

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

**Rugalmas, szálerősítésű, rétegelt, vékony kompozit
forgáshéjak érzékenységi vizsgálata és alakoptimalizálása**

Ph.D. ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Készítette:
Csonka Béla
okleveles gépészmérnök

GÉPÉSZMÉRNÖKI TUDOMÁNYOK DOKTORI PROGRAM,
GÉPÉSZMÉRNÖKI ALAPTUDOMÁNYOK ALPROGRAM, SZILÁRD TESTEK MECHANIKÁJA
RÉSZPROGRAM

DOKTORI PROGRAM VEZETŐ:
Dr. Páczelt István
AZ MTA RENDES TAGJA, A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA

Témavezető:
Dr. Kozák Imre
MTA levelező tagja

Miskolc, 1999

Bíráló Bizottság

Elnök:

Dr. habil Jármái Károly, DSc, ME, egyetemi tanár

Titkár:

Dr. Szabó Ferenc, CSc, ME, egyetemi docens

Tagok:

Dr. Galántai Aurél, CSc ME, egyetemi docens

Dr. Váradi Károly, CSc BME, egyetemi docens

Dr. Vörös Gábor, CSc BME, egyetemi docens

Hivatalos bírálók:

Dr. Farkas József DSc, ME, professzor emeritusz

Dr. Pomázi Lajos CSc Budapest Műszaki Főiskola, főiskolai tanár

1. A kitűzött kutatási feladat összefoglalása és tudományos előzményei

1. 1. Tudományos előzmények

A szálerősítésű, rétegelt kompozit forgáshéjak ipari felhasználása - kedvező mechanikai tulajdonságaiknak és kis tömegüknek köszönhetően - jelentősen megnövekedett. A hatékony ipari alkalmazások felvetik a szükségességét olyan mechanikai és numerikus modellek kidolgozásának, melyek a szálerősítésű kompozit rétegekből álló forgáshéj mechanikai viselkedését jól közelítik, ezáltal a forgáshéjakkal jelentkező mechanikai problémákra jó megoldásokat adnak

Rétegelt kompozit szerkezetek építőeleme a szálerősítésű réteg, amely mátrix anyagból és ebben elhelyezett szálakból áll. A szálak hosszának megfelelően megkülönböztethetők rövid és hosszú szálú kompozitok. Rövid szálak esetén a szálazás iránya általában véletlenszerű. A továbbiakban csak hosszú szálú kompozitokat vizsgálunk, azzal a feltételezéssel, hogy a szálazás iránya jól meghatározott, és a rétegen belül állandó.

Ha egy kompozit réteg anyagtulajdonságait pontról pontra vizsgáljuk, ezekben ugrásokat, szakadásokat találunk. Annak érdekében, hogy a kontinuummechanika eszközeit és módszereit tudjuk alkalmazni, szükséges a réteg anyagának homogenizálása, ami a feszültség-alakváltozás kapcsolat magasabb, makroszintű vizsgálatát követeli meg, azaz olyan méretű kontinuumelemek figyelembevételét, amelyekhez képest a mikroszerkezeti méretek (szálak vastagsága, távolsága) elhanyagolhatóan kicsik. A fenti okokból következően az itt alkalmazott módszerek eredményei nem adhatnak elfogadható eredményeket a rétegeket alkotó anyagok (szálak, mátrixanyagok) határfelületén kialakuló viszonyokra, de az egész szerkezet viselkedésének meghatározásához elegendő információt szolgáltatnak. A homogenizálás történhet, az ún. keverési szabályok alapján, vagy az egyes anyagok mechanikai jellemzőinek ismeretében, a térfogatok arányában vagy a rétegelt kompozit lemezen végzett kísérletekkel de minden esetben lineáris kapcsolatot feltételezve az anyagegyenletekben szereplő alakváltozás és feszültségi jellemzők között.

A homogenizálás eredményeképpen a rétegekre jellemző lineáris anyagegyenletek tulajdonságai eltérnek a mechanikai vizsgálatok jelentős részében

használt izotrop anyagmodellen alapuló feszültség-alakváltozás kapcsolattól. Az anyagjellemzőket a rétegen belül állandónak tételezzük fel (homogenizálás), értékük azonban a tér különböző irányában változik. Mégis az egyes irányokban meglévő szimmetria tulajdonságok és az anyagtulajdonságok kitüntetett irányainak megfelelően megválasztott koordináta-rendszerek lehetővé teszik az egymástól független anyagtulajdonságok számának csökkentését.

A kompozitokban a mátrixanyag és a szálak anyagának mechanikai tulajdonságai lényegesen eltérnek, ennek következtében a homogenizált anyagjellemzők egyik főiránya megegyezik a szálak irányával. Másik, a vizsgálatok szempontjából lényeges következmény, hogy a rugalmassági és a csúsztató rugalmassági modulus aránya - az izotrop anyagokkal összevetve - nagy. Ez utóbbi következmény azt eredményezi, hogy a nyírás hatása is sokkal jelentősebb.

Több, egymástól eltérő tulajdonságú kompozit rétegből álló héjszerkezet vizsgálatához szükséges a héjelméletek szokásos feltételezésein túlmenően egy kiegészítő feltételezés is, vagyis az, hogy a rétegek egymástól nem válnak el (delamináció) és két réteg pontjai - melyek a terheletlen állapotban érintkeznek - az alakváltozás során is együtt mozognak. Ez utóbbi feltételezés teszi lehetővé, hogy a feladat változóit a középfelületre redukáljuk. A kiegészítő feltétel hiányában az ismeretlenek száma a rétegek számának arányában jelentősen növekedne.

A rétegelt kompozit szerkezet sajátosságait szem előtt tartva olyan kinematikai feltételezéseken alapuló héjmodell megfogalmazására van szükség, amely illeszkedik mind a kompozit anyagok jellemzőihez, mind a rétegelt szerkezetek tulajdonságaihoz.

A héjelméletek, így a forgáshéjakra érvényes elmélet alapfeladata olyan egyenletrendszer előállítás a kontinuummechanika háromdimenziós linearizált összefüggéseiből, geometriai, kinematikai és dinamikai feltételezések figyelembevételével, amelynek változói a héj középfelületén értelmezettek.

Az alkalmazott kinematikai feltételezések alapján a héjmodellek első nagy csoportja Kirchhoff-Love-féle (K-L) feltételezésen alapszik, amely szerint a középfelület normálisai, mint merev egyenesek mozdulnak és fordulnak el, és az alakváltozás után is merőlegesen maradnak a megváltozott középfelületre. Ennek következtében a modell a nyírási energiát nem veszi figyelembe.

A második nagy csoport a Reissner-Mindlin-féle (R-M) feltételezésen alapszik, amely szerint a középfelület normálisai a középfelülethez képest merev

egyenesként elfordulnak. A nyírásból származó alakváltozás és feszültség a normális mentén állandóra adódik, ami ellentétben áll azzal a feltételezéssel, hogy a nyírásból származó alakváltozás és feszültség a lemez vagy héj alsó illetve felső palástján zérus. Ezért a nyírási energia figyelembevételéhez szükséges a nyírási együttható meghatározása.

Lemezekre Reddy, Noor és Burton állított elő magasabb rendű modelleket (HOST), ahol a normális pontjainak érintő irányú elmozdulását harmadfokú polinomokkal közelítették. Az ismeretlenek számának csökkentésére ad lehetőséget az a dinamikai feltétel, hogy a lemez vagy héj alsó illetve felső palástján a nyírásból származó feszültségnek és ennek következtében a megfelelő alakváltozásnak el kell tűnnie. Ebben az esetben a nyírási együttható meghatározására nincs szükség, a nyírásból származó feszültség eloszlása parabolikus.

Az egyes héjmodellek középfelületre redukált mennyiségekkel felírt differenciálegyenlet-rendszerének numerikus megoldására széles körben alkalmazzák a végeelem módszert. Ezért az egyes elméleteket szükséges a numerikus megvalósítások szempontjából is áttekinteni. Az K-L feltételezésen alapuló végeelemes eljárások hátránya, hogy megvalósításuk C^1 folytonos függvények használatát követeli meg, amely lényegesen leszűkíti az alkalmazható approximációs lehetőségek számát. Ez utóbbi feltétel feloldható, ha a K-L alapfeltevés csak az elemek határán érvényes, de az egyensúlyi egyenlet felírásához szükséges variációs elvben csak a hajlításból és membrán állapotból származó energia szerepel.

A R-M feltételezésen alapuló végeelemes eljárások hátránya, hogy ha a héj vastagsága kicsi, az egyenletrendszer kondíciója jelentős mértékben romlik. A probléma a magasabb fokszámú lokális approximáció megvalósításával orvosolható.

A rétegelt kompozit anyagokból előállított szerkezetek tervezése során felvetődő igény az anyagok kedvező tulajdonságait a lehető legnagyobb mértékben kiaknázó konstrukciók létrehozása. Ezt a célt szolgálja olyan eszközök kidolgozása, melyek segítségével valamely szempontból optimális, adott feltételeknek eleget tevő szerkezeti kialakítások határozhatók meg. Ebben az esetben a tervező feladata az elérendő cél (célfüggvény) megfogalmazása, és a konstrukciót befolyásoló, változtatható paraméterek (tervezési paraméterek) megválasztása.

Szerkezetek alakoptimalizálása nemlineáris programozási (NLP) feladathoz vezethető. Az NLP megoldására számos algoritmus terjedt el. A továbbiakban az

elsőrendű módszerekkel foglalkozunk, amelyek nem csak a célfüggvény és a feltételek, de ezek tervezési paraméter szerinti deriváltjának (érzékenységének) ismeretét is megkívánják.

Az optimalizálási eljárások eredményességét és a szükséges számítási kapacitás mennyiségét jelentősen befolyásoló tényező az érzékenységi vizsgálat, azaz az ún. érzékenységi gradiens előállítás. A vizsgálat célja, annak meghatározása, hogy a számított mechanikai jellemzők (alakváltozás, elmozdulás, feszültség) mennyire "érzékenyek" a tervezési paraméter változására. Az egyes mechanikai jellemzők érzékenységéből, mint a jellemzők tervezési paraméter szerinti parciális deriváltjaiból felépíthető vektor az érzékenységi gradiens. Az optimalizálás során ezen érzékenységi gradiens segítségével állítható elő az az irány, amely mentén az iteratív optimalizálási eljárás adott lépésben az eredmény keresendő.

A legegyszerűbben megvalósítható, de nagy számítás igényű megoldás a globális véges differenciák módszere, ahol az érzékenység a feladat kezdeti helyzetében vett megoldásának és a tervezési paraméterek által megváltoztatott helyzetéhez tartozó megoldásainak összevetéséből határozható meg. Hasonló eljárás a szemianalitikus megoldás, amikor a számításoknak csak bizonyos részét végzik el véges differenciák módszerével, a többit analitikusan, az összefüggések tervezési paraméter szerinti differenciálásával. Ez utóbbi eljárás lehetőséget biztosít a csatlakozó szerkezetek módszerének felhasználására, ahol a merevségi mátrix invertálása elkerülhető a csatlakozó szerkezethez tartozó feladat megoldásával.

A szerző a Lisszaboni Műszaki Egyetemen C. A. Mota Soares professzor irányításával magasabb rendű forgáshéjmodellt alkalmazott (a héj vastagsága mentén a pontok meridiángörbe menti érintő irányú elmozdulásának magasabb rendű közelítésével, a Reddy-féle lemezmodell nem teljes körű általánosításával), analitikus differenciáláson alapuló érzékenységi vizsgálatra és tetszőleges, térbeli erőrendszerrel terhelt vékony, rugalmas, rétegelt, kompozit forgáshéjak alakoptimalizálására.

1. 2. Az értekezés kutatási célkitűzései

Az értekezés fő célkitűzése eljárások kidolgozása tetszőleges, térbeli erőrendszerrel terhelt, rétegelt, szálerősítésű kompozit forgáshéjak valamely szempontból (minimális tömeg, maximális merevség) optimális, bizonyos

feltételeknek (adott térfogat, adott maximális feszültség) eleget tevő alakjának meghatározására.

Az e cél érdekében elvégzendő kutatómunka az alábbiakban foglalható össze:

1. Harmadfokú polinomok alkalmazásával - a Reddy-féle, lemezekre megfogalmazott magasabb rendű modell általánosítása forgáshéjakra, ezzel a Reissner-Mindlin-féle elméletben szereplő nyírási együttható kiküszöbölése.
2. A fenti elmozdulásmezőn alapuló vékony, rugalmas, kompozit forgáshéjak statikai vizsgálatára alkalmas, a meridiángörbe mentén a p verziós alakfüggvényeket, a paralell körök mentén Fourier sorfejtést alkalmazó végelelemes eljárás kidolgozása.
3. Algoritmus kidolgozása a végelelemes eljárás összefüggéseinek illetve a számítások eredményeinek a tervezési paraméterek változása iránti érzékenysége meghatározására.
4. A tervezési paraméterek számának csökkentése spline-ok alkalmazásával.
5. Programrendszer kidolgozása a fenti végelelemes és érzékenységi vizsgálat alapján rugalmas, vékony, rétegelt kompozit forgáshéjak alakoptimalizálására.

2. A vizsgálatok módszerei

Az értekezés a kitűzött feladatok megoldására elméleti módszereket alkalmaz. A gondolatmenet kifejtésében felhasználja a kontinuummechanika, a matematikai és kiemelten a numerikus analízis, a variációszámítás és a végeselem-módszer ismert eredményeit.

3. Az értekezés új tudományos eredményei

Az értekezés célkitűzése egy olyan magasabb rendű modell kidolgozása volt a vastagság mentén rétegelt, szálerősítésű, vékony, rugalmas kompozit forgáshéjakra, amely figyelembe veszi a középfelület normálisán lévő pontok normálisra merőleges elmozdulás koordinátáinak nemlineáris eloszlását. A gondolatmenet az alakváltozás linearizált elméletét és a rugalmas testek lineáris anyagegyenletét tételezi fel. Az elmozdulás- és alakváltozásmezőt leíró egyenletek előállítására és a differenciálások elvégzésére szimbolikus manipulátor segítségével történt. Az előállított egyenletek szolgálnak alapjául a kifejlesztett, forgáshéj elemeket alkalmazó végesesemes kódnak, amely a geometria leírására elemenként három csomópontot alkalmaz és képes térbeli erőrendszerrel terhelt forgáshéjak statikai vizsgálatára. A kód tartalmazza az analitikus differenciálással előállított összefüggéseken alapuló, a tervezési paraméterek változásához tartozó érzékenységi vizsgálatok eljárásait is.

A értekezésben kidolgozott új tudományos eredmények a vékony, rugalmas forgáshéjak linearizált szilárdságtani elméletének feltételezésével a következők:

1. A lemezekre megfogalmazott magasabb rendű Reddy-féle modell általánosítása forgáshéjakra (a héj vastagsága mentén a pontok érintő irányú elmozdulásnak harmadfokú polinommal való közelítése). Az elmozdulásmezőben szereplő ismeretlenek számát az a dinamikai feltétel csökkenti, hogy a héj alsó és felső palástján a nyírásból származó csúsztató feszültség és alakváltozás zérus. A harmadfokú polinom alkalmazása kiküszöböli a Reissner-Mindlin-féle elméletben szereplő nyírási együttható alkalmazásának szükségességét ([5], [8]).
2. A fenti elmozdulásmezőn alapuló, tetszőleges térbeli erőrendszerrel terhelt, szálerősítésű, rétegelt, vékony kompozit forgáshéjak statikai vizsgálatára alkalmas végesesemes eljárás kidolgozása. Az eljárás az elmozdulásmező közelítésére a meridiángörbe mentén p verziós alakfüggvényeket, a paralell körök mentén Fourier-sorfejtést alkalmaz ([8]).
3. Algoritmus kidolgozása a végesesemes eljárás összefüggéseinek a tervezési paraméterek változásai iránti érzékenysége meghatározására szimbolikus manipulátort alkalmazásával ([2]).

4. Az egyes mechanikai jellemzőknek a spline-ok vezérpontjai változása iránti érzékenységének előállítására, ha a meridiángörbe és a vastagság eloszlásának leírása spline-okkal történik. Ezzel a tervezési paraméterek számának jelentős csökkentése valósítható meg ([4], [6]).
5. Programrendszer kifejlesztése a fenti végesselemben eljárás és érzékenységi vizsgálat alapján tetszőleges térbeli erőrendszerrel terhelt szálerősítésű, rétegzett, vékony kompozit forgáshéjak alakoptimalizálására ([4], [6]).

4. Az eredmények hasznosításának lehetőségei

Az értekezés eredményei felhasználhatók kompozit forgáshéjak (tartályok, nyomástartó edények) tervezéséhez, optimalizálásához. A szerző által előállított eljárások és az elkészült program segítségével a számítások elvégezhetők.

Az alkalmazott gondolatmenet alkalmazható más kompozit szerkezetek statikai vizsgálatára és alakoptimalizálására.

Az eredmények felhasználhatók az egyetemi graduális és posztgraduális oktatásban is, valamint további kutatómunka bázisát is képezhetik.

5. Az értekezés témaköréből készült publikációk jegyzéke

5.1. Tudományos dolgozatok

- [1] Csonka, B., Forgáséjak alakoptmalizálása, Gép, 1993., 10-11., 16-18.
- [2] Csonka, B., Sensitivity Analysis of a Higher-Order Model for Axisymmetric Shells Using a Symbolic Manipulator, Kutatási jelentés IDMEC, IST, PROJ. STRD/TPR/592/92, Lisbon, 1993.
- [3] Csonka, B., Alakoptimalizáláshoz szükséges érzékenységi vizsgálat a materiális deriváltak felhasználásával, Gép, 1994., 12., 4-7.
- [4] Csonka, B., Kozák, I., Mota Soares, C., M., Mota Soares, C., A., Shape Optimization of Axisymmetric Shells Using a Higher-Order Shear Deformation Theory, Structural Optimization, 1995, 9, 117-127.
- [5] Csonka, B., Egy magasabb rendű modell rétegelt forgáshéjak vizsgálatára, Géptervezők és Termékfejlesztők X. Országos Szemináriuma, 1995, 37-41.

5.2. Előadások

- [6] Csonka, B. Mota Soares, C., M., Mota Soares C., A., Shape Optimization of Axisymmetric Shells Using a Higher-Order Shear Deformation Theory, 6th International Conference on Numerical Methods, Miskolc, August 22-26, 1994.
- [7] Csonka, B. , Sensitivity Analysis Using Material Derivative Approach, MicroCAD'95, International Computer Science Conference, Section K: Modern Numerical Methods, Miskolc, February 23, 1995.
- [8] Csonka B., Rétegelt, szálerősítésű kompozit forgáshéjak vizsgálata, VII. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc, 1995. augusztus 29-31.