

SZZ pro NS – Inženýrská mechanika a biomechanika

Tematický okruh: řešení deformace a napjatosti v mechanice těles

1. Řešení problémů modelováním

- Podstata modelování, modelový objekt, matematická teorie jako modelový objekt výpočtového modelování. Teorie analytické, numerické, umělo-inteligentní.
- Specifické typy modelování: Citlivostní analýza, simulace, optimalizace, identifikace.
- Tvorba výpočtového modelu, systém podstatných veličin, dílčí výpočtové modely: okolí, geometrie tělesa, vazeb, zatížení, materiálových vlastností, ovlivňování, projevů (malé a velké posuvy a přetvoření), důsledků (spolehlivost, mezní stavy).
- Typy modelování: přímé, nepřímé, deterministické, stochastické.
- Výběr metody řešení.

2. Základní pojmy v oblasti deformačně-napětových (D-N) stavů

- Vymezení pojmů: deformace (posuvy, přetvoření), napětí a napjatost v bodě tělesa. Hlavní souřadnicový systém, hlavní směry a hlavní roviny tenzoru napětí a přetvoření, hlavní napětí, hlavní přetvoření. Hlavní směry materiálu, jejich definice a vzájemné vztahy u ortotropního materiálu.
- Typy napjatostí, typy přetvoření, znázornění napjatosti a přetvoření v Mohrově rovině.
- Vymezení pojmu konstitutivní vztah (model). Typy konstitutivních vztahů pro oblast deformačně-napětových stavů. Lineárně elastický model materiálu izotropní, ortotropní a anizotropní, počty jejich nezávislých konstant.

3. Analytické řešení (D-N) stavů těles

- Vztahy obecné pružnosti (rovnice rovnováhy, geometrické rovnice, konstitutivní vztahy), okrajové podmínky.
- Algoritmus diferenciálního deformačního (silového) řešení deformačně-napětových stavů těles.
- Realizovatelnost analytického a numerického řešení získaných diferenciálních rovnic v deformacích a napětích.
- Základní typy analyticky řešitelných těles: pruty, stěny, desky, stěnodesky, skořepiny – předpoklady o jejich geometrii, zatížení, vazbách, napjatosti a deformaci.

4. Výpočtové modelování (D-N) stavů prutových těles

- Definice prosté pružnosti prutů - soustava prutových předpokladů.
- Jednoduchá namáhání (tah, tlak, ohyb, krut); vyžaduje se znalost základních vztahů a postupů pro určení napětí a deformačních parametrů (Castiglianova věta, integrace rovnice průhybové čáry)
- Kombinovaná namáhání prutů – určení napětí a deformačních parametrů.
- Lomené a (silně, slabě) zakřivené pruty, rámy.

5. Výpočtové modelování (D-N) stavů válcového tělesa

- Složky přetvoření a napětí na uvolněném elementárním prvku, okrajové podmínky při zatížení vnitřním a vnějším tlakem.

- b) Průběhy radiálních, obvodových a osových napětí u dutého válcového tělesa beze dna a se dnem při zatížení vnitřním a vnějším tlakem.

6. Výpočtové modelování (D-N) stavů rotačně symetrické tenké stěny

- a) Složky přetvoření a napětí na uvolněném elementárním prvku, okrajové podmínky při zatížení vnitřním a vnějším tlakem.
- b) Průběhy radiálních a obvodových napětí u mezikruhové tenké stěny, u plné kruhové tenké stěny a stěny s centrálním otvorem $r \rightarrow 0$.

7. Výpočtové modelování (D-N) stavů bezmomentové (membránové) rotačně symetrické skořepiny

- a) Předpoklady bezmomentovosti, faktory narušující membránovou napjatost ve skořepině.
- b) Složky membránových napětí na elementárním uvolněném prvku skořepiny - Laplaceova rovnice, určení meridiánových napětí.
- c) Určení radiálních posuvů rotačně symetrické skořepiny.

8. Metoda konečných prvků ve výpočtovém modelování (D-N) stavů těles

- a) Diskretizace kontinua pomocí deformační varianty MKP.
- b) Lagrangeův variační princip.
- c) Prvky, uzly, báze funkce, základní rovnice MKP pro statickou úlohu, struktura matice tuhosti, konvergence MKP, odhad přesnosti řešení.
- d) Typy konečných prvků a jejich deformační parametry, zadávání okrajových podmínek.
- e) Základní rovnice MKP v dynamice, struktura matice hmotnosti a explicitní algoritmus řešení nestacionární dynamické úlohy – základní myšlenka a výhody.

9. Základní typy nelinearit v mechanice těles (kontaktní, geometrické, materiálové).

- a) Podstata a možnosti analytického řešení jednotlivých typů nelinearit.
- b) Přírůstkově-iterační algoritmus numerického řešení nelineárních úloh v MKP, kontrola konvergence, zatěžovací krok – přírůstek – iterace (load step - substep - iteration).

10. Kontaktní úlohy

- a) Základní možnosti numerického řešení.
- b) Podstata pokutového algoritmu, vliv volby tuhosti kontaktního prvku na přesnost řešení a rychlost konvergence.

11. Velké posuvy (přetvoření)

- a) Eulerův/Lagrangeův popis pohybu kontinua, objektivní tenzory napětí/přetvoření svázané s oběma popisy, energetická konjugovanost tenzorů.
- b) Skutečná vs. smluvní (inženýrská) napětí a přetvoření, jejich definice a vzájemný přepočítání při určování pracovní křivky materiálu z tahové zkoušky.

12. Pružně-plastické chování materiálu

- a) Deformační vs. inkrementální teorie plasticity, podmínky plasticity, zákon tečení, typy zpevnění, Bauschingerův efekt.
- b) Pružně-plastický materiál bez zpevnění a možnosti analytického řešení základních úloh: pružně-plastický ohyb nosníků, zbytkové napětí po odlehčení, plastický kloub, mezní stav ideální plastické únosnosti

13. Pružně-plastická odezva materiálu při cyklickém zatěžování, zatěžování tvrdé/měkké, cyklické zpevnění/změkčení, cyklická deformačně-napěťová křivka, možnosti popisu pomocí nelineárních modelů zpevnění (Voce, Chaboche-jen základní charakteristika, ne rovnice)

14. Lineárně viskoelastické modely materiálu

- a) Rozlišení elastického, elasticko-plastického a viskoelastického chování materiálu podle projevů.
- b) Základní modely lineární viskoelasticity, jejich odezva při statickém a dynamickém zatěžování, komplexní modul pružnosti, ztrátový faktor.

15. Hyperelastické modely materiálu

- a) Vymezení hyperelastivity, struktura funkce měrné energie napjatosti
- b) Příklady izotropních hyperelastických modelů. Typy mechanických zkoušek elastomerů.
- c) Typy neelastického chování elastomerů a možnosti jeho modelování.
- d) Anizotropní hyperelastické modely, základní matematická formulace, strukturní tenzor.

16. Kompozitní materiály

- a) Typy kompozitních materiálů, jednosměrové dlouhovláknové kompozity a určení jejich elastických konstant.
- b) Elastické konstanty pro transversálně izotropní, ortotropní a anizotropní materiál, jejich fyzikální limity.
- c) Sendvičové nosníky - jejich výhody, princip návrhu, rozložení napětí při ohybu.

17. Numerické řešení úloh stability konstrukcí pomocí MKP

- a) Základní pojmy – stabilita, bifurkace, imperfekce, postkritické chování konstrukce
- b) Dvě základní strategie numerického řešení stability: bifurkační chování ideálních případů bez imperfekcí (linear buckling) - řešení problému vlastních čísel / borcení konstrukcí s imperfekcemi (nonlinear buckling) - řešení standardním přírůstkově-iteračním algoritmem pro nelineární úlohy

18. Měřicí metody pro experimentální analýzu přetvoření a napětí v tělesech

- a) Přehled měřicích metod v mechanice těles.
- b) Princip elektrické odporové tenzometrie, typy tenzometrů, citlivost tenzometru a jeho elektrické zapojení.
- c) Princip metody digitální korelace obrazů.

Tematický okruh: dynamika

1) Dynamika hmotného bodu a soustav hmotných bodů

- a) Základní pojmy (hmotný bod, hybnost moment hybnosti)
- b) Práce, výkon, energie
- c) Věta o změně hybnosti, momentu hybnosti, Newtonovy pohybové rovnice, d'Alembertův princip, Lagrangeovy rovnice I. druhu
- d) I. a II. impulsová věta, Zákon o změně kinetické energie, Zákon zachování mechanické energie,
- e) Dynamika soustavy hmotných bodů, hmotný střed soustavy hmotných bodů, energie, hybnost, zákon zachování hybnosti

2) Geometrie hmot

- a. Vztažný souřadný systém, těžiště, hmotnost
- b. Tenzor setrvačnosti – Osové momenty setrvačnosti, deviační momenty
- c. Hlavní osy a hlavní momenty setrvačnosti
- d. Rovinné momenty setrvačnosti, polární moment setrvačnosti
- e. Steinerova věta, transformace tenzoru setrvačnosti při natočení souřadného systému

3) Dynamika těles a aplikace

- a) Hybnost/moment hybnosti tělesa
- b) Pohybová rovnice pro translační a rotační pohyb tělesa
- c) Pohybová rovnice pro obecný rovinný pohyb tělesa
- d) Sférický pohyb tělesa, obecný prostorový pohyb
- e) Gyroskopické účinky a jejich aplikace (Coriolisova síla, gyroskopický moment)

4) Dynamika rázu těles

- a) Přímý centrální ráz – fáze rázu, koeficient restituace, rázový diagram
- b) Přímý excentrický ráz
- c) Základy Hertzovy teorie rázu

5) Vyvažování tuhých a pružných rotorů

- a) Definice tuhého a pružného rotoru
- b) Příčiny nevyváženosti
- c) Statické vyvažování tuhých rotorů
 - i. podstata statického vyvažování
 - ii. statické vyvažování za klidu
 - iii. statické vyvažování za rotace
- d) Dynamické vyvažování tuhých rotorů
 - i. Podstata dynamického vyvažování
 - ii. Obecná metoda vyvažování ve dvou rovinách

- Vyvažování pružných rotorů

6) Dynamika soustav tuhých těles

Metody sestavování pohybové rovnice pro soustavy s 1 a více stupni volnosti, podstata a vhodnost jednotlivých metod:

- Metoda uvolňovací,
- metoda redukce,
- metoda Lagrangeových rovnic II. druhu

7) Analytická mechanika

- a) Vazby, zobecněná souřadnice
- b) Princip virtuálních prací

- c) Lagrangeovy rovnice II. druhu
- d) Rovnovážná poloha soustavy těles – ustálený stav

8) Lineární kmitání s jedním stupněm volnosti

- a) Volné kmitání – pohybová rovnice, počáteční podmínky, vlastní frekvence, součinitel dozívání, poměrný útlum, odezva v časové oblasti na počáteční podmínku
 - i. netlumené kmitání
 - ii. tlumené kmitání – modely tlumení s 1 DOF, vliv tlumení (podkritické, kritické, nadkritické)
- b) Vynucené kmitání – pohybová rovnice, počáteční podmínky, rezonanční frekvence, odezva v časové a frekvenční oblasti, resonance, fáze, vliv tlumení (podkritické, kritické, nadkritické).
 - Harmonické buzení, periodické buzení
 - Buzení nevyváhou
 - Kinematické buzení (řešení v relativních a absolutních souřadnicích)
 - Odezva na skok/obecnou sílu

9) Lineární kmitání s více stupni volnosti

- a) Pohybové rovnice, stavový model, přenosové funkce, zobrazení ve stavovém prostoru (fázové rovině)
- b) Problém vlastních hodnot
- c) Ortogonalita vlastních tvarů
- d) Modely tlumení
- e) Řešení ve frekvenční a časové oblasti
- f) Dynamický tlumič/hltič vibrací – princip, popis chování, využití

10) Nelineární kmitání

- a) Rozdíly lineární a nelineární kmitání (superpozice, proporcionalita, resonance)
- b) Typy a modely nelinearit
 - matematické kyvadlo
 - nelinearita tuhosti, (tvrdnoucí / měkcnoucí charakteristika, předpětí)
 - nelinearita v kontaktu (Hertzova tuhost) / vůle
 - nelineární modely tlumení
 - tření – modely tření, projevy nelinearity suchého tření
- c) Způsoby linearizace (okolo pracovního bodu, přímá linearizace, ekvivalentní linearizace, napojování řešení – po částech lineární model)
- d) Projevy nelinearit a typické vlastnosti (skeletova křivka, pomalé a rychlé přejezdy resonance, odezva při suchém tření)

11) Kmitání a vlnění kontinuí -základní předpoklady, kdy lze použít kontinuum jako fyzikální model hmotného, pružného tělesa – vztah mezi délkou vlny a rozměrem charakterizujícím diskrétní stavbu hmoty

- a) Kmitání a vlnění strun – pohybová rovnice, volné kmitání a postupné vlnění. Stanovení vlastního tvaru kmitání a vlastní frekvence v závislosti na okrajových podmínkách. Obecný tvar postupného vlnění a jeho fyzikální význam
- b) Kmitání a vlnění prutů -pohybová rovnice, volné kmitání a postupné vlnění. Stanovení vlastního tvaru kmitání a vlastní frekvence v závislosti na okrajových podmínkách. Obecný tvar postupného vlnění a jeho fyzikální význam. Disperze vln u příčného kmitání
 - i. Podélné kmity
 - ii. Torzní kmity
 - iii. Příčné kmity

- c) Kmitání membrán - pohybová rovnice, stanovení vlastního tvaru kmitání a vlastní frekvence v závislosti na okrajových podmínkách u membrány obdélníkového obrysu.
- d) Kmitání desek - pohybová rovnice, stanovení vlastního tvaru kmitání a vlastní frekvence v závislosti na okrajových podmínkách u desky obdélníkového obrysu.
- e) Přibližné metody výpočtu vlastních frekvencí- Rayleighova energetická metoda, Ritzova metoda, metoda konečných prvků

Tematický okruh: mezní stavy

1. Mezní stav pružnosti
 - dosažení z hlediska výpočtového a experimentálního
 - podmínka plasticity $\max \tau$ a HMH (von Mises), rozdíly
 - bezpečnost vzhledem k MS pružnosti
 - rozdíly v koncepci MS pružnosti a „statické pevnosti“ dle normy FKM
2. Mezní stav deformační stability prutu
 - možnosti výpočtu kritické síly (analytické, numerické – lineární, nelineární)
 - závislost síly na posuvu
 - zavedení nelinearity do numerického výpočtového modelu (MKP, Ansys WB)
 - Ramber-Osgoodův vztah
3. Základní pojmy z problematiky jakosti (kvality) a spolehlivosti.
 - vymezení pojmu jakosti a spolehlivosti
 - základní pojmy pravděpodobnosti a statistiky
 - ukazatele spolehlivosti
4. Metod pro určení pravděpodobnosti poruchy a teorie interference
 - Charakteristiky kombinace náhodných veličin
 - Teorie interference
 - Pravděpodobnostní posouzení
 - o metody numerické integrace
 - o aproximační metody (např. FORM, SORM)
 - o simulační metody (např. Monte Carlo, Latine Hypercube Sampling, Importance Sampling)
5. Základní koncepce lomové mechaniky a vymezení oblastí jejich použitelnosti
 - vymezení lomové mechaniky (základní princip, přenositelnost dat ze zkušebních vzorků na reálné konstrukce)
 - koncepce lineárně elastické lomové mechaniky (LELM)
 - energetické
 - napětové
 - koncepce elasto-plastické lomové mechaniky (EPLM)
 - kritické rozevření trhliny
 - J-integrálu
6. Možnosti popisu chování tělesa s trhlinou při jednosměrném (monotónním) zatěžování.
 - vymezení pojmů stabilní a nestabilní růst trhliny při jednosměrném zatěžování
 - podmínka stability
 - iniciace nestabilního růstu trhliny při statickém a dynamickém zatěžování v oblasti LELM a EPLM (K_{IC} , K_{Id} , δ_C , J_{IC})
 - stabilní (subkritický) růst trhliny - podmínky iniciace a růst (R-křivky, J_{IR} -křivky)
7. Možnosti popisu chování tělesa s trhlinou při cyklickém namáhání.
 - etapy růstu trhliny při cyklickém namáhání
 - popis v-K křivky (jednotlivé oblasti, experimentální určení)
 - Prahová hodnota pro šíření únavové trhliny
 - Při konstantní amplitudě namáhání – zákonitosti růstu trhlín, stanovení životnosti

8. Možnosti popisu chování tělesa s trhlinou při proměnném cyklickém namáhání.
 - popis v-K křivky, její závislost na asymetrii cyklu
 - zákonitosti růstu trhlin
 - výpočet životnosti pro dané spektrum zatížení
 - modelování šíření únavové trhliny pomocí MKP

9. Základní koncepce lineárně elastické lomové mechaniky. Jejich přehled a podstata. Základní rozdělení:
 - energetické
 - hnací síla trhliny
 - J – integrál
 - hustota deformační energie (Sih)
 - napěťové - součinitel intenzity napětí

10. Koncepce součinitele intenzity napětí (SIN)
 - napětí a deformace u kořene trhliny (plastická zóna)
 - definice pole napětí v okolí kořene trhliny pomocí součinitele intenzity napětí
 - metody pro jeho stanovení (analyticky, inženýrsky ...)
 - numerické stanovení SIN (přímá metoda, metoda posunutých uzlových bodů, J-integrál)
 - zásady při numerickém určování součinitele intenzity napětí

11. Základní koncepce elasto-plastické lomové mechaniky (EPLM)
 - zdůvodnění nutnosti použití EPLM (výhody a nevýhody proti LELM)
 Koncepce kritického rozevření trhliny
 - vymezení COD a CTOD
 - určení kritické velikosti trhliny δ_c
 Koncepce J-integrálu
 - energetická interpretace
 - způsob určení J-integrálu (především MKP)
 - zásady při numerickém určování J-integrálu

12. Lomová houževnatost.
 - použití, stanovení kritické délky trhliny
 - závislost lomové houževnatosti na materiálu, teplotě, napjatosti, rychlosti zatěžování
 - způsoby a metodika určení lomové houževnatosti (K_{IC})
 - dynamická lomová houževnatost

13. Tranzitní chování materiálu a tranzitní teploty.
 - jak se tranzitní chování materiálu projevuje
 - vymezení nejpoužívanějších referenčních teplot
 - lomová houževnatost a teplota (master křivka)
 - zkouška rázem v ohybu (vrubová houževnatost)

14. Základní stádia únavového porušení.
 - Stadium iniciace mikrotrhliny

- změny mechanických vlastností, rozvoj dislokační struktury, lokalizace cyklické deformace
- iniciace trhlin (iniciační místa, délka iniciace u hladkých vzorků a těles s vruby, defekty)
- růst krátkých trhlin (rozdíly proti dlouhým trhlinám)

Stadium růstu dlouhých trhlin (makrotrhlin)

Fraktografie lomové plochy po únavovém šíření

15. Posouzení životnosti součásti při užití koncepce nominálních napětí
 - charakteristika koncepce nominálních napětí a oblast jejího využití
 - zátěžný cyklus (konstantní amplituda, proměnlivá amplituda – Rainflow, Palmgren Minerovo pravidlo)
 - křivky životnosti při měkkém zatěžování
 - součinitelé zahrnující podstatné vlivy na mez únavy (součinitel vrubu, vliv středního napětí v oblasti trvalé pevnosti, poměrný gradient napětí, ...)
 - linearizace napětí
16. Posouzení životnosti součásti při užití koncepce lokálních napětí a deformací
 - charakteristika koncepce lokálních napětí a deformace a oblasti jejího využití
 - zátěžný cyklus (konstantní amplituda)
 - křivky životnosti při tvrdém zatěžování
 - koncentrace napětí a deformace v kořeni vrubu v pružně plastické oblasti (především Neuberova koncepce)
17. Posouzení životnosti svarů dle IIW
 - úroveň posouzení svarového spoje (nominální, tvarová, špičková)
 - křivky životnosti dle kategorie detailu FAT
 - postup výpočtu jednotlivých napětí (nominální, tvarová, špičková)
 - vliv zbytkových napětí, typ svařovaného materiálu a přídavného materiálu, možnosti zvýšení únavových charakteristik
18. Metodický postup při zajišťování odolnosti konstrukce proti únavovému šíření trhliny pomocí lomové mechaniky
 - a) definice iniciační vady (trhliny), možnosti defektoskopických metod
 - b) definice kritické délky trhliny (nestabilní šíření)
 - c) postup při řešení této úlohy pomocí MKP
 - d) definice inspekčních intervalů (na základě odhadu stabilního šíření únavové trhliny)
 - e) použití zátěžného spektra pro odhad inspekčních intervalů
19. Metodika posouzení zjištěné vady typu trhlina v reálné konstrukci.
 - a) shromáždění potřebných vstupních údajů
 - b) určení efektivní velikosti vady
 - promítnutí
 - idealizace a lokalizace
 - vzájemné ovlivňování

- rekatégorizace

- c) postup při řešení této úlohy pomocí MKP
- d) určení kritické velikosti vady pro různé mezní stavy (statické, únavové namáhání)
- e) celkové zhodnocení

Tematický okruh: biomechanika

1. Silové působení v kyčelním spojení
2. TEP kyčelního kloubu, historie a typy
3. Fixace zlomenin na dolní končetině, historie a typy
4. TEP na horní končetině
5. Páteř, popis a biomechanika páteře
6. Páteřní fixátory
7. Spojení na skeletu člověka z biomechanického hlediska
8. Zubní implantáty, historie a typy
9. Kostní tkáň, její vlastnosti a možnosti jejího modelování v biomechanice
10. Výpočtové a experimentální modelování v biomechanice
11. Struktura cévní stěny, vlastnosti jejích složek, typický tvar závislosti napětí-přetvoření pro cévní stěnu a vliv jednotlivých komponent.
12. Složení krve, vliv jejích složek na viskozitu a neneutonské chování. Závislost smykového napětí na gradientu rychlosti, zdánlivá viskozita a její modely.
13. Hemolýza, srážlivost krve, rychlostní profil proudící krve a jeho důsledky.
14. Anatomie a struktura srdečních chlopní, jejich náhrady.
15. Arteriální stenty a jejich konstrukční principy, materiály s tvarovou pamětí a jejich chování.
16. Cévní náhrady, jejich typy, propustnost, poroelasticita.
17. Struktura živé buňky, její mechanicky významné součásti, modely mechanického chování, tensegritní soustavy.
18. Anatomie, struktura a princip činnosti srdce, princip svalové kontrakce, převodní systém srdeční, EKG, p-V diagram srdečního cyklu.
19. Hlavní cévy lidského těla, průběh tlaku v nich, Windkessel effect, podobnostní kritérium pro pulzační proudění.
20. Způsoby podpory selhávajícího srdce, podpůrná srdeční čerpadla, totální srdeční náhrady.
21. Akustické veličiny a metody jejich měření, hladiny akustických veličin, vlnová rovnice a její řešení pomocí MKP.
22. Anatomie, struktura a princip činnosti lidského ucha, teorie slyšení, metody vyšetřování lidského sluchu.
23. Anatomie, struktura a princip činnosti lidského hrtanu, hlasivek a vokálního traktu, tvorba samohlásek, formanty, umělé náhrady hlasu, metody vyšetřování kmitání hlasivek.