

Miskolci Egyetem



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

SODRATSZERKEZET VIZSGÁLATA p -VERZIÓS VÉGESELEM
MÓDSZERREL

Ph.D. értekezés tézisei

KÉSZÍTETTE:

Beleznai Róbert

okleveles gépészmérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK TÉMATERÜLET
SZILÁRD TESTEK MECHANIKÁJA TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ:

Dr. Tisza Miklós

a Műszaki Tudomány Doktora

TÉMACSOPORT VEZETŐ:

Dr. Kozák Imre

az MTA rendes tagja

TÉMAVEZETŐ:

Dr. Páczelt István

az MTA rendes tagja

TÁRS-TÉMAVEZETŐ:

Dr. Tóth László

a Műszaki Tudomány Doktora

Miskolc, 2012.

Beleznai Róbert

**SODRATSZERKEZET VIZSGÁLATA p -VERZIÓS VÉGESELEM
MÓDSZERREL**

Ph.D. értekezés tézisei

Miskolc, 2012.

Bíráló bizottság

Elnök:

Prof. Dr. Bertóti Edgár, DSc, ME, egyetemi tanár

Titkár:

Dr. Szabó J. Ferenc, CSc, ME, egyetemi docens

Tagok:

Prof. Dr. Vörös Gábor, DSc, BMGE, egyetemi tanár

Dr. Uj József, CSc, BMGE, egyetemi docens

Dr. Kovács Béla, CSc, ME, egyetemi docens

Hivatalos bírálók:

Prof. Dr. Kurutzné Kovács Márta, akadémikus, BMGE, Professzor emeritus

Dr. Szabó Tamás, PhD, ME, egyetemi docens

1. BEVEZETÉS

A műszaki gyakorlatban számos helyen használnak fel különböző tulajdonságot mutató, terhet viselő sodratszerkezeteket. A sodratok elemi szálakból, huzalokból sodort gépelemek, melyek anyaga lehet kender, műanyag, illetve fém, ami leggyakrabban acél vagy alumínium. A sodratokat tovább sodorva drótkötelet, ezt tovább sodorva kábelt kapunk. A drótkötelek magja lehet rost vagy műanyag, nagy teherbírású kötél esetén fémsodrat. A nagyfeszültségű távvezetékek esetén például acél magsodratra sodornak több rétegben alumínium huzalokat. A sodratok jellemzője a nagy tengelyirányú szilárdság mellett a kiváló hajlékonyság, az alacsony csavaró és hajlító merevség. Ilyen sodratok kerülnek alkalmazásra a felvonóknál, a szállítóberendezéseknél, a teheremelő daruknál, a villamos távvezetékeknek, közlekedési eszközökben (autók, motorok, stb.), illetve erősítő elemként beépítésre kerülnek nagynyomású olajipari tömlőkbe.

Az acélsodratok gyártására vonatkozó szabványok előírásai mind hazai, mind nemzetközi viszonylatban olyan tevékenység intervallumokat adnak meg a gyártás során részben a felhasználásra kerülő huzalok méreteire vonatkozóan, részben a menetemelkedés tekintetében, melyek ugyanazon típusú és névleges méretű acélsodratnál valójában igen eltérő, végső paraméterekkel rendelkező acélsodrat termékeket eredményeznek. Így előfordulhat, hogy ugyanazon gyártási megrendelésre a gyártó a vevő felé eltérő műszaki paraméterekkel rendelkező sodratokat szállít. Ez a felhasználások bizonyos részében nem okoz gondot - pl. az általános rendeltetésű acélsodratoknál - míg más részénél - mint pl. gumiipari acélsodratok - súlyos problémák adódhatnak az alkalmazásnál.

A fentiek alapján szükséges tehát, hogy bizonyos acélsodrat termék csoportoknál olyan sodratgeometriával rendelkező termékek kerüljenek kifejlesztésre és legyártásra, melyek a felhasználói igényekhez jobban igazodnak, azaz olyan sodrási paraméterekkel rendelkeznek (huzalátmérő, menetemelkedési szög), melyek az adott célra a legjobb végső műszaki paramétereket eredményezik az acélsodratnál.

A sodratok szerkezete igen sokfajta lehet. Egy-egy alkalmazáshoz a legmegfelelőbb sodrat kiválasztása vagy megtervezése a sodratparaméterek mechanikai viselkedésre való hatásának ismeretét követeli meg.

Sodratok analitikus modellezésével, különböző elméletekre támaszkodva (Love görbült rudak elmélete [1]-[2], ortotróp lemezelmélet [3]-[4], stb.) már többen is foglalkoztak. Az egészen egyszerű szerkezettől a bonyolult kötél szerkezetig szinte minden sodratra dolgoztak ki különböző modelleket. Ezek a globális viszonyokat, teherbírást és igénybevételeket többé-kevésbé jól leírják, azonban a nemlineáris hatások (kontakt deformáció, súrlódás, kopás, stb.) figyelembevétele rendkívül bonyolult összefüggéseket eredményez, és minden hatást nem is lehet leírni zárt formulákkal.

Ha rövid időn belül van szükség előzetes eredményekre, akkor az analitikus modellek jól alkalmazhatóak még bonyolult sodratszerkezetek esetén is, amelyek több rétegben nagyszámú huzalt tartalmaznak, mivel a nemlineáris hatásokat nem veszik figyelembe. Amennyiben pontosabb eredményekre van szükségünk, akkor végeselemes számítást kell végezni.

A végeselemes számítások lehetőséget nyújtanak a szerkezetek pontos geometriai leírására, a mechanikai és egyéb igénybevételek vizsgálatára és a nemlineáris hatások figyelembevételére. A kereskedelemben kapható h -verziós végeselemes szoftverek már több kutató által is alkalmazásra kerültek sodratszerkezetek analízisében [5]-[14], amikor is különféle szerkezetű sodrat típusok mechanikai elemzését végezték el. A modellfelépítést nehezíti, hogy egy egyszerű szerkezet esetében is nagy elemszáma van szükség, ami nagy számítógépi erőforrást és hosszú számítási időt igényel. A minél pontosabb modell azért szükséges, mert a sodratok mechanikai viselkedésének ismerete már a tervezés fázisában döntő szerepet kap. A szilárdsági paraméterek meghatározása mellett, a kopási tulajdonságok, illetve élettartam jellemzők ismerete is fontos tényezőként jelenik meg a fejlesztés alatt lévő sodrat tervezésében. Az irodalomban található analitikus és végeselemes modellekről átfogó és részletes képet az értekezés 1.2 fejezete ad.

Jelen értekezésben a p -verziós végeselem módszerre alapozott modell és szoftver fejlesztéséről számolunk be egyszerű, egyenes, kétrétegű sodratszerkezet esetében, amelyben a huzalok közötti relatív elmozdulás, Poisson-féle hatás, érintkezés és súrlódás figyelembe van véve, továbbá a szerkezetet terhelő igénybevételek (húzás, hajlítás, csavarás) tetszőlegesek, a számítások során pedig lineárisan rugalmas anyagtörvényt alkalmazunk. Az új szoftver segítségével viszonylag rövid idő alatt, nagyobb számítógépi kapacitás nélkül végezhetőek el a számítások. Az értekezés tartalmazza a sodratparaméterek érzékenységi vizsgálatához elvégzett nagyszámú számításnak az eredményét. Ez alapján tervezési görbék kidolgozására került sor, melyek a sodrat kiválasztást, illetve a tervezést segíthetik. A károsodási módszerek közül a huzalok kopását vizsgáljuk. Végeselemes modell és az Archard kopási egyenlet segítségével meghatározható a kopási mélység nagysága a relatív elmozdulás, a kontakterő és a ciklusszám függvényében.

1.1 Célkitűzések

Jelen értekezés célja a sodratszerkezetek elemzésére alkalmas módszer kifejlesztése, amely figyelembe veszi a súrlódásos érintkezést, a Poisson-hatást, a huzalok közötti relatív elmozdulást, stb.), amelyek alapján tervezési görbék állíthatók elő, továbbá meghatározható a terhelés alatti sodratban a huzalok relatív elmozdulás hatására bekövetkező kopás okozta károsodás mértéke. Ennek lépései a következők:

- p -verziós végeselemes módszer kidolgozása az egy- és kétrétegű sodratok vizsgálatára, ahol a sodratra jellemző paraméterek tetszőlegesen definiálhatóak. Ilyen paraméterek a következők: huzalok darabszáma az egyes rétegekben, huzalok menetemelkedése és iránya, a huzalok sugarai, a vizsgált sodrat hossza, a végeselemes háló elemszáma és polinom fokszáma, az anyagjellemzők (rugalmassági-modulus, Poisson-tényező, súrlódási tényező), a befogás típusa (rögzített végű vagy szabadon elforduló végű sodrat) és az igénybevétel típusa (húzás, csavarás, hajlítás).
- Új típusú végeselemek kidolgozása, melyek alkalmasak a geometria pontos leírására és a huzalok közötti különböző típusú súrlódásos érintkezés figyelembevételére (pont- és vonalmenti érintkezés, tapadás-csúszás, relatív elmozdulás).

- Paramétervizsgálatok segítségével tervezési görbék definiálása, melyek megmutatják, hogy az egyes geometriai méretek vagy anyagi jellemzők változtatása hogyan befolyásolja a szerkezet teherviselő képességét, illetve hogyan hatnak a sodrat folyóméter súlyára.
- Kopásszámítás elvégzése keresztező szálak esetében, mely segítségével meghatározható, hogy adott ciklusszámhoz, relatív elmozduláshoz és igénybevételhez (kontakterőhöz), mekkora kopásmélység tartozik. Ez a mennyiség a sodrat élettartamával kapcsolatban is fontos információval szolgál.

A kidolgozandó modell és szoftver segítségével a mérnökök egy olyan eszközt kapnak kézhez, amelyet viszonylag gyorsan és egyszerűen, egy normál számítógépen is használhatnak, akár a sodratok tervezési-fejlesztési fázisában, akár egy már üzemelő sodrat esetén, ahol a kérdés az üzemelésre való alkalmasság.

2. MEGVALÓSÍTÁS

A sodratok viselkedése pontosan leírható egyszerű terhelés és geometriai peremfeltételek esetén, ha az elmozdulásokat és az alakváltozásokat kicsinek feltételezzük. Két befogási mód definiálására van lehetőség. A sodrat egyik vége mindig rögzített (befalazott) egy merev laphoz, a másik vége úgyszintén. Ezen utóbbi merev lap merevtestszerű mozgásában tetszőlegesen korlátozható. Ha a függőleges tengely körüli szögelfordulása korlátozott, akkor rögzített végű sodratról beszélünk, ha szabadon elfordulhat, akkor az irodalomból ismert szabadvégű sodratot kapjuk meg. Maga a sodrat nincs érintkezésben másik testtel, például kötéllel (ez esetben nagy elmozdulást kellene feltételezni). A valóságos 3D-s feladatot egyváltozós feladatra vezetjük vissza görberudak felvételével. Az R_0 sugarú hengerfelületre rátekert H menetemelkedésű spirál huzal, mint görbe rúd középvonalának helyvektora a következőképpen írható le [1]:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\bar{\varphi}) = R_0 (\cos(\bar{\varphi}) \cdot \mathbf{e}_x + \sin(\bar{\varphi}) \cdot \mathbf{e}_y) + \frac{H}{2\pi} \bar{\varphi} \cdot \mathbf{e}_z \quad (1)$$

ahol a $\bar{\varphi}$ - a hengerkoordináta-rendszer szöge. A Serret-Frenet-féle összefüggésekkel a spirálhuzal helyi koordinátarendszerének normális, binormális és érintő irányú ($\mathbf{n}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{t}$) egységvektorai előállíthatóak. Az alakváltozás leírásához Love görbült rudak elméletét használjuk [1]. Ennek értelmében három, a helyi koordinátarendszerben $\mathbf{n}, \mathbf{b}, \mathbf{t}$ irányú független elmozdulás mezővel (u_1, u_2, u_3) és a $\mathbf{t}$ érintő irány körüli elfordulás mezővel (χ_3) jellemezzük a rúd középvonalának elmozdulását és keresztmetszetének elfordulását (elcsavarodását). A $\mathbf{n}, \mathbf{b}, \mathbf{t}$ kísérő triéder szögelfordulását a $\chi_i, i = 1, 2, 3$ -mal jellemezzük. A nyírási energiát elhanyagoljuk. A rúd végeelemet úgy építjük fel, hogy az két csomóponttal rendelkezzen, a magasabbfokú approximációt az elemen belüli belső paraméterek révén biztosítjuk. Így a szabadságfokok maximális száma 32. Négy mezőt kell közelítenünk oly módon, hogy $u_3, \chi_3 \in C^0$ osztályú folytonossággal, míg az $u_1, u_2 \in C^1$ osztályú folytonossággal rendelkezzen az elemek között. A

közelítést oly módon kell felépíteni, hogy a merevtestszerű mozgásból, aminek most hat a szabadságfoka, ne keletkezzen alakváltozás.

A fentieket figyelembevéve, a helyi koordinátarendszerben (L) a kérdéses $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\varphi)$ pontban a középvonal elmozdulása $\mathbf{u}^L$ és keresztmetszetének elfordulása χ^L a következő kifejezéssel írható le:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \chi \end{bmatrix}^L = \mathbf{V}^{LG}(\varphi) \mathbf{q}_i^G + \mathbf{\Phi}(\varphi) \mathbf{a} + \hat{\mathbf{\Phi}}(\varphi) \hat{\mathbf{a}}, \quad \mathbf{\Phi}(0) = \mathbf{0}, \hat{\mathbf{\Phi}}(0) = \hat{\mathbf{\Phi}}(1) = \mathbf{0} \quad (2)$$

ahol az első tag az i -keresztmetszet mozgásának hatását, míg a második és harmadik tag az i -hez képesti alakváltozásból származó elmozdulást és szögelfordulást hordozza. Itt $\mathbf{V}^{LG}$ transzformációs mátrix, $\mathbf{\Phi}(\varphi)$, $\hat{\mathbf{\Phi}}(\varphi)$ approximációs mátrixok, $\mathbf{q}_i^G$ az i -dik keresztmetszet csomóponti általánosított elmozdulásvektora (6 elemű) a globális (G) xyz koordinátarendszerben, $\mathbf{a}$ az elmozdulási paraméterek vektora (6 elemű), $\hat{\mathbf{a}}$ a pótlólagos állandók vektora. A $\mathbf{\Phi}(\varphi) \mathbf{a}$ és a $\hat{\mathbf{\Phi}}(\varphi) \hat{\mathbf{a}}$ tagok az i -dik csomópontához viszonyítva a rugalmas deformációból származó elmozdulást írják le. A pótlólagos állandók az egyes approximált mezők vonatkozásában $0 \leq p \leq 5 = p_{\max}$ között változhatnak. Azonos számú pótlólagos állandó esetén ezek maximális száma összesen $4 \cdot p_{\max} = 20$ lehet. Az értekezésben bemutatott, itt nem részletezett átalakítások után a közelítendő elmozdulás vektor a helyi koordinátarendszerben

$$\tilde{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \chi_3 \end{bmatrix}^L = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{N}}_u \\ \bar{\mathbf{N}}_{\chi_3} \end{bmatrix} \mathbf{q} + \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{\Phi}}_u \\ \hat{\mathbf{\Phi}}_{\chi_3} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{a}} = \tilde{\mathbf{N}} \mathbf{q} + \tilde{\mathbf{\Phi}} \hat{\mathbf{a}} \quad (3)$$

alakban írható fel, ahol $\mathbf{q}$ az elem csomóponti általánosított elmozdulásvektora (12 elemű) a globális koordinátarendszerben, $\tilde{\mathbf{N}}$, $\tilde{\mathbf{\Phi}}$ approximációs mátrixok.

A testek közötti érintkezési kölcsönhatást, az érintkezési tartományok kicsiny volta miatt normális irányban Hertz elméletével modellezzük. Ezzel a szerkezeti modellben nyírási energiát elhanyagoló görberudak és az érintkezési helyi hatásokat modellező rugók, ill. a súrlódási hatás figyelembevételénél, a büntetőparaméteres technika miatt, további lineáris rugók szerepelnek. Ezek alapján új típusú végelemek kifejlesztésére került sor, többek között speciális nemlineáris rugóelem és rugalmas ágyazás. Az érintkezési feltételeket a huzalok palástopontjai között írjuk fel egyrészt a Poisson-hatás, másrészt a huzal középvonalának eltolódásából és szögelfordulásából keletkező járulékos elmozdulás figyelembevételével. Az érintkezési kölcsönhatás normálirányú nemlinearitását linearizálás után speciális iterációval tartjuk kézben, miközben az érintkezési feltételeket ún. kombinált technika felhasználásával biztosítjuk.

A modell előnyei, a geometria pontosan leírt, a magas foksám miatt a rúd teljes hossza menti elmozdulás is jól approximált, így a h -verziós végeselemes modellekhez képest a kisebb gépigény, és a rövid számítási idő jellemzi a futtatásokat. A kidolgozott modellhez számítógépes program került kifejlesztésre FORTRAN nyelven, melyhez egy geometriai megjelenítő modul is készült.

Ennek segítségével szemléletesen megjeleníthetők a huzalok közötti érintkezést reprezentáló diszkrét, illetve folytonos rugóelemek. A kifejlesztett p -verziós végeelem szoftverben a felhasználó adja meg a sodrat geometriai és anyagparamétereit, a befogás és terhelés típusát és nagyságát. Egy- és kétrétegű sodrat számítására van lehetőség, ahol a két külső rétegben elhelyezkedő huzalok száma, menetemelkedésük nagysága és iránya tetszőleges lehet. Az elemek generálása néhány adat megadásával automatikusan történik.

Az igénybevételek és relatív elmozdulások ismeretében lehetőség nyílik a huzalok közötti relatív elmozdulás hatására bekövetkező kopás számítására. Az Archard-féle kopási törvény alkalmazásával 3D-s kopási modell került kidolgozásra, melynek segítségével adott kontaktterhelés, relatív elmozdulás és ciklusszám esetén meghatározható az egyes huzalokon kialakuló kopási karc mélysége. Ennek segítségével lehet következtetni arra, hogy a huzal hány ciklusszám után fog eltörni, illetve meg lehet határozni az adott sodratszerkezet élettartamát.

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

Az értekezés új tudományos eredményeit az alábbi tézisek foglalják össze:

1. Lineárisan rugalmas anyag esetén p -verziós végeelem rúdmodell került kidolgozásra hengerfelületre rátekert H menetemelkedésű spirállal jellemzett görbült rúdra vonatkozólag a nyírási energia elhanyagolásával. A geometria, a merevtestszerű mozgás hatása pontosan leírt. A modellezés során négy mező kerül közelítésre. Pótlólagos állandók felvételével a görbe rúd mentén ható erő és nyomatéki megoszló terhelések is nagy pontossággal számolhatók $\{1\}, \{2\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \{11\}, \{12\}$.
2. Sodratszerkezetekre vonatkozólag ezen rúdelemek felhasználásával végeelemes modell lett kialakítva, mely figyelembe veszi a súrlódásos érintkezést, a Poisson-hatást, és a szálak közötti relatív elmozdulásból származó kopást. Az egyoldalú érintkezési kölcsönhatás normális irányban Hertz elméletén alapuló, a merevségi viszonyokat helyettesítő nemlineáris rugón (ágyazaton) keresztül van figyelembevéve, speciális iterációt alkalmazó linearizációval. A száraz súrlódás leírására a Colulomb törvény került felhasználásra. Az érintkezési feltételek a szálak palástján lévő pontok között vannak értelmezve $\{1\}, \{2\}, \{4\}, \{5\}, \{8\}, \{9\}$.
3. Egy eljárás került kidolgozásra, amelynek segítségével a rétegek sodrásirányától és menetemelkedési szögétől függően kerülnek meghatározásra a végeelemek oly módon, hogy a keresztező huzalok érintkezése a csomópontokban történjen. A modell a keresztező szálak különböző irányszögének figyelembevételére alkalmas. A sodrásirányoknak megfelelően jobb és balsodrású sodratrétegek definiálása lehetséges. Mindkét irányban tetszőleges menetemelkedési szög állítható be $\{1\}, \{2\}, \{4\}, \{5\}, \{8\}$.
4. Tervezési görbék kerültek kidolgozásra, a sodrat viselkedését befolyásoló sodrási paraméterek hatásának elemzésére. Az elemzett sodrási paraméterek (a menetemelkedési szög, a külső rétegekben lévő huzalok sugáraránya) függvényében meghatározásra kerültek

az egyes huzalokban ébredő redukált feszültségek, a kontakterők, valamint a sodrat egységnyi hosszra vonatkozó tömege rögzített és szabadvégű sodratok esetén $\{1\}, \{5\}, \{8\}$.

5. A sodratszerkezeti modell segítségével elvégzett számítási eredményeket (relatív elmozdulás és kontakterő) input adatként felhasználó 3D-s végeelemes kopási modell került kidolgozásra. A modell révén az Archard-féle kopási törvény alapján és érintkezési viszonyok tisztázásával meghatározható a lekopott anyagmennyiség nagysága a huzalok között, továbbá előrejelezhető a ténylegesen lezajló ciklusok számához tartozó kopásmélység $\{3\}, \{7\}, \{9\}, \{10\}$.

4. A KUTATÁSI EREDMÉNYEK ALKALMAZÁSA

A kifejlesztett módszer potenciális alkalmazási területe a sodratfejlesztés. A tervező mérnökök és gyártó cégek számára egyaránt hasznos eszközzel van szó, melyet akár a tervezés fázisában is felhasználhatnak, vagy paraméter érzékenységi elemzéseket végezhetnek. Vizsgálható a különböző befogás típusok hatása a szerkezet mechanikai viselkedésére. Elemezhető a sodrás irányok és menetemelkedési szögek, valamint minden egyes geometriai és anyagi paraméter befolyása a szerkezet viselkedésével kapcsolatban.

A módszer az üzemelő sodratok esetén is alkalmazható. Adott igénybevétel esetén meghatározható a sodratok feszültség állapota, a huzalok között bekövetkező relatív elmozdulás, valamint a súrlódás hatására ébredő nyírófeszültség, melyekből meghatározható a kopás által okozott károsodás, amiből pedig következtetni lehet a szerkezet maradó élettartamára.

Jelen módszer egy-, és kétrétegű sodratok esetén alkalmazható, bonyolultabb szerkezetek, mint például kötelek elemzése jelenleg nem elérhető. A modell kis elmozdulás és kis alakváltozás feltétele mellett érvényes, éppen ezért csak kis elhajlás szögű hajlítás vizsgálható, dobra hajlítás elemzéséhez nagy elmozdulás figyelembevételére van szükség.

5. TOVÁBBFEJLESZTÉSI IRÁNYOK, LEHETŐSÉGEK

Több továbbfejlesztési lehetőséget definiálhatunk, amelyek a gyakorlati alkalmazás szempontjából is lényegesek.

Az első, egy bonyolultabb szerkezetű sodratok, kötelek vizsgálatára alkalmas modell kifejlesztése. Ez esetben az értekezésben kidolgozott modellt és az alszerkezet technikát felhasználva lehet előrejutni. A sodratmodell kötélmodellbe építése során így lehetőség nyílik a dupla menetemelkedés figyelembevételére, mely a geometriai nemlinearitás figyelembevételét jelenti. Az analitikus modellek között találunk ennek megfelelőt, azonban jelentős elhanyagolásokkal. Ez esetben a kontakt már túlságosan bonyolult összefüggéseket eredményezne, azonban a kidolgozott p -verziós modell segítségével mindez kézben tartható.

A másik továbbfejlesztési lehetőség a kopás számítás összekapcsolása törésmechanikai elemzéssel, így lehetőség adódik arra, hogy a károsodást huzal szinten pontosabban meghatározhassuk, és így pontosabb becslést adhassunk az élettartamra és a biztonságos üzemelésre vonatkozólag.

Az értekezés olyan sodrat konstrukciókkal foglalkozik, ahol az azonos rétegben lévő huzalok között nincs érintkezés. Ez a gyakorlatban bevett fogás a súrlódás és a kopás csökkentésére szolgál. Azonban fellelhető olyan eset is, amikor az egy rétegen belüli huzalok érintkeznek egymással. Ennek vizsgálatára alkalmas modell kidolgozása szintén egy további feladat lehet.

Egy további irány lehet, meglévő sodratszerkezetek elemzése, valamint olyan sodratkonstrukció kidolgozása, ahol a sodrat egyes rétegeinek egyenszilárdságára törekszünk. Ez esetben a geometriai és anyagi paraméterek egyidejű optimalása mellett elérhető, hogy az adott rétegen belül a huzalok azonos feszültség állapotba kerüljenek a terhelés hatására.

6. Publikációk az értekezés témájában

Idegen nyelvű folyóiratban megjelent szakcikkek

- {1} Robert Beleznaï, István Páczelt, Design curve determination for two-layered wire rope strand using p -version finite element code, Engineering with Computers, Springer-Verlag London Limited, 2012., DOI 10.1007/s00366-012-0269-7 (Impact factor in 2011: 0.739)
- {2} Páczelt I, Beleznaï R. Nonlinear contact-theory for analysis of wire rope strand using high-order approximation in the FEM, Computers and Structures Vol. 89., Issues 11-12. (2011), 1004-1025 (Impact factor in 2011: 1.719)
- {3} István Páczelt, Róbert Beleznaï, Contact wear effect to the mechanical degradation, Journal of Materials Science and Technology, Volume 16, No. 2, pp. 91-98., Institute of Metal Science, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria, 2008.

Magyar nyelvű folyóiratban megjelent szakcikk

- {4} Beleznaï Róbert, Kétrétegű sodratszerkezet vizsgálata p -verziós végelem módszerrel, GÉP, LX. évfolyam, 6. szám, 3-14. oldal, Miskolc, 2009.

Tudományos közlemények idegen nyelvű konferencia kiadványban

- {5} Robert Beleznaï, István Páczelt, Development of contact-theory for analysis of wire rope strand using p -version finite element method, Proceedings of TMCE 2010 Symposium, ISBN 978-90-5155-060-3, pp. 1051-1064, Ancona, Italy, 2010.

- {6} Róbert Belezna, Dr. István Páczelt, Analysis of simple straight wire rope strand using p -version finite element method, microCAD 2008 International Scientific Conference, Miskolc, Hungary, 20-21 March, 2008., pp. 1-6.

Tudományos közlemény magyar nyelvű konferencia kiadványban

- {7} Dr. Páczelt István, Belezna Róbert: Drótkötelek belső kopásának szimulálása, XX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 339-342. oldal Kolozsvár, 2012.

Szakmai tudományos előadások idegen nyelven

- {8} Robert Belezna, István Páczelt, Development of contact-theory for analysis of wire rope strand using p -version finite element method, TMCE 2010 Symposium, Ancona, Italy, 2010.
- {9} István Páczelt, Róbert Belezna, Analysis of simple straight wire rope strand using p -version finite element method, 8th World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) and 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), Venice, Italy, 2008
- {10} István Páczelt, Róbert Belezna, Contact wear effect to the mechanical degradation, Joint Hungarian-Ukrainian-Bulgarian Conference on Safety-Reliability and Risk of Engineering Plants and Components and XIV. International Colloquium „Mechanical Fatigue of Metals”, Varna, Bulgaria, 2008
- {11} Róbert Belezna, Dr. István Páczelt, Analysis of simple straight wire rope strand using p -version finite element method, microCAD 2008 International Scientific Conference, Miskolc, Hungary, 20-21 March, 2008.

Szakmai tudományos előadások magyar nyelven

- {12} Belezna Róbert, Dr. Páczelt István, p -verziós végeelem módszer kidolgozása sodratszerkezetre, XIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, 2008.

HIVATKOZÁSOK

- [1] G. A. Costello, Theory of wire rope, 2nd edition, Springer, New York, 1997
- [2] Anne Nawrocki, Michel Labrosse, A finite element model for simple straight wire rope strands, Computers and Structures 77 (2000), 345-359
- [3] M. Raoof, I. Kraincanic, Simple derivation of the stiffness matrix for axial/torsional coupling of spiral strands, Computers&Structures Vol. 55. No. 4 (1995), 589-600
- [4] Mohammed Raoof, Timothy J. Davies, Simple determination of the maximum axial and torsional energy dissipation in large diameter spiral strands, Computers&Structures Vol. 84. (2006), 676-689
- [5] W. G. Jiang, M. S. Yao, J. M. Walton, A concise finite element model for simple straight wire rope strand, International Journal of Mechanical Sciences 41 (1999), 143-161
- [6] Wen-Guang Jiang, K. Michael, J. Warby, J. L. Henshall, Statically indeterminate contacts in axially loaded wire strand, European Journal of Mechanics A/Solids 27 (2008), 69-78
- [7] W. G. Jiang, J. L. Henshall, J. M. Walton, A concise finite element model for three-layered straight wire rope strand, International Journal of Mechanical Sciences 42 (2000), 63-86
- [8] W.S. Utting, N. Jones, Survey of the literature on the behaviour of steel wire rope, Wire Industry 51 (1984), 623-629
- [9] W. S. Utting and N. Jones, The response of wire rope strands to axial tensile loads – Part I. Experimental results and theoretical predictions, Int. J. Mech. Sci. Vol. 29., No. 9. (1987), 605-619
- [10] W. S. Utting and N. Jones, The response of wire rope strands to axial tensile loads – Part II. Comparison of experimental results and theoretical predictions, Int. J. Mech. Sci. Vol. 29., No. 9. (1987), 621-636
- [11] Róbert Beleznai, Szabolcs Szávai, Dr. László Sárközi, Péter Rózsahegyi, Analytical and FEM analysis of the seven-wire strand under axial load, An International Journal for Engineering and Information Sciences, DOI:10.1556/Pollack.2.2007.2.8, Vol 2., No.2., pp. 93-101 Pécs, Hungary, 2007.
- [12] Seyed Reza Ghoreishi, Patrice Cartraud, Peter Davies, Tanguy Messenger, Analytical modeling of synthetic fiber ropes subjected to axial loads. Part I: A new continuum model for multilayered fibrous structures, International Journal of Solids and Structures 44 (2007), 2924–2942
- [13] Seyed Reza Ghoreishi, Peter Davies, Patrice Cartraud, Tanguy Messenger, Analytical modeling of synthetic fiber ropes. Part II: A linear elastic model for 1 + 6 fibrous structures, International Journal of Solids and Structures 44 (2007), 2943–2960
- [14] Seyed Reza Ghoreishi, Tanguy Messenger, Patrice Cartraud, Peter Davies, Validity and limitations of linear analytical models for steel wire strands under axial loading, using a 3D FE model, International Journal of Mechanical Sciences 49 (2007), 1251–1261

Róbert Beleznai

**ANALYSIS OF WIRE ROPE STRAND USING p -VERSION OF FINITE
ELEMENT METHOD**

Summary of Ph.D. thesis

Miskolc, 2012.

1. INTRODUCTION

In practice, wire rope strands with different technical properties are widely used. The strands consist of elementary fibers, twisted parts of the wires, which are usually made of hemp, plastic or metal, in most cases, of steel or aluminum. Strands are wrapped around each other to form a wire rope, whereas wire ropes are twisted around each other to form a cable. Wire rope cores can be made of fiber or plastic, but for heavy duty rope metallic strand is used. For high-voltage power lines, for instance, aluminum wires are stranded around a steel core in several layers. The strands are characterized by high axial strength and excellent flexibility along with low torsional and bending stiffness. Wire ropes are used in elevators, transport (cableway) equipments, cranes and electrical power lines, and strands act as stiffener elements integrated with high-pressure oil hoses and can be found in different types of transport (cars, motorbikes, etc).

Covering the requirements of the standards for steel wire rope strand manufacturing in the active period of the production at both domestic and international level (for example, requirements for the diameter of the applied wires or for the pitch length) results in obtaining different final characteristics by using the same type (and same diameter) wire rope strands. Thus, it can happen that the supplier provides strands with different characteristics for the same customer specification. This does not cause any problem for general purpose wire ropes, however, some severe problems associated with their use in other fields can occur, for instance, strands for the rubber industry (oil hoses).

Based on the above mentioned, it is necessary to develop and produce such wire rope strands for some special product groups, whose characteristics meet the customer requirements, i.e. they have such strand parameters (wire diameter, helix angle), which provide the best final characteristics of the strand for the given purpose.

The strands can adopt a wide variety of structures. Selection or design of the most appropriate strand for single application requires the knowledge of the effect of strand parameters on the mechanical behavior of the strand.

Many researchers dealt with analytical modeling of strands based on different theories (the Love curved beam theory [1]-[2], orthotropic plate theory [3]-[4]). Different models have been developed: from the simplest strands to the complex wire rope structures. Global conditions, forces and moments as well as stresses and strains are well described by these models, however, accounting for the non-linear effects (contact deformation, friction, wear, etc) is extremely difficult, and not all effects can be described by closed formulas.

To have preliminary results in a short period of time, analytical models can be successfully applied even for complex wire rope strands, which contain several layers of a large number of wires, since the non-linear effects are not considered. If more accurate results are required, finite element calculation should be performed.

The results of the finite element calculations make it possible to provide an accurate geometric description of structures, to analyze the mechanical and other loads considering the non-linear effects. Many researchers used the h -version of the commercially available finite element softwares [5] - [14] to analyze various types of strand structures. Creating a model is difficult even for simple strand structures, because it needs a large number of elements for obtaining accurate results,

however, it requires a long calculation time and large computer resources. A more accurate model is necessary, since the knowledge of the mechanical behavior of the strands in the design phase is of critical importance. In addition to determining the strength parameters, wear characteristics and properties of service life are also important factors in the development of strands. A comprehensive and detailed summary of the analytical and finite element models found in the literature is given in Chapter 1.2.

In this dissertation, development of the model and code based on p -version finite element method is presented, which are used for analyzing simple, straight, two-layered wire rope strands. The code and model account for the relative displacement between wires, Poisson effect, contact and friction. The load, which is subjected to the strand, can be arbitrary tension, torsion and bending. A linear elastic material law is used for calculations. The calculations can be conducted in a relatively short period of time using the newly developed software without more powerful computer. The thesis presents the results of a large number of calculations performed for the sensitivity analysis of the strand parameters. Based on this, design curves have been developed to simplify the strand selection and design process. From different damage mechanisms, wear between the wires is studied. Using the Archard wear equation and finite element model, the wear scar depth can be determined according to the relative displacement and contact force between the wires with a different number of cycles.

1.1 OBJECTIVES

The objective of the dissertation is to develop a method for analysing wire rope strands, which considers the frictional contact, Poisson effect and relative displacement between the wires, etc. Based on the results, design curves can be generated, furthermore, wear damage can be analyzed owing to relative displacement of the wires. The steps are the following:

- Development of a model based on p -version finite element method to analyze one- and two-layered wire rope strands, where the strand parameters can be defined arbitrary. Such parameters are the following: number of wires in each layer, pitch lengths and helix angles of the wires, radius of the wires, length of the strand, number of the element and number of the additional parameters for the finite element mesh, material properties (Young-modulus, Poisson-ratio, friction coefficient), type of the clamping (fixed end and free end) and load type and amplitude (tension, torsion and bending).
- Development of new type finite elements that are applicable for accurate geometry description and account for the different type of frictional contact between the wires (point- and line contact, stick-slip, relative displacement).
- Design curve determination using the results of sensitivity analyses, which show the influence of the geometric properties on load capacity and weight per unit length of the strand.

- Wear analysis of crossing wires to determine the wear scar depth for a given number of cycles, relative displacement and load (contact force). This value can provide useful information regarding the lifetime of the strand.

The developed model together with its code is a powerful and useful tool for engineers, which can be used for designing new strands in a relatively quick and simple way on a usual desktop computer or estimating the suitability for further operation.

2. REALIZATION

Under simple loading and geometric boundary conditions the wire rope strands can be properly described, if small displacement and deformation are assumed. In the presented wire rope strands two boundaries can be found, one end is clamped to a rigid plate, the other end is also clamped to another rigid plate, which can move arbitrary (if the vertical rotation is fixed, it is called fixed end, if not fixed, then this situation is named free end). The proposed structure is not in contact with another body (sheave), which means that there is no large sliding problem. The real 3D task is reduced to a one-dimensional problem so that the wires are replaced by curved beams and interaction between the contact bodies is modeled using the Hertz-theory in the normal direction due to the small contact area. The position vector of centreline of the helical wire with pitch length H twisted to a cylindrical surface with radius R_0 can be described in the following way [1]:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\bar{\varphi}) = R_0 (\cos(\bar{\varphi}) \cdot \mathbf{e}_x + \sin(\bar{\varphi}) \cdot \mathbf{e}_y) + \frac{H}{2\pi} \bar{\varphi} \cdot \mathbf{e}_z \quad (1)$$

where $\bar{\varphi}$ is the angle of the cylindrical coordinate system. The normal, binormal and tangential unit vectors ($\mathbf{n}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{t}$) of the local coordinate system of the helical wire can be defined using the Serret-Frenet formulas. The Love's curved beam theory is used for strain description [1]. According to this, three different displacement fields (u_1, u_2, u_3) in the direction $\mathbf{n}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{t}$ and one rotational field (χ_3) in tangential direction $\mathbf{t}$ in the local coordinate system are used for the approximation of the displacement of the beam centreline and for the rotation of the beam cross-section (twist). Rotation of the triad $\mathbf{n}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{t}$ is characterized by the values $\chi_i, i = 1, 2, 3$. Shear energy is neglected. The beam elements should have two nodes, and a higher order approximation can be performed using internal functions of the element. In this way, the maximum number of the degree of freedom is 32. Four fields should be approximated in the following way: u_3, χ_3 should have C^0 class continuity and u_1, u_2 should have C^1 class continuity between the elements. The approximation must be defined in such a way that strain should not occur due to rigid body movement with six DOFs. Considering the above mentioned, the $\mathbf{u}^L$ displacement of the centerline and the χ^L rotation of the cross-section at a point $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\varphi)$ in the local coordinate system (L) can be described with the following expression:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \chi \end{bmatrix}^L = \mathbf{V}^{LG}(\varphi) \mathbf{q}_i^G + \mathbf{\Phi}(\varphi) \mathbf{a} + \hat{\mathbf{\Phi}}(\varphi) \hat{\mathbf{a}}, \quad \mathbf{\Phi}(0) = \mathbf{0}, \hat{\mathbf{\Phi}}(0) = \hat{\mathbf{\Phi}}(1) = \mathbf{0} \quad (2)$$

where the first part of the equation describes the effect of the motion of the cross-section i , the second and third parts take into account the displacement and rotation, which occurs from the deformation relative to the cross-section i . Here, $\mathbf{V}^{LG}$ is the transformation matrix, $\Phi(\varphi)$, $\hat{\Phi}(\varphi)$ are the approximation matrices, $\mathbf{q}_i^G$ is the generalized global displacement vector of the cross-section i (with six components) in the global (G) xyz coordinate system, $\mathbf{a}$ is the vector of the displacement parameters (with six components), $\hat{\mathbf{a}}$ is the vector of the additional parameters. The $\Phi(\varphi)\mathbf{a}$ and $\hat{\Phi}(\varphi)\hat{\mathbf{a}}$ parts describe the displacement due to elastic deformation relatively to the node i . The number of the additional parameters at each field can be maximum five ($0 \leq p \leq 5 = p_{\max}$). With the same number of additional parameters the maximum sum of them can be $4 \cdot p_{\max} = 20$. After several transformations and changing of the equations, which are not written here, but presented in the dissertation, the approximated displacement vector in the local coordinate system is:

$$\tilde{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \chi_3 \end{bmatrix}^L = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{N}}_u \\ \bar{\mathbf{N}}_{\chi_3} \end{bmatrix} \mathbf{q} + \begin{bmatrix} \hat{\Phi}_u \\ \hat{\Phi}_{\chi_3} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{a}} = \tilde{\mathbf{N}}\mathbf{q} + \tilde{\Phi}\hat{\mathbf{a}} \quad (3)$$

where, $\mathbf{q}$ is the generalized nodal displacement vector of the element (with 12 components) in the global coordinate system, $\tilde{\mathbf{N}}$, $\tilde{\Phi}$ are the approximation matrices.

The interaction between the contact bodies is modeled using the Hertz-theory in the normal direction due to the small contact area. In this way, the structural model of the strand contains curved beams, which neglect shear energy, spring elements for modeling the local contact interaction and specific linear springs due to penalty technique for considering the friction effect. Based on these, new type finite elements are developed: special nonlinear spring element and spring foundation. The contact condition is determined between the cylindrical surfaces of the wires, also, the Poisson-effect and additional displacement, which occurs due to displacement of the centerline and rotation of the cross-section of the wires, are considered. The nonlinear problem of the contact interaction in the normal direction is solved with a special iteration procedure using augmented technique with linearization.

One of the advantages of the presented code is that the geometry is described accurately and displacement fields are approximated by a higher order of polynomials, which means that the interaction between the wires is described well. Therefore, shorter calculation time compared to the h -version FE codes is required and, moreover, there is no need in high computer resources. A software code is developed in FORTRAN language, which has a visualization module. Using this module, the discrete spring and continuous spring foundation can be shown between the wires. In the developed p -version software the user can define the geometric parameters of the strand structure, material properties of the wires, type of the clamping as well as type and magnitude of the load. The software can be used for one and two-layered wire rope strands, a number of the wires and pitch length in the layers can be selected without restraining. The generation of the elements is automatically performed using several data.

Knowing the internal forces, moments and stresses allows one to perform the wear calculation. The Archard-type wear equation is applied using 3D FE model and contact pressure as well as relative displacement obtained by the developed code. By assuming a certain number of cycles, the wear scar depth can be calculated. Based on these results, the number of cycles can be predicted, where the wire is broken, or the lifetime of the strand structure can be estimated.

3. SUMMARY OF THE NEW SCIENTIFIC RESULTS

The new scientific results of the thesis are summarised as the following:

1. A beam element was developed for curved beam using p -version finite element method, which is twisted around a cylindrical surface with pitch length H , considering linear elastic material properties and neglecting shear energy. The geometry and effect of the rigid body motion are described accurately. Four independent fields are approximated in the model. Distributed forces and moments along the curved beam can be also calculated with high accuracy using additional parameters $\{1\}, \{2\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \{11\}, \{12\}$.
2. By using this beam element, a finite element model was created for wire rope strand structures, which considers frictional contact, Poisson-effect and wear caused by relative displacement of the wires. The one-side contact in normal direction of the wire surface is considered based on the Hertz-theory, using non-linear spring (foundation), with linearization technique using special iteration procedure. Coulomb's law is used for describing the dry friction. The contact conditions are considered between the surface points of the wires $\{1\}, \{2\}, \{4\}, \{5\}, \{8\}, \{9\}$.
3. A procedure was developed for generating the mesh of the strand according to the helix angle and direction of the wires. This procedure determines the position of the crossing wires and generating the mesh so that nodes of the beam elements are placed into the contact points. Arbitrary helix angle and directions can be considered. According to the twisting direction right hand lay or left hand lay strand layers can be defined $\{1\}, \{2\}, \{4\}, \{5\}, \{8\}$.
4. Design curves are developed to analyze the effect of the strand parameters (helix angle, ratio of the radius in the outer and inner layers) on mechanical behaviour of the strand. The Mises stress level of the wires, contact forces and weight per unit length of the strand are determined and plotted for fixed end and free end loading cases $\{1\}, \{5\}, \{8\}$.
5. A 3D finite element model is developed for wear analysis, which uses the results of the strand model (relative displacement and contact force) as input data. Based on the Archard wear equation and this model, the amount of the worn material (wear scar depth) can be determined, furthermore, the wear scar depth with a given number of cycles can be predicted $\{3\}, \{7\}, \{9\}, \{10\}$.

4. APPLICABILITY OF THE RESULTS

The potential application of the developed method is the strand design or its development. This is a useful tool for design engineers or manufacturers, which can be applied in design process or used for sensitivity analyses with different parameters. The influence of different clamping conditions on mechanical behaviour of the strands can also be analyzed. Variation of helix angle and its direction as well as all geometric and material properties can be studied.

The method (model) can be applicable for that strand, which is already in service. Internal forces and moments, relative displacement, contact and frictional forces and stresses of the wires can be determined at a given load level. Based on the results, wear assessment can be performed, which makes it possible to predict the remaining service life of the structure.

Present model is applicable for conducting an analysis of one- and two-layered strands, however, it is not possible to analyze more complex structures as wire ropes. The model is valid in case of small displacement and small strain conditions, thus, only small angle bending can be analyzed. To analyze the rope bending over a sheave, it is required to consider large displacements, which is not available in the model.

5. DIRECTIONS AND POSSIBILITIES OF THE MODEL DEVELOPMENT

There can be found many opportunities for further development, which are also relevant in practice.

The first is to develop a model that is able to analyze more complex structures, such as wire ropes. The model developed in this thesis and the substructure technique can be used for further investigations in this field. The strand model built in a rope model enables one to consider the double helix of the wires, which accounts for the geometric non-linearity of the structure. Between the analytical models can be found similar ones, but with neglections (simplifications). In this case, consideration of the contact leads to obtaining too complicated expressions, however, it can be controlled using the developed p -version finite element model.

Another possibility for further improvement lies in the wear calculation which can be associated with fracture mechanical assessment, and therefore, damage of the wire can be determined more properly, and the lifetime estimation can be more accurate for the safe operation.

The thesis presents such strand constructions, where there is no contact between the adjacent wires in the same layer. This is a common practice to decrease the friction and wear of the wires. However, strands exist, where there is contact between the adjacent wires in the same layer. Development of such model, which considers this type of contact, is also an additional task.

A further possible research direction involves the analysis of the existing strand structures using the developed model or development of new strand construction, where single layers of the strand have balanced equivalent stress. This requires the optimization of the geometry and material properties to achieve the same stress level of the wires in one layer.

6. PUBLISHED PAPERS RELATED TO THE THESIS

Reviewed papers published in foreign language journals

- {1} Robert Beleznai, István Páczelt, Design curve determination for two-layered wire rope strand using p -version finite element code, Engineering with Computers, Springer-Verlag London Limited, 2012., DOI 10.1007/s00366-012-0269-7 (Impact factor in 2011: 0.739)
- {2} Páczelt I, Beleznai R. Nonlinear contact-theory for analysis of wire rope strand using high-order approximation in the FEM, Computers and Structures Vol. 89., Issues 11-12. (2011), 1004-1025 (Impact factor in 2011: 1.719)
- {3} István Páczelt, Róbert Beleznai, Contact wear effect to the mechanical degradation, Journal of Materials Science and Technology, Volume 16, No. 2, pp. 91-98., Institute of Metal Science, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria, 2008.

Reviewed paper published in Hungarian language journal

- {4} Beleznai Róbert, Kétrétegű sodratszerkezet vizsgálata p -verziós végelem módszerrel, GÉP, LX. évfolyam, 6. szám, 3-14. oldal, Miskolc, 2009.

Conference papers published in foreign language

- {5} Robert Beleznai, István Páczelt, Development of contact-theory for analysis of wire rope strand using p -version finite element method, Proceedings of TMCE 2010 Symposium, ISBN 978-90-5155-060-3, pp. 1051-1064, Ancona, Italy, 2010.
- {6} Róbert Beleznai, Dr. István Páczelt, Analysis of simple straight wire rope strand using p -version finite element method, microCAD 2008 International Scientific Conference, Miskolc, Hungary, 20-21 March, 2008., pp. 1-6.

Conference paper published in Hungarian language

- {7} Dr. Páczelt István, Beleznai Róbert: Drótkötelek belső kopásának szimulálása, XX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 339-342. oldal Kolozsvár, 2012.

Scientific lectures in foreign language

- {8} Robert Beleznai, István Páczelt, Development of contact-theory for analysis of wire rope strand using p -version finite element method, TMCE 2010 Symposium, Ancona, Italy, 2010.
- {9} István Páczelt, Róbert Beleznai, Analysis of simple straight wire rope strand using p -version finite element method, 8th World Congress on Computational Mechanics

(WCCM8) and 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), Venice, Italy, 2008

- {10} István Páczelt, Róbert Beleznaï, Contact wear effect to the mechanical degradation, Joint Hungarian-Ukrainian-Bulgarian Conference on Safety-Reliability and Risk of Engineering Plants and Components and XIV. International Colloquium „Mechanical Fatigue of Metals”, Varna, Bulgaria, 2008
- {11} Róbert Beleznaï, Dr. István Páczelt, Analysis of simple straight wire rope strand using p -version finite element method, microCAD 2008 International Scientific Conference, Miskolc, Hungary, 20-21 March, 2008.

Scientific lecture in Hungarian language

- {12} Beleznaï Róbert, Dr. Páczelt István, p -verziós végelem módszer kidolgozása sodratszerkezetre, XIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, 2008.

REFERENCES

- [1] G. A. Costello, Theory of wire rope, 2nd edition, Springer, New York, 1997
- [2] Anne Nawrocki, Michel Labrosse, A finite element model for simple straight wire rope strands, Computers and Structures 77 (2000), 345-359
- [3] M. Raoof, I. Kraincanic, Simple derivation of the stiffness matrix for axial/torsional coupling of spiral strands, Computers&Structures Vol. 55. No. 4 (1995), 589-600
- [4] Mohammed Raoof, Timothy J. Davies, Simple determination of the maximum axial and torsional energy dissipation in large diameter spiral strands, Computers&Structures Vol. 84. (2006), 676-689
- [5] W. G. Jiang, M. S. Yao, J. M. Walton, A concise finite element model for simple straight wire rope strand, International Journal of Mechanical Sciences 41 (1999), 143-161
- [6] Wen-Guang Jiang, K. Michael, J. Warby, J. L. Henshall, Statically indeterminate contacts in axially loaded wire strand, European Journal of Mechanics A/Solids 27 (2008), 69-78
- [7] W. G. Jiang, J. L. Henshall, J. M. Walton, A concise finite element model for three-layered straight wire rope strand, International Journal of Mechanical Sciences 42 (2000), 63-86
- [8] W.S. Utting, N. Jones, Survey of the literature on the behaviour of steel wire rope, Wire Industry 51 (1984), 623-629
- [9] W. S. Utting and N. Jones, The response of wire rope strands to axial tensile loads – Part I. Experimental results and theoretical predictions, Int. J. Mech. Sci. Vol. 29., No. 9. (1987), 605-619
- [10] W. S. Utting and N. Jones, The response of wire rope strands to axial tensile loads – Part II. Comparison of experimental results and theoretical predictions, Int. J. Mech. Sci. Vol. 29., No. 9. (1987), 621-636
- [11] Róbert Beleznai, Szabolcs Szávai, Dr. László Sárközi, Péter Rózsahegyi, Analytical and FEM analysis of the seven-wire strand under axial load, An International Journal for Engineering and Information Sciences, DOI:10.1556/Pollack.2.2007.2.8, Vol 2., No.2., pp. 93-101 Pécs, Hungary, 2007.
- [12] Seyed Reza Ghoreishi, Patrice Cartraud, Peter Davies, Tanguy Messenger, Analytical modeling of synthetic fiber ropes subjected to axial loads. Part I: A new continuum model for multilayered fibrous structures, International Journal of Solids and Structures 44 (2007), 2924–2942
- [13] Seyed Reza Ghoreishi, Peter Davies, Patrice Cartraud, Tanguy Messenger, Analytical modeling of synthetic fiber ropes. Part II: A linear elastic model for 1 + 6 fibrous structures, International Journal of Solids and Structures 44 (2007), 2943–2960
- [14] Seyed Reza Ghoreishi, Tanguy Messenger, Patrice Cartraud, Peter Davies, Validity and limitations of linear analytical models for steel wire strands under axial loading, using a 3D FE model, International Journal of Mechanical Sciences 49 (2007), 1251–1261