

SCIENTIFIC PAPERS  
OF THE UNIVERSITY OF PARDUBICE  
Series B  
The Jan Perner Transport Faculty  
5 (1999)

**STRUKTURALIZACE DEGRADAČNÍCH PROCESŮ SE ZAMĚŘENÍM  
NA KAVITAČNÍ OPOTŘEBENÍ**

Františka PEŠLOVÁ <sup>1)</sup>, Přemysl JANÍČEK <sup>2)</sup>, Vladimír FUIS <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Katedra dopravních prostředků, Univerzita Pardubice  
<sup>2)</sup> Ústav mechaniky těles, VÚT Brno

## 1. Úvod

Pro současnou dobu, charakterizovanou mohutným a všestranným nasazováním počítačů, je charakteristická nejen informační exploze zasahující všechny lidské činnosti, ale též tendence řešit problémy kolem nás komplexními přístupy v podobě využívání experimentálního, výpočtového a znalostního modelování. Přemíra informací, které na nás v odborné i společenské sféře každodenně doléhají, mimo jiné vyžaduje, abychom již existující i vznikající poznatky strukturalizovali, a tím je činili přehlednými. Také složitost problémů, řešených v technické vědě a technické praxi, vede k nutnosti řešit je interdisciplinárně, což vyžaduje mít ujasněné obsahové stránky používaných pojmů. To byly podstatné důvody, které vedly autory tohoto příspěvku k pojednání o degradačních procesech a detailněji o jednom z nich, o kavitačním opotřebení. Strukturalizace entit souvisejících s degradačními procesy je realizována v duchu systémového pojetí.

## 2. Vymezení pojmu degradace a její vlastnosti

Pojem degradace lze na nejobecnější úrovni vymežit takto:

**Degradace** je proces zhoršování vlastností určitého reálného nebo abstraktního objektu v konkrétních časoprostorových podmínkách.

Podle druhů objektů lze pak hovořit o degračních procesech u objektů:

- *přírodních* - degradace vlastností půdy, hornin, vodstva, moří, atmosféry, atd.,
- *biologických* - u člověka degradují nejen vlastnosti jeho tkání ale i vlastnosti psychické,
- *sociologických* - degradace vlastností společnosti,
- *sociotechnických* - soustavy s interakcemi technika- společnost,
- *technických* - zejména ve vztahu ke strukturám objektů vyšetřovaným jako soustavy (degradovat mohou jak vlastnosti prvků tak i vazeb mezi prvky), tak ve vztahu ke svému okolí - jedná se o degradaci vlastností vazeb objektu se svým okolím.

Je to poněkud nezvyklé, ale degradace, jako pojem vytvořený pro proces zhoršování vlastností objektů, má i sama o sobě své vlastnosti, jak vyplývá z následujícího členění degračních podle různých kritérií.

#### **A. Podle četnosti výskytu degračního procesu**

**A1 - Degradace diskrétní** (jedno nebo více násobné) - zhoršení vlastností objektu nastává jednorázově, v určitém časově vymezeném intervalu. Např. u biologických objektů během onemocnění, během expozice nepříznivých vlivů okolí na člověka, u materiálů technických objektů, zejména v průběhu výroby materiálů nebo výroby či rekonstrukce objektů (svařování, nýtování).

**A2 - Degradace kontinuální** - zhoršování vlastností objektu je v čase nepřetržité a s narůstajícím časem se zhoršování vlastností zvětšuje. Typickým případem u bioobjektů je degradace vlastností lidských tkání (vyjma nervové), u technických materiálů je typickým případem kumulace únavových poškození.

#### **B. Podle délky trvání degračních**

**B1 - Degradace vratné** (dočasné) - u některých typů tkání bioobjektů je možné farmakologicky nebo rehabilitačně degrační pochody zastavit, nebo obnovit původní vlastnosti tkání.

**B2 - Degradace nevratné** (trvalé) - jsou charakteristické zejména pro materiály neživých objektů, typické jsou degradace v rámci únavového porušování.

#### **C. Podle velikosti degračované oblasti**

**C1 - Degradace lokální** - k degračním vlastností dochází v omezené oblasti vyšetřovaného objektu. Typickým případem je lokální degradace vlastností atmosféry v podobě ozónové díry. U biomateriálů dochází k degračním tkání v místě traumat. U strojních součástí nastává v mnoha případech degradace pouze v povrchových vrstvách tělesa, a to při interakci jejich povrchů s jinými tuhými tělesy nebo tekutinovými (kapalnými či plynnými) médii.

**C2 - Degradace globální** - k degračním vlastností dochází v celém objemu vyšetřovaného tělesa.

#### **D. Podle vztahu k funkčnosti objektu**

**D1 - Degradace funkčně přípustné** - velikost degradačních změn nevede ke změně funkčnosti tělesa, a tedy ke vzniku mezních stavů.,

**D2 - Degradace funkčně nepřípustné** - degradace vlastností jsou takového rázu, že objekt nemůže vykonávat svou funkci, což znamená že dochází ke vzniku mezního stavu. U bioobjektů jsou to případy selhání orgánů (jater, srdce, slinivky, ledvin), u technických objektů jsou to např. mezní stavy porušení soudržnosti materiálu (trhliny, lomy), mezní stavy deformace a mezní stavy stability.

#### **E. Podle doby jejich vzniku**

**E1 - Degradace vzniklé v době vzniku objektu** - u bioobjektů jsou to degradace tkání a tím i orgánů v prenatálním období, u technických materiálu v procesu jejich výroby.

**E2 - Degradace vzniklé v procesu života objektu** u člověka během jeho života, u TO za jeho provozu.

### **3. Členění materiálových vlastností konstrukčních materiálů**

Předmětem zkoumání v tomto příspěvku jsou především technické objekty a u nich degradace vlastností materiálů prvků a vazeb jejich struktur. Pro současné technické objekty je charakteristické, že prvky jejich struktur jsou značně heterogenní. Jedná se o:

- *heterogenitu druhovou* - prvky mohou být vyrobeny z různých, ovšem funkčnosti a spolehlivosti technického objektu podřízených materiálů: kovových (čistých kovů, neželezných slitin, ocelí a litin), přírodních a syntetických polymerů, anorganických nekovových materiálů (polovodičů, keramiky, skla apod.) a různých typů kompozitních materiálů,
- *heterogenitu vlastnostní (oborově-vlastnostní)* - prvkům mohou být přisuzovány různé typy vlastností, zejména vlastnosti mechanické, spolehlivostní, technologické, fyzikální, chemické, apod.

Další zúžení problematiky spočívá v tom, že je především zaměřena na degradační procesy těch materiálových vlastností, které souvisejí se ztrátou mechanické funkčnosti technických objektů a jejich prvků, zejména v důsledku opotřebování funkčních povrchů a porušování soudržnosti materiálu.

Mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů lze členit na tyto skupiny:

#### **A. Mechanické vlastnosti konstitutivní**

Jedná se o vlastnosti materiálů vyjadřujících jejich chování v procesu zatěžování v závislosti na přetvoření materiálu. Tato chování jsou popisována příslušnými matematickými závislostmi, označovanými jako konstitutivní (fyzikální) vztahy či rovnice. Jsou to závislosti mezi prvky tenzoru napětí a tenzoru přetvoření, v nichž se vyskytují i příslušné materiálové charakteristiky. Např. pro lineárně se chovající materiál a pro obecnou prostorovou napjatost je konstitutivním vztahem zobecněný Hookův zákon, který obsahuje příslušné moduly pružnosti a součinitele příčné kontrakce. Ty se běžně

označovaly jako elastické konstanty. Jenže chování materiálů není jenom elastické a navíc to nejsou konstanty, protože mohou být různě závislé (např. rychlostně, deformačně apod.). Proto je vhodné pro materiálové charakteristiky v konstitutivních vztazích použít pojem **konstitutivní charakteristiky materiálu**. Typ a počet těchto charakteristik závisí na charakteru chování materiálu (elastické, elasticko-plastické, vizkoeleastické) a na charakteru směrové anizotropie (izotropie, ortotropie, příčná izotropie, obecná anizotropie).

### **B. Mechanicko-fyzikální vlastnosti**

Patří sem následující charakteristiky:

- tlumící vlastnosti materiálu (např. logaritmický dekrement útlumu),
- teplotní roztažnost materiálu (lineární, objemová),
- tažnost, kontrakce, tvrdost, houževnatost.

### **C. Tepelné, elektrické a magnetické vlastnosti**

#### **D. Strukturní vlastnosti**

- strukturní nečistoty - např. u ocelí v podobě škodlivých příměsí P, S, Cu Sn, nežádoucích plynů (vodík, dusík, kyslík) a doprovodných a technologických přísad (Mn, Si, Al apod.)
- strukturní nehomogenita
- strukturní heterogenita

#### **E. Technologické vlastnosti**

Patří sem: tvářitelnost, slévateľnost, svařitelnost a obrobiteľnost.

#### **F. Spolehlivostní vlastnosti**

**F1 - na úrovni mikrostruktury materiálu** - oblast lomové mechaniky

prahová hodnota součinitele intenzity napětí

rychlost šíření trhlin

lomová houževnatost

**F2 - na makroúrovni** (jsou uvedeny ve sledu, v jakém se vyskytují v tahovém diagramu):

- mez kluzu
- exponent a koeficient deformačního zpevnění
- meze plastické stability
- mez pevnosti tvárné, křehké, únavové (v tahu, tlaku, ohybu, krutu) , creepové, koroze pod napětím

**F3 - odolnosti proti různým druhům opotřebení** (adhezivní , abrazivní, erozivní, kavitační, korozní, atd.).

#### 4. Členění degradačních procesů

V tomto odstavci je uvedeno rozčlenění degradačních procesů u konstrukčních materiálů v poněkud odlišném členění, než je doposud používáno. Autoři se domnívají, že předkládané členění je strukturně přehlednější, přičemž zachovává vžitě členění na degradace výrobní a provozní.

##### **A. Výrobní degradace**

*A1. Degradace v procesu výroby materiálu*

*A2. Degradace v procesu výroby technického objektu*

##### **B. Provozní degradace**

*B1. Degradace v makroobjemech těles*

- únavové degradační procesy
- creepové degradační procesy

*B2. Degradace v povrchových vrstvách těles*

Tyto degradace vznikají na površích těles v důsledku jejich interakcí se svým okolím. Tím mohou být jiná tělesa, nebo různé druhy kapalných a plyných médií. Vzniklé degradace mohou mít charakter:

- nepříznivých změn materiálových vlastností v povrchových vrstvách, s možnými následnými procesy porušování soudržnosti materiálu,
- tvarových a/nebo rozměrových změn povrchů těles, označovaných jako opotřebení.

K typickým degradačním procesům v povrchových vrstvách těles patří opotřebení a koroze, které lze na obecné úrovni vymezit takto:

**Opotřebení** je nežádoucí trvalá změna kvality povrchu tělesa způsobená mechanickými procesy, které mohou být doprovázeny procesy fyzikálními, elektrickými, chemickými nebo radiačními.

**Koroze** jako degradační proces je samovolně probíhající proces chemického nebo fyzikálně-chemického znehodnocování materiálů v důsledku jejich interakcí s různými tekutinovými médii.

Jednotlivé druhy degradačních procesů v povrchových vrstvách těles mohou vznikat v důsledku těchto typů interakcí:

##### **I1: těleso - těleso:**

- a) adhezivní opotřebení
- b) abrazivní opotřebení
- c) vibrační opotřebení
- d) kontaktní únava

##### **I2: těleso - tekutinové médium:**

- a) erozivní opotřebení

- b) kavitační opotřebení
- c) korozní opotřebení

### ***I3: kombinace interakcí:***

- a) porušování korozi za napětí
- b) kavitace v interakci s korozi
- c) interakce únavy s korozi
- d) interakce únavy s creepem

## **5. Kavitace a strukturovanost její procesů**

**Kavitace** je negativní jev vznikající v hydraulických technických objektech (dále též HTO), který mění vlastnosti povrchových vrstev těch jejich částí, které jsou v interakci s kavitační oblastí v kapalině, v důsledku čehož dochází k nežádoucím zhoršením vlastností a výkonových parametrů těchto zařízení, případně jejich vyřazení provozu.

**Kavitační oblast** je ta část objemu kapaliny v níž dochází k zániku plynnou fází naplněných dutin v kapalině (kavitačních bublin).

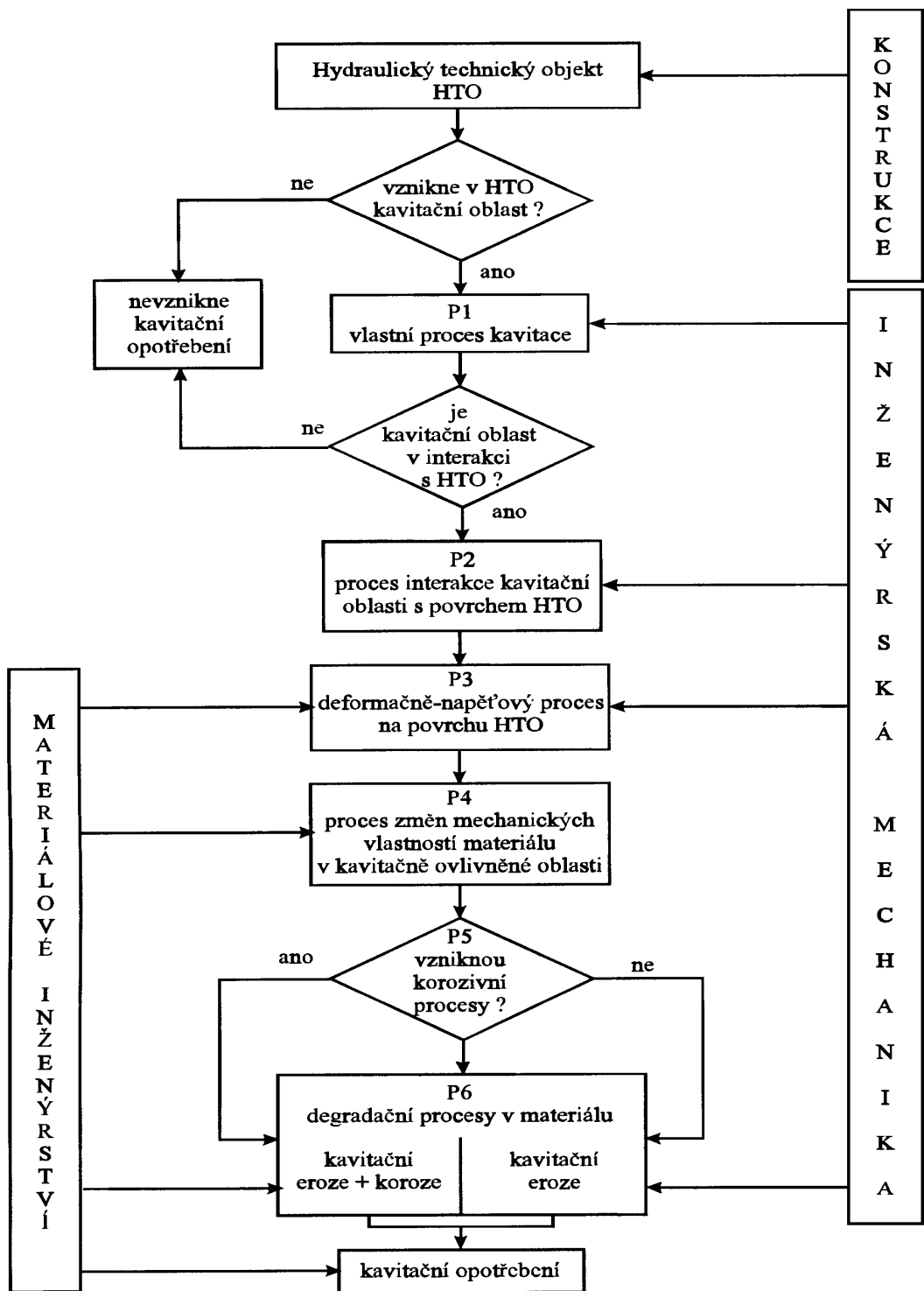
V duchu systémového přístupu je vhodné kavitaci vyšetřovat strukturovaně, a to ve vztahu k objektům a procesům, které na nich probíhají.

Z hlediska **objektové strukturalizace** vzniká kavitační poškození v interakci dvou objektů, a to tuhého tělesa a kapalného média.

Z hlediska **procesní strukturalizace** se proces kavitace skládá z těchto dílčích procesů (obr.1):

- **P1 - vlastní kavitační proces** (kavitace v užším slova smyslu), který může mít různé fyzikální podstaty
- **P2 - proces interakce kavitační oblasti s povrchem pevného tělesa**, s důsledky mechanickými, akustickými, chemickými, hydraulickými, elektrochemickými a výkonovými.
- **P3 - deformační procesy** v povrchové a podpovrchové vrstvě pevného tělesa vyvolující v ní deformačně-napjatostní stav.
- **P4 - proces změny mechanických vlastností materiálu.**
- **P5 - korozní procesy v povrchové vrstvě tělesa.**
- **P6 - degradační procesy materiálu** v povrchové a podpovrchové vrstvě. Jsou to procesy porušování soudržnosti materiálu vedoucí ke vzniku mikrolomů s následným oddělováním částic materiálu z povrchové vrstvy tělesa, což bývá též označováno jako **kavitační eroze**. Vyskytují-li se v průběhu degradačních procesů i procesy korozní a chemické, pak obvykle dochází k synergickému efektu.

Z procesní strukturalizace je zřejmé, kavitační problémy je nutno řešit interdisciplinárně, v součinnosti oborových pracovníků (obor turbin, čerpadel, potrubí

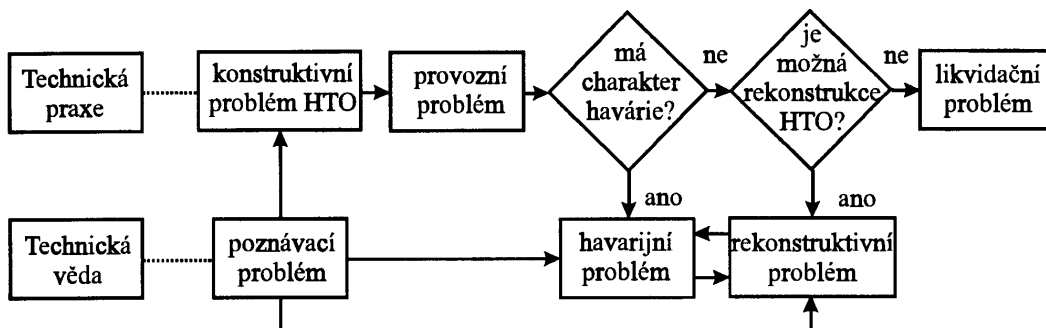


Obr. 1 Struktura procesů kavitace

apod.), inženýrské mechaniky (hydro a termomechanika, mechanika těles, lomová mechanika, mezní stavy) a materiálového inženýrství.

## 6. Typy problémů souvisejících s kavitací

V problematice kavitace k základním typům problémů patří problémy provozní, havarijní, rekonstruktivní, likvidační, konstruktivní a poznávací (obr.2).



Obr.2 Struktura procesů související s kavitačním porušováním

### A. Provozní problémy

Vznik provozních problémů je signalizován tím, že se zhoršují hodnoty parametrů vlastností a chování hydraulických strojů a zařízení, konkrétně parametrů:

- mechanických (zvrásnění povrchu tělesa, jeho zdrsnění, změna reliéfu povrchu, trhliny, kaverny, lomy, vibrace,...)
- hydraulických (zhoršené obtékání těles, zhoršená kvalita kapaliny,...)
- akustických (zvýšená hlučnost v důsledku kavitačního procesu a mechanických vibrací),
- výkonových (pokles výkonů strojů, zhoršené účinnosti,...).

Jestliže jsou uvedené změny hodnot parametrů zjištělné ale z hlediska provozu HTO jsou nepodstatné, stav HTO je průběžně sledován. Stanou-li se tyto změny podstatnými, pak podle závažnosti možných důsledků je HTO:

- subjektem opravován (úprava povrchu broušením, chemicko-tepelným zpracováním, navařením ochranné vrstvy, výměna porušeného prvku HTO, vyčištění kapaliny,...),
- rekonstruován (viz rekonstruktivní problém),
- likvidován (demonťován - Sběrné suroviny).

### B. Havarijní problémy

Za určitých okolností (nedostatečná údržba či kontrola HTO, vznik mezních stavů únavové, resp. křehké pevnosti,...) může nastat neočekávaná havárie HTO v důsledku kavitačního porušování soudržnosti. Provozní problém se stává problémem havarijním se všemi možnými důsledky, a to národohospodářskými, ekonomickými i právními.



### **C. Rekonstruktivní problémy**

Jednou z možností jak vyřešit provozní problém je rekonstrukce HTO. Ta může spočívat ve změnách:

- konstrukčních - změny geometrie či topologie prvků HTO vedoucích ke změně proudových podmínek kapaliny v HTO, které zamezují vzniku kavitačních oblastí a tím i procesů,
- materiálových - změna druhu materiálu.

### **D. Konstruktivní problémy**

V souladu s [2] je konstruktivní problém formulován takto: „Vytvořit ve vymezené blízké budoucnosti technický objekt tak, aby v době svého vzniku měl požadované vlastnosti a chování“. Jedná-li s o HTO, pak jednou z požadovaných vlastností je, aby byl odolný vůči vzniku a důsledkům kavitace. Pro současnou dobu by mělo být charakteristické, aby nové TO se navrhovaly progresivními přístupy, k nimž patří komplexní modelování, počítačové podpory a paralelní inženýrství [1]. Pro tyto přístupy je charakteristická komplexnost a interdisciplinarita řešení problémů v níž má nezastupitelné místo i materiálové inženýrství.

### **E. Poznávací problémy**

Jedná se o množinu problémů souvisejících s experimentálním a teoretickým vyšetřováním:

- fyzikálních podstat kavitace a procesu kavitace,
- vlivů různých fyzikálních, chemických a mechanických veličin na uvedené procesy,
- vhodných konstrukčních provedení HTO vedoucích k minimalizaci vzniku kavitace a tím i kavitace a tím i kavitace opotřebení,
- kavitace odolnosti různých typů materiálů a různých typů povrchových úprav prvků HTO,
- interakce mechanického kavitace a tím i kavitace opotřebení s korozními a chemickými procesy,
- podmínek, za nichž je možno kavitace a tím i kavitace opotřebení potlačit nebo dokonce odstranit.

Dominantní metodou při řešení uvedených problémů je v současnosti experimentální modelování (odst.7.2) v součinnosti s modelováním výpočtovým (odst.7.3).

## **7. Modelování kavitace a tím i kavitace opotřebení**

### **7.1 Členění modelování**

Modelování je v současnosti nejprogresivnějším přístupem k řešení problémů. Je označováno též jako nepřímý přístup k řešení problémů, protože problém se řeší s využitím pomocného, tzv. „**modelového objektu**“ (též MO). Podle charakteru tohoto objektu se rozlišují různé typy modelování [1]:

**Modelování materiální** (fyzické) - MO je fyzicky vymežitelný materiální objekt na němž se realizuje experiment. Toto modelování lze členit na podobnostní, analogové a experimentální [1], [2].

**Modelování výpočtové** (teoretické, často též označované jako „matematické“) - u něhož MO má charakter matematické teorie. Realizace výpočtového modelování vyžaduje:

- a) existenci matematické teorie (též MT) popisující ten jev, proces, chování, atd., které jsou předmětem řešení problému,
- b) matematickou řešitelnost MT,
- c) realizovatelný výpočtový algoritmus vycházející z MT,
- d) výpočetní prostředek na němž lze výpočtový algoritmus realizovat,
- e) vstupní údaje do výpočtového algoritmu.

Pokud nejsou splněny požadavky b) až e) pak matematická teorie není modelovým objektem MO, protože není prostředkem k řešení problému a nelze hovořit o matematickém modelování (detailnější analýza viz [1] a [2]).

**Modelování znalostní** - v současné době je spjato především s využitím metod umělé inteligence, zejména znalostních a expertních systémů [1], které jsou pak modelovými objekty. Informačními zdroji do databází údajů a znalostí těchto systémů mohou být: technické normy a předpisy, vědomosti, znalosti, poznatky a zkušenosti expertů, poznatky získané experimentálním a výpočtovým modelováním procesů kavitace a kavitačního porušování.

## 7.2 Experimentální modelování procesu kavitačního opotřebení

Vzhledem ke složitosti matematického popisu procesu kavitačního opotřebení je v současnosti experimentální vyšetřování tohoto procesu nejpoužívanější i nejefektivnější metodou. Lze ho považovat za experimentální simulační modelování, protože v laboratorních podmínkách se simulují procesy kavitace vedoucí ke kavitačnímu porušování [8],[9].

Jestliže se experimentálně řeší přímý kavitační problém pak se experimentálně vyšetřují důsledky kavitace na těleso u něhož je známá struktura materiálu a způsob vyvození kavitace na jeho povrchu. Cílem tohoto experimentálního modelování je zpravidla určení relativní kavitační odolnosti příslušného materiálu vůči kavitačnímu porušování [8], [9]. Aby se na zkušebních kavitačních zařízeních zkrátila doba experimentu, bývá experimentální objekt (obvykle zkušební tělíška) kavitačně aktivován podmínkách zvýšené „intenzity kavitace“, než jaká je v obvyklých provozních podmínkách v HTO.

Nejpoužívanějším kritériem pro hodnocení chování materiálu v procesu kavitačního porušování je **časová závislost hmotnostního úbytku „dm“ materiálu z povrchu tělesa** vyšetřovaná pro konkrétní způsob vybuzení kavitace a pro konkrétní typ

materiálu. Při tomto způsobu modelování je vlastní proces kavitace i proces kavitačního porušování vlastně „černou skřínkou“, protože tyto procesy jsou experimentátorovi „skryty“, a na to, co v této černé skřínce probíhá, se usuzuje pouze z následných **analýz metalografických** (posuzování změn struktury), **fraktografických** (posuzování charakteru trhlin a lomových ploch) a **mechanických** (tvrdost, zpevnění, elastické a pevnostní parametry materiálu).

K důsledkům procesu kavitačního opotřebení patří zvrásnění a zdrsnění povrchu tělesa, změna jeho reliéfu, výskyt mikrotrhlin, kaverny v povrchu tělesa, hmotnostní úbytek materiálu a makrolomy tělesa. Tyto veličiny pak charakterizují **kavitační opotřebení tělesa**. K nejvíce používaným kritériím kavitačního opotřebení patří:

- a) délka inkubační doby - vyjadřuje dobu během níž nedochází k měřitelnému úbytku materiálu z povrchu tělesa,
- b) velikost zvýšení drsnosti povrchu tělesa,
- c) počet a hloubka kavitačních kráterů vzniklých za určitou dobu (dále též TK) působení kavitace, nebo za jednotku času na plošném obsahu jednotkové velikosti,
- d) plošný obsah porušeného povrchu tělesa za dobu TK,
- e) úbytek objemu nebo hmotnosti zkoušeného materiálu za dobu TK nebo za jednotku času (toto kritérium bývá označováno jako „míra kavitačního opotřebení“),
- f) doba potřebná k dosažení určitého stupně kavitačního porušení, který je dán předchozími kritérii,
- g) rychlost kavitačního opotřebení, jako hodnota hmotnostního úbytku materiálu z povrchu tělesa za jednotku času,
- h) poměr plochy oblasti zasažené kavitačním opotřebením k celkové obtékané ploše tělesa.
- i) střední hloubka kavitačního poškození (určuje se jako podíl objemového úbytku materiálu a poškozené plochy).

Kritéria b) až e) vlastně vyjadřují určitou „míru opotřebení“ povrchu tělesa v procesu kavitačního porušování a slouží k posouzení tzv. **absolutní kavitační odolnosti**. Běžně je ovšem zavedena i tzv. **„relativní kavitační odolnost“**, jako poměr kavitačního opotřebení daného materiálu ke kavitačnímu opotřebením vztažného materiálu.

#### **Poznámka ke statistickému zpracování výsledků experimentálního modelování:**

Prakticky všechny vstupní veličiny do experimentálního modelování procesu kavitačního porušování mají statisticky náhodný charakter (určité statistické rozdělení a na zvolené hladině významnosti určitý konfidenční interval - jsou to veličiny intervalové). Stejný charakter proto musí mít i veličiny výstupní tvořené výsledky experimentu. Uvádění výsledků kavitačních experimentů v podobě funkční závislosti „dm-t“ je zásadně nepřijatelné, protože neodpovídá fyzikální podstatě vyšetřovaných stochastických procesů a je v rozporu s požadavkem úrovnové vyváženosti všech činností realizovaných v rámci řešení problému. Statistický přístup k řešení problému

kavitačního porušování ovšem vyžaduje realizovat statisticky významné množství opakovaných měření, což je finančně i časově náročné.

### 7.3 Výpočtové modelování kavitačních procesů

Jak již bylo uvedeno, nutnou, nikoliv však postačující podmínkou k řešení problému výpočtovým modelováním je existence matematické teorie (MT) zpracovatelné do realizovatelného výpočtového algoritmu. Vzhledem k uvedené strukturovanosti procesu kavitačního porušování nemůže existovat jediná MT ale množina dílčích teorií, konkrétně těchto:

- MT procesu kavitace (vznik kavitačních bublin v kapalině ),
- MT popisující strukturu materiálu (např. Voronoiových mozaik [6]),
- MT umožňující výpočtové stanovení deformačně-napěťového stavu v materiálu od tlakových rázů vyvolaných implodujícími kavitačními bublinami,
- MT pro výpočtové modelování procesu porušování soudržnosti materiálu.

Kdybychom pro výpočtové modelování formulovali problém stejně jako u experimentálního modelování, tedy „stanovit závislost hmotnostního úbytku materiálu v závislosti na čase“, pak bychom museli mít k dispozici tyto realizovatelné výpočtové algoritmy:

**A1** - Algoritmus pro kvantifikování zatížení povrchu tělesa od působení kavitace.

**A2** - Algoritmus pro automatické generování topologie struktury heterogenního materiálu, a to na základě statisticky pojatých poznatků o struktuře příslušného materiálu. Algoritmus by pro zadaná i procentuální objemová množství jednotlivých složek materiálu rozmísťoval jeho prvky (krystalická zrna, inkluze) náhodně po zadané oblasti, přičemž by respektoval charakteristické tvary zrn a velikost, případně jejich orientaci. Ve vytvořené oblasti by se nesměly vyskytovat vzájemně se překrývající zrna, případně mezery (pokud nejsou cílevědomě zadány). Jako ilustraci takové topologie polykrystalického materiálu je možno uvést Voronoiovy mozaiky pro 2D a 3D prostory [6], [7], [10], [11].

**A3** - Algoritmus, který by byl schopen určovat změny mechanických vlastností materiálu v závislosti na charakteru a velikosti předchozího zatěžování.

**A4** - Algoritmus, který by určoval hodnoty elastických a pevnostních materiálových charakteristik v každém časovém okamžiku v závislosti na předchozí historii zatěžování, jemu odpovídajících deformačně-napěťových stavů a na typu těchto zatížení.

**A5** - Algoritmus pro určování zbytkové napjatosti od výrobních technologických procesů a od technologických úprav povrchu tělesa.

**A6** - Algoritmus pro určování provozní deformace, přetvoření a napjatosti od provozního zatížení HTO (provozní napjatost).

**A7** - Algoritmus pro určování deformace a napjatosti v povrchové vrstvě tělesa od kavitačních tlakových rázů působících na toto těleso (kavitační napjatost).

**A8** - Algoritmus pro určování výsledné napjatosti, která je průnikem napjatosti zbytkové, provozní a kavitační.

**A9** - Algoritmus pro určování změny tvaru reliéfu povrchu tělesa, způsobenými deformačně-napěťovými stavy v povrchové vrstvě tělesa.

**A10** - Algoritmus popisující interakci korozních procesů v povrchové vrstvě tělesa.

**A11** - Algoritmus určující dobu a místo vzniku příslušných možných mezních stavu souvisejících s porušováním soudržnosti materiálu (mezní stavy pružnosti, tvárné pevnosti, křehké pevnosti, únavové pevnosti bez uvažování a s uvažováním koroze, mezní stavy trhlin) v jednotlivých bodech vyšetřované oblasti, a to na základě:

- předchozí historie zatěžování a doby jeho trvání,
- aktuálního stavu napjatosti v jednotlivých bodech oblasti (obecná, blížíící se k rovnoměrné tahové napjatosti (potenciální možnost křehkého porušení)),
- aktuálních hodnot pevnostních materiálových charakteristik.

**A12** - Algoritmus, který by byl schopný stanovit vliv korozních procesů v povrchové vrstvě tělesa na vznik mezních stavů od výsledné napjatosti.

**A13** - Algoritmy posuzující pohybové stavy trhlin v závislosti na čase pro celou vyšetřovanou oblast, a to pro případy kavitační eroze a též kavitační eroze a koroze.

**A14** - Algoritmus zaznamenávající prostorovou topologii lomových ploch v každém časovém okamžiku a posuzující, zda tyto nevytvořily uzavřenou podoblast (tedy potenciaální úlomek) a zda se tato podoblast může po kinematické stránce oddělit od vyšetřované oblasti.

**A15** - Algoritmus, který by byl schopen stanovovat objemy a hmotnosti uvolněných úlomku a u těchto dvou entit stanovovat jejich velikosti v závislosti na čase.

Posoudit realizovatelnost řešení problému kavitačního porušování výpočtovým modelováním je možno na základě inventury v současnosti existujících matematických teorií ve vztahu k algoritmům A1 až A15. Z této analýzy pak vyplynou tyto současné bariéry:

- *B1 Potenciaální bariéry ve vytváření systému veličin*
- *B2 Potenciaální bariéry ve vztahu k existenci matematických teorií*
- *B3 Potenciaální bariéry v nedostupnosti potřebné výpočetní techniky*
- *B4 Potenciaální bariéry ve vstupních údajích do algoritmů výpočtového modelování*
- *B5 Potenciaální bariéry v možnostech verifikace výsledků výpočtového modelování.*

#### **7.4. Současná úloha výpočtového modelování při řešení problémů kavitačního porušování**

Jaké jsou tedy současné možnosti výpočtového modelování při řešení problémů kavitačního porušování ? Vzhledem k uvedeným bariérám poměrně omezené, takže lze

řešit pouze určité dílčí problémy, a to s využitím simulačního modelování a citlivostní analýzy [1], [2].

Pro ilustraci uvádíme několik subproblémů, pro něž je výpočtové modelování vhodnou metodou řešení.

- a) Simulační modelování vlivu velikosti, rozložení a časového průběhu kavitačního tlaku na povrchu tělesa po implozi izolovaných i vzájemně se ovlivňujících dutin na posuvy, přetvoření a napětí ve vyšetřované materiálové oblasti u různých struktur mono a polykrystalických materiálů.
- b) Citlivostní analýza vlivu hodnot tlumících charakteristik na posuvy, přetvoření a napjatost od zatížení dle bodu a)
- c) Simulační modelování vlivu existence materiálově odlišných povrchových vrstev tělesa na napjatost v jeho podpovrchové vrstvě pro podmínky ad a) a ad b).
- d) Simulační modelování vlivu opakovaných plastických deformací na vznik a rozvoj dislokací a na změnu reliéfu povrchu tělesa.
- e) Prošetřování charakteru vlnových procesů v materiálu pro podmínky zatěžování ad a).
- f) Porovnávání různých modelů geometrie materiálové oblasti (rovinný model v podmínkách rovinné napjatosti a rovinné deformace, rotačně symetrický model, prostorový model vytvořený translací rovinných vrstev, prostorový obecný model) na charakter deformace a napjatosti v oblasti.
- g) Výpočtové modelování šíření trhlin na různých typech rozhraní pro různé tvary trhlin (prakticky jde o vytváření nových teorií a algoritmů).

Jako ilustraci aplikace výpočtového modelování v oblasti kavitačního porušování je možno uvést vstupní studii [12] v níž byl řešen takto formulovaný problém: „Získat informace o deformačně-napěťových stavech u modelového rovinného tělesa z polykrystalického materiálu, zatíženého na části jeho povrchu časově proměnným tlakovým impulsem“.

## 7.5. Využití znalostního modelování v řešení problémů kavitačních opotřebení

Vznik kavitace a kavitačního porušování patří mezi problémy k jejichž řešení se jeví jako vhodné využít znalostní modelování v podobě expertních systémů, protože se jedná o „problémy s velkým množstvím proměnných veličin stochastického charakteru“, které jsou velmi „obtížně řešitelné výpočtovým modelováním,“ přičemž je k „dispozici značné množství informací o chování hydraulických zařízení v podmínkách kavitace“ a dále „informace o kavitační odolnosti u různých typů materiálů“.

Expertní systémy by mohly obsahovat tyto tři submoduly:

- **Submodul pro oblast poznávacích problémů** - obsahoval by soudobé poznatky získané výpočtovým a experimentálním modelováním z oblasti procesu kavitace a kavitačního porušování. Konkrétně by to byl přehled existujících matematických

teorií, předpokladů a oborů jejich platnosti, dále veškeré teorie a poznatky z oblasti lomové mechaniky a mezních stavů používané v oblasti porušování soudržnosti a taktéž údaje o kavitační odolnosti materiálů.

- **Submodul pro řešení konstruktivních problémů** - shrnoval by poznatky expertů o provozních kavitačních problémech u hydraulických zařízení, dále poznatky o změně jejich provozních vlastností a chování došlo-li u nich k výskytu kavitace a kavitačního porušování, a to ve vztahu k jejich konstrukčním, hydrodynamickým, procesním a materiálovým charakteristikám. Tyto poznatky by bylo možné použít pro návrhy nových hydraulických strojů a zařízení.
- **Submodul pro řešení rekonstruktivních problémů** - obsahoval by poznatky expertů o tom, jak byla rekonstruována hydraulická zařízení u nichž byly zjištěny různé stupně kavitačního porušení.

## 8. Závěr

Příspěvek přináší netradiční přístup k problematice degradačních procesů a k problematice kavitačního porušování, spočívající především v obecné strukturalizaci vlastností degradace materiálu jako důsledku degradačních procesů, dále ve strukturalizaci materiálových vlastností konstrukčních materiálů, strukturalizaci degradačních procesů a strukturalizaci procesů probíhajících během kavitačního opotřebení. Zcela netradičně jsou zde vymezeny typy problémů souvisejících s problematikou kavitačního porušování v technické praxi. Komplexně je zde pojednáno o modelování, jako progresivním prostředku k řešení problémů. Konkrétně se vymezuje postavení materiálního, výpočtového a znalostního modelování při řešení problematiky kavitačního opotřebení.

*Lektoroval: Prof. Ing. Ctirad Kratochvíl, DrSc.*

Předloženo v dubnu 2000.

## Literatura

- [1] Janíček P., Ondráček E.: Řešení problémů modelováním. Skriptum. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně. 1998.
- [2] Ondráček E., Janíček P.: Výpočtové modely v technické praxi. Praha 1991 SNTL.
- [3] Noskievič J.: Kavítace. Academia. Praha. 1964.
- [4] Kavitační názvosloví a symbolika, ČSAV Praha 1979.
- [5] Nioskievič J.: Kavítace hydraulických částí. Academia Praha 1969.
- [6] Voronoi G.F. : Nouvelles applications des paramètres continus à la theorie des formes quadratiques. Deuxième Mémoire, Recherche sur les paralléloèdres primitifs. J. Reine Angero Math. 134 (1908) p. 198-287.
- [7] Saxl J., Ponížil P.: 3D Voronoi tessellations generated by Poisson and lattice cluster fields. Acta Stereologica 17 (1998), s. 247-252.
- [8] Pešlová F.: Kavitačné porušovanie kovových materiálův. Habilitační práce. Žilina. 1994.

- [9] Pešlová F.: Úloha materiálového inženýrství v oblasti kavitačního porušování. Teze profesorské přednášky. Dopravní fakulta J.Pernera, Univerzita Pardubice.1999.
- [10] Šandera P., Pokluda J.: Interkrystalické větvení křehké trhliny ve Voronoiových mozaikách. Kovové materiály, 4/1996, str. 230-240.
- [11] Horníková J., Šandera P., Pokluda J.: Efektivní součinitel intenzity napětí pro dvojnásobně vyhnutou trhlinu ve Voronoiově mozaice. Inženýrská mechanika. 6/1999, s.97-102.
- [12] Fuis V., Pešlová F., Janíček P.: Vstupní studie do řešení problémů kavitačního modelování výpočtovým modelováním. Inženýrská mechanika. V tisku.

## Resumé

### **STRUKTURALIZACE DEGRADAČNÍCH PROCESŮ SE ZAMĚŘENÍM NA KAVITAČNÍ OPOTŘEBENÍ**

Františka PEŠLOVÁ, Přemysl JANÍČEK, Vladimír FUIS

Příspěvek se v systémovém pojetí zabývá strukturalizací degradačních procesů, přičemž hlavní pozornost je věnována problematice kavitačního opotřebení. V první polovině příspěvku jsou uvedeny struktury: vlastností degradace, materiálových vlastností konstrukčních materiálů, degradačních procesů, procesů kavitace a problémů souvisejících s kavitací. Druhá polovina příspěvku se zabývá využitím experimentálního, výpočtového a znalostního modelování při řešení problémů kavitačního opotřebení.

## Summary

### **STRUCTURE OF DEGRADATION PROCESSES WITH A VIEW TO THE CAVITATION WEAR**

Františka PEŠLOVÁ, Přemysl JANÍČEK, Vladimír FUIS

The paper is, in the system concept, dealing with the processes of degradation, the main attention is dedicated to the cavitation problem. In the first part, the following structures are mentioned: the degradation characteristics, the materials properties of construction materials, the degradation processes, the cavitation processes and the questions related to the cavitation. The second part treats the exploitation of an experimental, computational and acquaintance simulation during the cavitation problem solving.

## Zusammenfassung

### **STRUCTURALISATION DER DEGRADATION-PROZESSE MIT EINSTELLUNG AUF KAVITATIONS-VERSCHENS**

Františka PEŠLOVÁ, Přemysl JANÍČEK, Vladimír FUIS

Der Beitrag befasst sich in der System-Konzeption mit der Stukturalisation der Degradations-Prozesse, wo die Anfruerksamkeit vor allem der Problematik des Kavitations - Verschleis Gewidmet wird. In der ersten Hälfte des Beitrags sind Folgente Strukturen angefünot. Die Eigenschaften der Degradation, der Material-Eigenschaften der Konstruktions-Materiale, der Degradation-Prozesse, der Prozesse der Kavitation und der mit Kavitation zusammenhängender Probleme. Die zweite Hälfte des Bietrags befasst sich mit der Ausnutzung experimentalen, numerischen und Sachwerstandingen modelierung bei der Losung der Kavitations -Verschleis-Probleme.

Františka Pešlová, Přemysl Janíček, Vladimír Fuis: