu. Také tento závěr

musí být udělen s opatrností, pokud nemáme nedestruktivní kontrolu schopnou přímého stanovení stupně degradace materiálu, ale pouze jeho pravděpodobného poškození.

Významnou částí scénáře je matematický popis procesu poškozování materiálu či funkce zařízení, který je modelem skutečných procesů a efektů, které se vztahují k predikci rizika závažné havárie. Vytvořený model havarijní situace je využit pro pravděpodobnostní analýzu vzniku poruchy.

Vytvořený model havarijní situace je funkcí nezávisle (resp. závisle) proměnných veličin, deterministických nebo náhodných. Žádné významné nezávislé proměnné by neměly být opomenuty v zájmu co nejvěrnějšího odhadu rizika. U náhodných veličin musí být stanoveny jejich nezbytné statistické parametry. Jedná se např. o mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu, které je třeba nalézt v atestech založených v revizní knize zařízení a ze získaného souboru dat zpracovat jejich statistické charakteristiky. Totéž např. také platí pro svorníky rozebíratelného spoje, kdy musí být vypracována analýza příčin jejich výměny pro poškození. Byla-li příčinou vyřazení trhлина anebo jí blízká vada, musí být zaznamenán rozměr a poloha vady a doba po kterou svorník sloužil. Do statistického souboru je třeba pojmout také svorníky vyřazené pro jejich limitované stáří, uvedené v projektu, např. 12 let.

Lze vyjmenovat ještě další nezávislé veličiny, které musí být určeny např. pomocí nedestruktivních kontrol (měnící se tloušťka stěny, plošné zeslabení stěny erozí nebo korozí; rozložení defektů a jejich růst a pod.). Nelze ani opomenout vliv lidského faktoru, počasí (teplota, tlak, vítr, oblačnost, sníh a pod.), možnost účinku zemětřesení, výbuchů, požárů, výpadku proudu a pod. U veličin určených experimentálně zkouškou vzorků musí být známy jejich nezbytné statistické charakteristiky, neměly by však být jedinými.

Citlivostní analýzou (blíže viz [6]) lze vybrat ty z náhodných proměnných, které vykazují největší vliv na rozptyl výsledků. Této znalosti lze potom využít ke zvýšené důkladnosti stanovení nezbytných statistických parametrů nezávisle proměnných veličin. Umožňují však také vybrat ty z náhodných proměnných, které vykazují nejmenší vliv na rozptyl výsledků a při řešení podobných úloh, nebo opakovaného výpočtu, je považovat za deterministické veličiny. Sníží se tak počet náhodných proměnných, čímž se analýza rizika závažné havárie usnadní.

Citlivostní analýzu je účelné použít vždy, pokud se jedná o náročná řešení úloh s významným rizikem následků poruchy. Vždy je třeba doložit podrobný přehled uvažovaných náhodných veličin a jejich statistických parametrů. Bez doložení scénáře havarijní situace, jeho matematického popisu, přehledu náhodných veličin a jejich statistického rozložení nelze prokázat věrohodnost výpočtu pravděpodobnosti poruchy  $p_f$ .

## **7 Zhodnocení a perspektivy dalšího vývoje**

Znalost podstaty systému řízení životnosti/stárnutí zařízení namáhaných v provozních podmínkách, využívající nástrojů pravděpodobnostní analýzy. Přestože normy převážně upřednostňují deterministické výpočty, lze v krátké budoucnosti očekávat častější využívání pravděpodobnostních analýz. Jsou průmyslová odvětví jako letectví a ocelové či železobetonové stavební konstrukce, kde jejich uplatnění je již běžné, nebo časté. Znalosti a zkušenosti s použitím metod systému řízení životnost/stárnutí zařízení a podobných systémů, jakým jsou např. systémy Design Basis, Periodic Safety Review, Risk Based Inspection a s aktivním použitím pravděpodobnostních analýz nejsou v inženýrské praxi běžné. Větší pozornost by jim měla být věnována také na vysokých školách zavedením speciálních předmětů. Kromě vysvětlení podstaty problému musí být důraz kladen na aplikaci

pro praxi. V Ústavu procesního a ekologického inženýrství jsou v omezené míře vybrané kapitoly přednášeny v předmětu Stavba procesních zařízení.

Pro strojní inženýry bude třeba organizovat semináře a konference. V říjnu 2004 byla společně Ústavem mechaniky Stavební fakulta VUT v Brně a Ústavem aplikované mechaniky Brno, s.r.o. zorganizována dvoudenní konference PPK2004 – Pravděpodobnost porušování konstrukcí. Jedním z cílů byla konfrontace stavu používání pravděpodobnostních analýz v oblasti stavebních ocelových a železobetonových konstrukcí se stavem jejich využívání ve strojírenství. Obsah a zaměření konference byl účastníky pozitivně hodnocen a bylo dohodnuto zahájit tradici pořádání konferencí PPK v dvouletých cyklech s důrazem na využití aplikací v praxi. ÚAM Brno ve spolupráci s ÚPEI VUT v Brně připraví konferenci se zaměřením na použití systému Risk Based Inspection v chemickém a petrochemickém průmyslu a v klasické energetice.

## 8 Literatura

- [1] Vejvoda, S.: Life Aging Management System, Proceedings of the Seventh International Colloquium on Asset Management of Aged Plant and Materials: Assessment Methods, Cape Town/South Africa 7-11 April, 2003, Edited by R. K. Penny, pp69-88.
- [2] Vejvoda, S., Teplý, B.: Příspěvek k výpočtu pravděpodobnosti porušení. Sborník z konference Kotle, energetická zařízení, Brno, březen 2003, s. .
- [3] Šafář, I.: Dokončení programu řízeného stárnutí hlavního cirkulačního potrubí JE Temelín. Dílčí část. Analýza rozdělení teploty v oblasti nátrubku – míchání media. Zpráva ÚAM Brno, arch. č. 3427/03.
- [4] Teplý, B.: Analýza rizika jako nezastupitelný nástroj pro rozhodující a legislativní činnost ve stavebnictví. Stavební listy 11/2001, vydal ABF, Nakladatelství ARCH, Praha, s. 6, 7.
- [5] Teplý, B., Novák, D., Vejvoda, S.: Analýza rizik dle zákona 353. Konference chemického a procesního inženýrství CHISA 01, říjen 2001, Srní, CHISA 2001, (CD).
- [6] Teplý, B., Novák, D.: Spolehlivost stavebních konstrukcí. Skriptum, Akademické nakladatelství CERM, Brno, 1999.
- [7] Zákon č. 3583/1999 Sb.: „O prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami .....“ z 9.11.1999.
- [8] Vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 8/2000 Sb. ze dne 13.1.2000.
- [9] Teplý, B.: Analýza rizika jako nezastupitelný nástroj pro rozhodující a legislativní činnost ve stavebnictví. Stavební listy 11/2001, vyd. ABF, Nakladatelství ARCH, Praha, s. 6, 7.
- [10] Teplý, B., Bauer, K., Křístek, V.: Problematika rizik a celkových nákladů stavebních objektů. Sborník konf. Betonářské dny 2000, ČBS, s. 193-198.
- [11] BS 7910:1999, Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures.
- [12] Šmátralová, M. – Wozniak, J.: Hodnocení náchylnosti k vodíkové křehkosti z hlediska šíření trhlin. VÍTKOVICE a.s., Divize Technika, č. zprávy CZ-38/95.
- [13] Šmátralová, M. – Wozniak, J.: Iniciace interkrystalických defektů vodíkem ve stěně svařovaných tlakových nádob, vyrobených z oceli ČSN 41 5421.9. VÍTKOVICE a.s., Výzkum a vývoj, spol. s r.o., č. zprávy D-13/2002.
- [14] ČSN 73 1401 - Navrhování ocelových konstrukcí, 1993.
- [15] Vejvoda, S.: Dokončení programu řízeného stárnutí hlavního cirkulačního potrubí JE a dalších komponent. Manuál systému řízeného stárnutí potrubních systémů a dalších komponent JE Temelín. Zpráva UAM Brno, arch. č. 3335/02.

- [16] Ford, F.P., Andresen, P.L.: Development and Use of a Predictive Model of Crack Propagation in 304/316L, A533/A508 and Inconel 600/182 Alloys in 288 °C Water. In: Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors. Edited by G.I. Theus and J.R. Weeks. The Metallurgical Society, 1988, pp 789 – 800.
- [17] Matocha, K. – Wozniak, J.: Zajištění dlouhodobé životnosti komponent sekundárního okruhu JE Bohunice. VÍTKOVICE, a.s., Divize Výzkum a vývoj, číslo zprávy Z18/98.
- [18] Matocha, K. – Sobotková, M. – Karásek, J. – Sajdl, P.: Stanovení prahové hodnoty iontů  $\text{Cu}^{2+}$  ve vodním prostředí závitového hnízda primárního kolektoru PG pro vyvolání korozního prostředí. VÍTKOVICE, a.s., Divize Výzkum a vývoj, číslo zprávy D8/2002.
- [19] Vejvoda, S.: Posouzení odolnosti konstrukcí proti porušení koroze pod napětím. Sborník konf. Koroze a její vliv na pevnost a životnost konstrukcí z oceli. Brno 2001, ISBN 80-214-1799-4.
- [20] Manson, S.S.: Thermal Stress and Low-cycle Fatigue. McGRAW – Hill Book Company, 1966.
- [21] Normativně technická dokumentace A.S.I., Svařování zařízení a potrubí jaderných zařízení, Sekce I. Identifikační číslo NTD ASI-II-Z-5/01. Praha, Brno 2001.
- [22] Normativně technická dokumentace A.S.I., Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, Sekce II. Identifikační číslo NTD ASI-II-Z-5/01. Praha, Brno 2001.
- [23] Normativně technická dokumentace A.S.I., Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, Sekce III. Identifikační číslo NTD ASI-III-Z-5/01. Praha, Brno 2001.
- [24] Normativně technická dokumentace A.S.I., Hodnocení zbytkové životnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, Sekce IV. Identifikační číslo NTD ASI-IV-Z-5/04. Praha, Brno 2004.
- [25] Normativně technická dokumentace A.S.I., Zkoušky materiálů, Sekce V. Identifikační číslo NTD ASI-V-Z-5/05. Připravováno k vydání.
- [26] Vejvoda, S.: Dokončení programu řízeného stárnutí hlavního cirkulačního potrubí JE a dalších komponent. Zpráva k závěrům řešení projektu k 15.12.2002. Zpráva UAM Brno, arch. č. 3340/02.
- [27] Vejvoda, S. – Mackerle, Z. – Holzmann, M.: Resistance of Welded Machine Steel Structures for Strip Mining against Brittle Fracture. Document No. Doc. X-1405-97 of the IIW Meeting, July 1997, San Francisco.
- [28] Besuner, P.M. – Harris, D.O. – Thomas, J.M.: A Review of Fracture Mechanics Life Technology, NASA Report 3957.
- [29] Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs „VERLIFE“, Version 5 – FINAL, Contract N° FIKS-CT-2001-20198, September 2003.
- [30] Smith, A.I. – Nicolson, A.M.: Advances in Creep Design. Applied Science Publishers Ltd, London, 1971, ISBN 0444 20119-X.
- [31] Němec, J.: Prodlužování životnosti konstrukcí a předcházení jejich haváriím. A.S.I. v České republice, klub při VÚHU Most, 1994.
- [32] Vejvoda, S., Mackerle, Z., Mikulík, V., Floryán, J.: Dlouhodobé měření namáhání OK velkostroje K650. Zpráva UAM Brno, arch. č. 3331/02.
- [33] Valenta, M., Vejvoda, S.: Provozní měření kolesového hřídele K650. Zpráva UAM Brno, arch. č. 3585/04.
- [34] Matocha, K., Wozniak, J.: Hodnocení únavových a křehkolomových charakteristik materiálu parogenerátoru a kompenzátoru objemu VVER 440 MW. Zpráva VÍTKOVICE, ÚMI, číslo zprávy CD-51/94.
- [35] Vejvoda, S., Novák, D., Keršner, Z., Teplý, B.: Study of the Steam Generator Cover: a PSA Case Study. in Transferability of Fracture Mechanical Characteristics. Edited by

- Ivo Dlouhý. NATO Science Series II. Mathematics, Physics and Chemistry – Vol. 78, Kluwer Academic Publishers, 2001, p. 351-366. ISBN 1-4020-0794-9 (HB), ISBN 1-402-0795-7 (PB).
- [36] Vejvoda, S., Hejčová, J.: Pravděpodobnost hodnocení možnosti utržení víka primárního kolektoru při použití hřebenového těsnění během provozu. Zpráva ÚAM Brno, arch. č. 3380/03.
- [37] Teplý, B.: Scénáře a analýza rizik. I. konference PPK2004 Pravděpodobnost porušování konstrukcí. Editoři Novák, D., Vejvoda, S., VUT v Brně 2004, s. 229 až 236.
- [38] Vejvoda, S.: Tvorba modelu procesu poškozování materiálu ve výpočtu pravděpodobnosti porušení konstrukcí. In. I. konference PPK2004 Pravděpodobnost porušování konstrukcí. Editoři Novák, D., Vejvoda, S., VUT v Brně 2004, s. 237 až 248.
- [39] Klesnil, M. - Lukáš, P.: Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání. Akademia, Praha 1975.
- [40] Křupka, V. – Nováček, J.: Spoj pláště se dnem stojatých válcových nádrží. Zváranie, Svařování, ročník 50, číslo 5, 6, 2001, str.116 až 120. ISSN 0044 – 5525.

## 9 Poděkování

Výsledky presentované v této přednášce byly dosaženy při projektu EU Contract N° FIKS-CT-2001-20198, projektu ČEZ a.s. JE Temelín č. ETE/INV/2803/01 „Dokončení programu řízeného stárnutí hlavního cirkulačního potrubí JE Temelín“ a projektu MPO č. FD-K3/015.

## 10 English summary

Requirements on the load carrying capacity of structures growth quickly than producers are able to increase the material strength characteristics. It causes a rapidly degradation of strength characteristics of materials and functions of structures at operating conditions. Owners of structures are interesting in their long time operation over the time assumed by the project. Systems of aging/lifetime management are therefore used.

Calculation strains, internal forces and stresses only for testing and the highest operating loads cannot guarantee the service reliability and safety of designed structures. Resistance of materials against achievement of individual limit states as are deformation, load carrying capacity, damage, cracks, failures, stress corrosion cracking etc. has to be assessed. Achievement of limit states is admitted with given safety factors; prospectively the stage to initiation of surface defects is admitted only, no their growth. These analyses need detailed information about real operating loads and their changes in the time, about conventional and non conventional characteristics of materials, manufacturing technology, about cases of a transport, assembly, service attendance and about consequences of failures and accidents. An important parameter is acceptability of operating expenses expended by owner for repairs and maintenance of structures.

Designer and technologist have to decrease the risk of accident of structures to minimum. The very frequently used deterministic analyses cannot provide the level of the risk. Therefore probabilistic analyses obtain an over greater applying. Probabilistic analyses however need to elaborate the scenario of the rise of failures. Mathematical description of damage processes of materials which needs statistical parameters of independent variables are demanded.

Examples of the scenario of the rise of failures and mathematical descriptions of damage processes of materials and examples of long time measurement by diagnostic system DIALIFE are shown.