

Jozef KREŠÁK*, Pavel PETERKA**, Stanislav KROPUCH***

MODELOVANIE DOTYKU DRÔTOV V LANE A JEHO VPLYV NA ŽIVOTNOSŤ LANA

SIMULATION OF THE CONTACT WIRES IN ROPES AND ITS INFLUENCE ON THE
DURABILITY OF THE STEEL WIRE ROPES

Abstrakt

Jedným z dôležitých prvkov používaných v doprave sú laná. Patria medzi časti dopravných systémov, ktoré sú vysoko efektívne a zároveň patria aj k najstarším dopravným častiam používaných ľudstvom. Pri premiestňovaní bremien boli ľuďmi najskôr používané textilné laná alebo laná vyrobené z medených drôtov, od 19. storočia sú používané laná vyrobené z ocelových drôtov. Najväčšie uplatnenie lán je v baniectve pri ťažbe rúd a uhlia, ďalšími oblasťami uplatnenia sú zvislá alebo vodorovná doprava osôb a bremien pomocou žeriavov, výťahov, vlekov a lanoviek. V mnohých prípadoch sú laná nasadené v extrémne namáhaných systémoch z pohľadu zaťaženia lana alebo z pohľadu prostredia ako sú tepelné prevádzky, banské korozívne prostredie apod.. V blízkosti lán sa vždy pohybujú ľudia, buď sú lanom dopravovaní alebo pracujú pod bremenami zavesenými na lanách. Z uvedených dôvodov je lano z pohľadu bezpečnosti radené medzi určené výrobky, preto je potrebné pred uvedením lana do prevádzky alebo na trh vykonať skúšky lana predpísané normami a vykonať posúdenie zhody a certifikáciu lana. Napriek správne vykonaným skúškam na základe, ktorých lano bolo certifikované nemusí predmetné lano v prevádzke dosiahnuť požadovanú životnosť. Veľký vplyv na životnosť lana v prevádzke má jeho interakcia so zariadením, na ktorom je lano nasadené, spôsob zaťaženia lana a starostlivosť o lano počas jeho prevádzky. Okrem tohto pôsobenia na životnosť lana vplyva aj jeho správna konštrukcia, na ktorú je v tomto príspevku poukázané. Správnosť konštrukcie je posudzovaná nielen z pohľadu na pevnostné a deformačné vlastnosti drôtov, z ktorých je lano vyrobené, ale aj z pohľadu ich zabudovania do konštrukcie lana. Veľmi dôležitým prvkom pre životnosť ocelového lana, ktorý vie výrobca najviac ovplyvniť, sú správne zvolené priemery drôtov a uhly vinutí drôtov pre lano s presne určenými prevádzkovými podmienkami.

Abstract

Ropes rank among the most important components used for transportation. They belong to components of transport systems which are highly effective and at the same time they are the oldest transport components used by mankind. At first textile or copper wire ropes were used by people for transfer of burdens, while steel ropes have been used since nineteenth century. Mining industry is the biggest area of their application mainly for hoisting of ore or coal, additional areas of application are vertical or horizontal transportation of mining personnel and burdens by means of cranes, hoists, rope haulage equipment and aerial ropeways. In many cases the ropes are installed in extremely loaded systems in view of rope loading magnitude or of environmental load in high temperature or corrosive environment mine workings etc. Workers are always moving in vicinity of ropes, either when being transported by rope haulage or when they work below burdens suspended on rope. For the above-mentioned reasons the rope is classified in view of safety into specified products, therefore it is

* Ing., Ph.D., Technická univerzita v Košiciach, Fakulta BERG, Skúšobňa ocelových lán SKTC-147, Park Komenského 14, 043 84 Košice, Slovensko, e-mail: jozef.kresak@tuke.sk

** Ing., Ph.D., Technická univerzita v Košiciach, Fakulta BERG, Skúšobňa ocelových lán SKTC-147, Park Komenského 14, 043 84 Košice, Slovensko

*** Ing., Ph.D., Technická univerzita v Košiciach, Fakulta BERG, Skúšobňa ocelových lán SKTC-147, Park Komenského 14, 043 84 Košice, Slovensko

necessary prior to putting of rope into operation or bringing it to market to perform testing of rope prescribed by standards and to assess its conformity and certification. However, in spite of correctly performed tests on the basis of which a rope has been certified, the rope might not reach required service life. A big influence on service life of rope has its interaction with the equipment for which it is applied, the way in which a load acts on rope as well as the maintenance of rope during its operation. In addition to these effects the service life of rope is affected by proper rope design as it is mentioned in final part of the paper. Adequacy of rope design is assessed not only from the point of view of strength and deformation characteristics of wires of which the rope is made, but also from the point of view of the way in which the wires are assembled within frame of rope design. As the most important element for service life of steel rope which can be in a maximum extent affected by rope manufacturer the properly designed wire diameters and wire coiling angles can be considered which are adapted to exactly defined rope service conditions.

Key words: model, rope, matrix, equation, strand, wire.

Úvod

Dôležitou vlastnosťou lana pri prevádzke je jeho životnosť. Táto vlastnosť je veľmi sledovaná užívateľom, a predčasné alebo skoré vyradenie lana z prevádzky je najčastejším dôvodom pre reklamáciu kvality lana. Na životnosť lana má vplyv veľké množstvo faktorov, ako sú interakcia lana s ďalšími časťami zariadenia, na ktorom je lano nasadené, klimatické podmienky a agresivita prostredia, v ktorom pracuje, ale aj možnosti jeho údržby a ošetrovania počas prevádzky.

Ďalšími dôležitými faktormi sú vlastné parametre lana, ktoré sú ovplyvnené spôsobom výroby lana alebo drôtu. Medzi tieto parametre patria rozptyl pevnosti drôtov [1], z ktorých je lano vyrobené, priemery drôtov a ich usporiadanie v priereze prameňa s ohľadom na podmienku aby sa drôty tej istej vrstvy vzájomne nedotýkali [2]. Veľký vplyv na životnosť lana majú tiež uhly vinutia drôtov v prameni a prameňov v lane spoločne s modulom pružnosti v ťahu drôtov a Poissonovým číslom pre oceľ použitých drôtov lana. K týmto parametrom je potrebné priradiť aj vplyv umŕtvenia prameňov lana a lana samotného vrátane mazania, ktoré znižuje trenie medzi drôtmí pri práci lana.

Ako je vidno z vyššie uvedeného, faktorov ktoré ovplyvňujú životnosť oceľových lán je veľké množstvo, ale jedným z podstatných je zaťaženie lana, prameňov a drôtov. Ideálne by bolo, keby všetky drôty a pramene v lane boli rovnomerne zaťažené a namáhané. Veľmi nepriaznivý vplyv na životnosť lana má vznik ohybových striedavých namáhání na kladkách a lanovniciach, kde pri nerovnomernom zaťažení drôtov a prameňov od osovej sily dochádza vplyvom ohybu lana k zvýšenému namáhaniu, niektorých drôtov resp. prameňov, ktoré sa rýchlo porušia a celé lano je pre ďalšiu prevádzku nepoužiteľné. V tomto príspevku sú prezentované modely lana, ktoré sú rovnomerne zaťažené, čím sa eliminujú najnepriaznivejšie faktory vplyvajúce na jeho životnosť [3],[4].

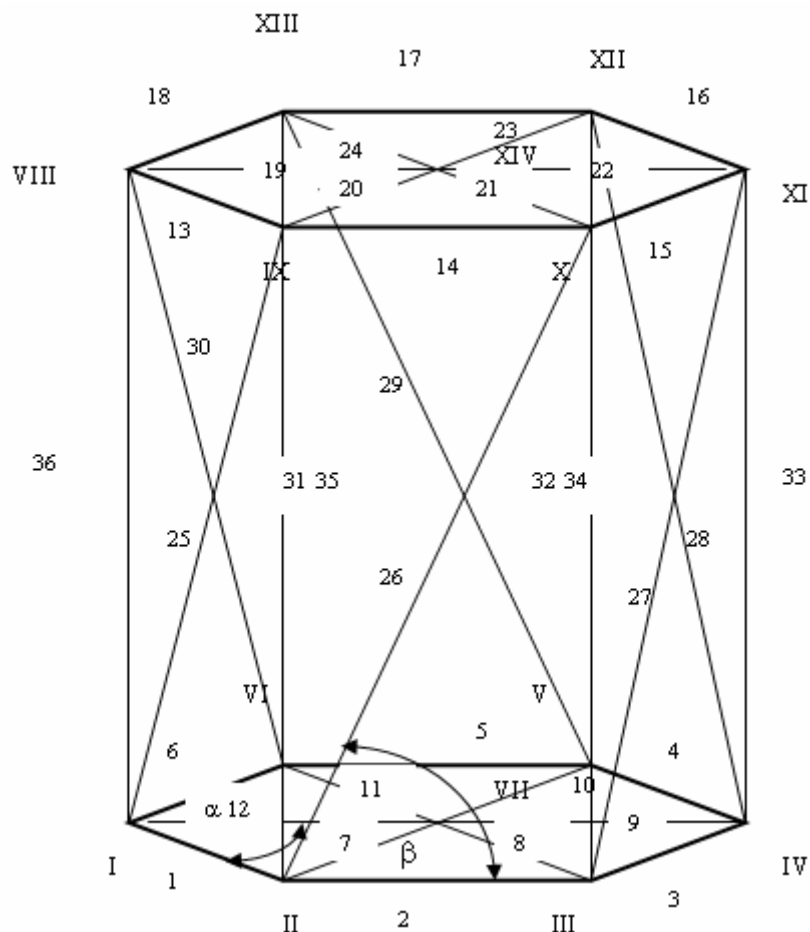
Navrhované modely prierezov lana konštrukcia 1+6

Pri riešení rozloženia vonkajšieho zaťaženia lana na jednotlivé drôty prierezu lana boli vytvorené modely jednopramenného lana konštrukcie 1+6 t.j. s jedným drôtom ako duša lana a šiestimi vonkajšími drôtmí lana. Modelované lano bolo priamo osovo zaťažené. Pri modelovaní sa neuvažovalo s ohybom lana. Modely boli volené tak, aby ich bolo možné riešiť metódou priestorových prúťových sústav. Modely reprezentujú jednopramenné laná ľubovoľného priemeru, ktorý je určený priemerom drôtov v konštrukcii lana.

Priestorové modely časti vinutých lán

Na obrázku č. 1 je prvý použitý model. Model predstavuje priestorovú prúťovú sústavu, v ktorej je simulovaný vzájomný dotyk drôtov vo vonkajšej vrstve a dotyk so stredným drôtom lana. Po zostavení rovníc pôvodný determinant sústavy rovníc je rovný nule, čo znamená, že rovnice sú vzájomne závislé a sústava rovníc nemá riešenie alebo má nekonečný počet riešení. Druhý model na obrázku č. 2 predstavuje priestorovú prúťovú sústavu, v ktorej nedochádza k vzájomnému dotyku drôtov vo vrstve. Vonkajšie drôty sa dotýkajú iba vnútorného drôtu lana. Sústava rovníc prúťovej sústavy má opäť pôvodný determinant matice sústavy rovníc

rovný nule. Sústava rovníc nemá riešenie. Sústavy rovníc obsahujú štyridsať dva rovníc o štyridsiatich dvoch neznámych, preto uvádzanie determinantov rovníc by neúčelne rozšírilo obsah príspevku. V prípade záujmu o konkrétne matematické riešenie tejto problematiky je možné obrátiť sa na autorov príspevku.



Obr. 1: Model prameňa 1+6 – simulácia kontaktu medzi drôti vonkajšej vrstvy prameňa

Analýza výsledkov modelovania lana

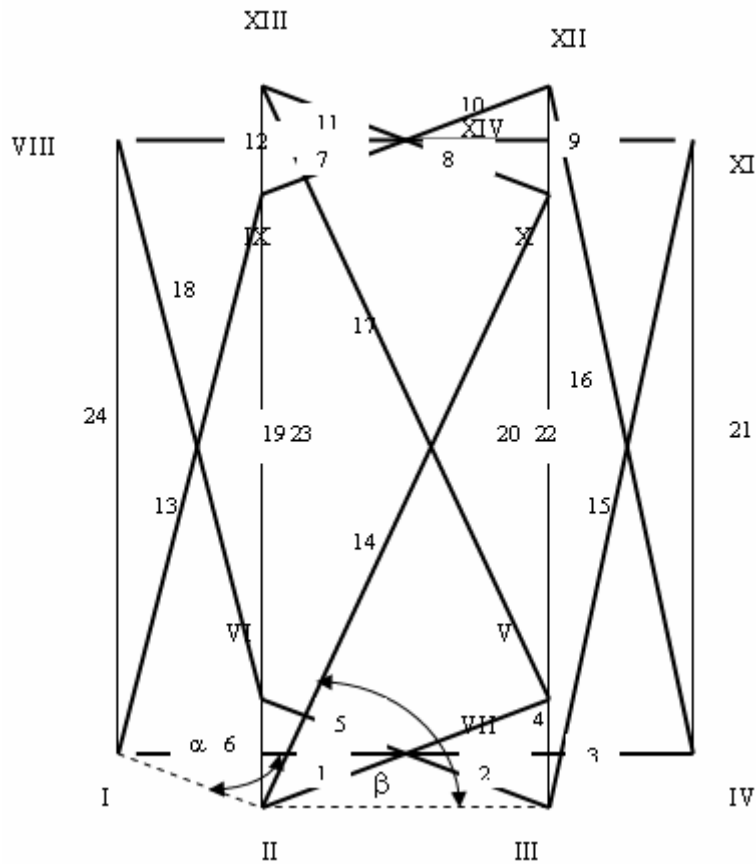
Pretože riešenie modelov na obrázkoch č. 1 a 2 nie je možné použitím metód pre riešenie priestorových prúťových sústav, bolo potrebné vytvoriť priestorové modely priereзов lana konštrukcie 1+6, ktoré sú zobrazené na nasledovných obrázkoch č. 3 a 4.

Priestorové modely priereзов lana

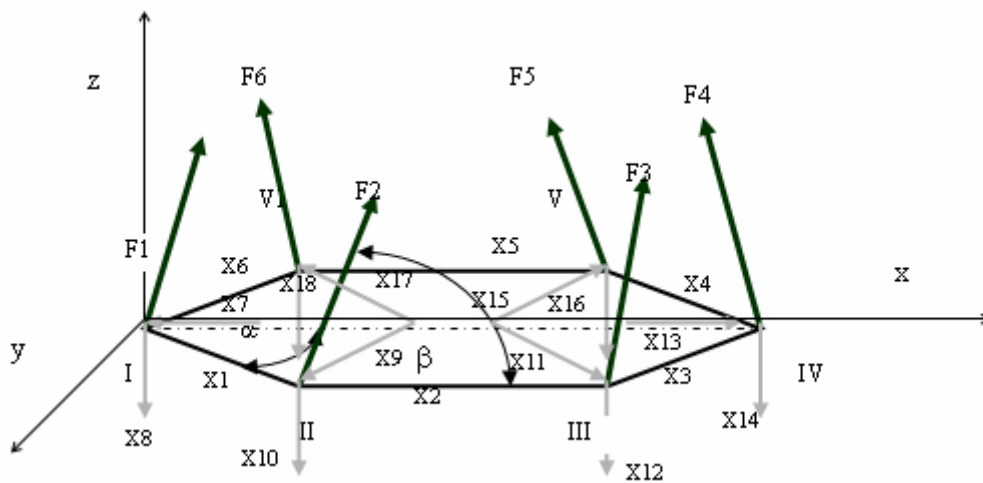
Prúťová sústava bola zjednodušená, tak aby bola riešiteľná jednoduchými statickými metódami bez zavedenia metód pružnosti a pevnosti, tzn. aby model predstavoval staticky a tvarovo určitú prúťovú sústavu. Pri modelovaní bol zvolený ľavotočivý smer vinutia, voľba smeru vinutia nemá vplyv na veľkosť vypočítaných síl, iba na ich orientáciu a smer.

Na obrázku č. 3 je zobrazený model priereзу lana 1 + 6. Model predstavuje rovinný rošt tvaru šesťuholníka, kde vonkajšie drôty sa navzájom dotýkajú a zároveň sa dotýkajú stredového drôtu lana. Zaťaženie roštu vytvára zložky osovej sily, ktoré zaťažujú jednotlivé styčníky roštu v smere uhla stúpania skrutkovice vonkajších drôtov a ich hodnota je 1 kN. Väzby v šiestich vonkajších styčníkoch odoberajú dva stupne voľnosti. Platí podmienka tvarovej i statickej určitosti pre rošt.

Pre rošt bola napísaná sústava osemnástich rovníc pre šesť styčníkov, to znamená tri pre styčník. Ako príklad uvádzame prvé tri rovnice (1), (2), (3) pre prvý styčník (I). Riešením sústavy týchto rovníc sú nasledujúce hodnoty v tabuľke č. 1 pre uhol $\beta=30^\circ$. Zaťažujúce sily $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F_5 = F_6 = F/6 = 1$ kN, kde F je vonkajšia zaťažujúca sila lana.



Obr. 2: Model prameňa 1+6 – simulácia dotyku vonkajších drôtov so stredovým drôtom prameňa bez vzájomného dotyku drôtov vo vonkajšej vrstve



Obr. 3: Model prierezu prameňa 1+6 – simulácia dotyku vonkajších drôtov prameňa

Styčnik I:

$$\Sigma F_{ix} = 0 \quad -X_1 \cdot \cos \alpha - X_6 \cdot \cos \alpha - X_7 + F_1 \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha = 0 \quad [\text{N}], \quad (1)$$

$$\Sigma F_{iy} = 0 \quad -X_1 \cdot \sin \alpha + X_6 \cdot \sin \alpha + F_1 \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha = 0 \quad [\text{N}], \quad (2)$$

$$\Sigma F_{iz} = 0 \quad -X_8 + F_1 \cdot \sin \beta = 0 \quad [\text{N}], \quad (3)$$

kde:

α – polovičný uhol vonkajšieho uhla mnohouholníka vpísaného do prierezu drôtov vonkajšej vrstvy [°],

β – uhol stúpania skrutkovice drôtov [°],

X_1 až X_8 – väzbové sily sústavy a sily v prútoch prútovej sústavy.

Tabuľka 1: Vypočítané sily v prútoch a väzbách modelovaného prierezu lana na obrázku č. 3 (uhol vinutia 30°)

Sila	Hodnota [kN]	Sila	Hodnota [kN]
X_1	5.404E+16	X_{10}	0.000E+00
X_2	5.404E+16	X_{11}	5.404E+16
X_3	5.404E+16	X_{12}	-3.000E+00
X_4	5.404E+16	X_{13}	5.404E+16
X_5	5.404E+16	X_{14}	0.000E+00
X_6	5.404E+16	X_{15}	5.404E+16
X_7	5.404E+16	X_{16}	8.660E-01
X_8	1.500E+00	X_{17}	5.404E+16
X_9	5.404E+16	X_{18}	8.660E-01

Legenda: 5,404 E+16 = 5,404.10¹⁶,

X_{10} až X_{18} – väzbové sily modelu a sily v prútoch modelu.

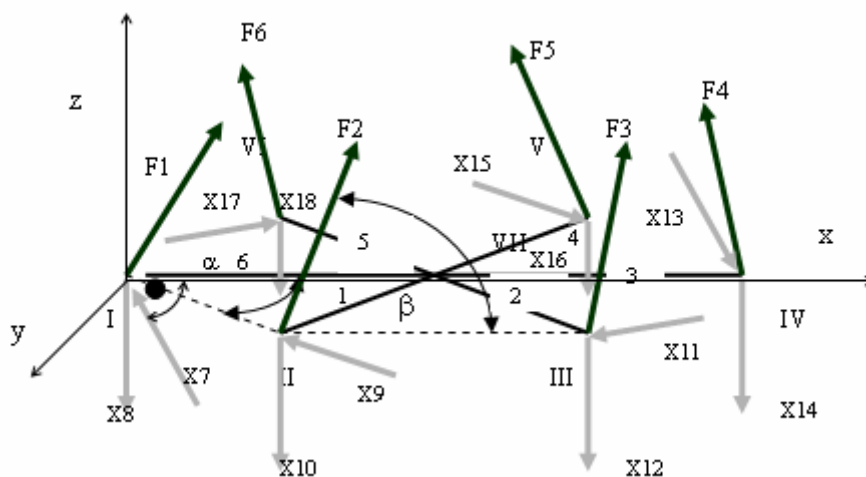
Z riešenia vidno, že prúty roštu, ktoré predstavujú dotykové body medzi vonkajšími drôťmi a vnútornými drôťmi sú zaťažené veľmi veľkými silami, ktoré nemôžu prenieť. Ďalšou zaujímavosťou tohto modelu je, že do uhla vinutia 18° je rozdelenie axiálnych väzbových síl rovnomerne rozdelené na každý drôt (tabuľka č. 2), ale ak je uhol vinutia väčší, dochádza k nesúmernému osovému zaťaženiu drôtov lana. Dva drôty sú zaťažené rovnako. Ostávajúce štyri drôty sú nerovnomerne zaťažené. Takéto osovú zaťaženie vonkajších drôtov spôsobí veľké deformácie v konštrukcii lana. Nezaťažený drôt sa uvoľní z konštrukcie lana. Ak predpokladáme, že podobne sa bude chovať aj šesťpramenné lano s textilnou dušou, potom najviac zaťažený prameň sa zatlačí do duše lana a nezaťažený prameň sa uvoľní z konštrukcie lana. Pri prameni aj lane uvoľnenie jedného z prvkov spôsobí trvalé deformácie, ktoré zabránia používaniu prameňa alebo lana, respektíve veľmi znížia jeho životnosť.

Tabuľka 2: Vypočítané sily v prútoch a väzbách modelovaného prierezu lana na obrázku č. 3 (uhol vinutia 15°)

Sila	Hodnota [kN]	Sila	Hodnota [kN]
X_1	9.420E+15	X_{10}	9.962E-01
X_2	9.420E+15	X_{11}	9.420E+15
X_3	9.420E+15	X_{12}	9.962E-01
X_4	9.420E+15	X_{13}	9.420E+15
X_5	9.420E+15	X_{14}	9.962E-01
X_6	9.420E+15	X_{15}	9.420E+15
X_7	9.420E+15	X_{16}	9.962E-01
X_8	9.962E-01	X_{17}	9.420E+15
X_9	9.420E+15	X_{18}	9.962E-01

Na obrázku č. 4 je model priestorového roštu, ktorý predstavuje prierez sedem drôtového lana, v ktorom sa vonkajšie drôty navzájom nedotýkajú. Zaťaženie v styčných roštu je rovnaké ako u predchádzajúceho modelu. Väzby v styčných 1 – 6 odoberajú každá dve stupne voľnosti jedna z väzbových síl pôsobí v dotyčnici kružnice opisanej prameňu. Podmienka tvarovej a statickej neurčitosti je opäť splnená.

Opäť je možné napísať sústavu osemnástich rovníc, ako príklad uvádzame prvé tri rovnice (4), (5), (6) pre prvý styčník (I). Riešenie sústavy týchto rovníc je uvedené v tabuľke č. 3. Zaťažujúce sily $F1 = F2 = F3 = F4 = F5 = F6 = F/6 = 1$ kN, kde F je vonkajšia zaťažujúca sila lana.



Obr. 4: Model prierezu prameňa 1+6 – simulácia bez vzájomného dotyku vonkajších drôtov prameňa

Styčnik I:

$$\Sigma F_{ix} = 0 \quad -X_6 + F_1 \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha = 0 \quad [\text{N}] \quad (4)$$

$$\Sigma F_{iy} = 0 \quad -X_7 + F_1 \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha = 0 \quad [\text{N}] \quad (5)$$

$$\Sigma F_{iz} = 0 \quad -X_8 + F_1 \cdot \sin \beta = 0 \quad [\text{N}] \quad (6)$$

kde:

α – polovičný uhol vonkajšieho uhla mnohoholníka vpísaného do prierezu drôtov vonkajšej vrstvy [°],

β – uhol stúpania skrutkovice drôtov [°],

X_6 až X_8 – väzbové sily sústavy a sily v prútoch prútovej sústavy.

Tabuľka 3: Vypočítané väzbové sily a sily v prútoch pre model prierezu prameňa na obr. 4 (uhol vinutia 30°)

Sila	Hodnota [kN]	Sila	Hodnota [kN]
X_1	2.500E-01	X_{10}	8.660E-01
X_2	2.500E-01	X_{11}	4.330E-01
X_3	2.500E-01	X_{12}	8.660E-01
X_4	2.500E-01	X_{13}	4.330E-01
X_5	2.500E-01	X_{14}	8.660E-01
X_6	2.500E-01	X_{15}	4.330E-01
X_7	4.330E-01	X_{16}	8.660E-01
X_8	8.660E-01	X_{17}	4.330E-01
X_9	4.330E-01	X_{18}	8.660E-01

Tento model prierezu najlepšie vystihuje rozloženie zaťaženia prameňa alebo lana od osovej sily. Všetky drôty v prameni, resp. pramene v lane, sú rovnomerne a rovnako zaťažené. Kontaktné sily na dušu prameňa alebo lana zodpovedajú predpokladom statiky. Za povšimnutie stojí, že u tohto modelu aj zmena uhla vinutia nespôsobuje nerovnomerné väzbové sily vo väzbových styčníkoch roštu ako to bolo u predošlého roštu.

Záver

Z uvedených skutočností vyplýva, že pri konštrukcii lana je potrebné dodržiavať podmienku vzájomného nedotýkania sa drôtov tej istej vrstvy drôtov [2]. Ak je táto podmienka dodržaná, osová sila zaťažujúca lana sa rovnomerne rozloží na rovnaké väzbové sily pôsobiace v drôtoch bez toho, aby na symetriu väzbových síl mal vplyv uhol vinutia drôtov v prameni (30° alebo 17°, tabuľka č. 3). Hlavnou snahou bolo poukázať práve na skutočnosť, že ak sa drôty tej istej vrstvy nedotýkajú tak uhol vinutia lana môže byť aj iný ako je bežne používaný, ale ak sa drôty tej istej vrstvy navzájom dotýkajú tak aj pri použití uhlov vinutia z intervalu 14° až 17° dochádza k enormnému zaťaženiu drôtov lana (tabuľka č. 2), čo má značný vplyv na životnosť lana. Výrobcovia by sa mali preto snažiť o výrobu lán spôsobom aby nedochádzalo k vzájomnému

kontaktu drôtov v tej istej vrstve. Ako príklad môžu poslúžiť výrobcovia (DIEPA, CASAR), ktorý vo svojich konštrukciách lán používajú polypropylén ako dištančnú vložku medzi drôtmi a prameňmi, pre splnenie hore uvedenej podmienky. Životnosť lana je sledovaná tiež metódami technickej diagnostiky ako je magnetoinduktívna defektoskopia [5], [7] a akustická defektoskopia lán [8], [9], [10]. Tieto defektoskopické metódy potvrdzujú vyššie uvedený predpoklad, že ak pri výrobe lana došlo k vzájomnému dotyku drôtov tej istej vrstvy alebo prameňov tej istej vrstvy tak dochádza k nerovnomernému zaťaženiu jednotlivých drôtov resp. prameňov lana a tým dochádza k nežiadúcim deformáciám lana a k predčasnému výskytu zlomov drôtov lana.

Realizáciou tohoto modelu [6] pri výrobe oceľového lana je predpoklad zvýšenia jeho životnosti a zlepšenia jeho úžitkových vlastností.

Literatúra

- [1] Boroška, J., Krešák, J., Peterka, P.: Hodnotenie kvality oceľových lán z hľadiska ich mechanických vlastností. *Acta Montanistica Slovaca*, 1, 1997, s. 37-42.
- [2] Costtelo J.: *Steel wire rope*, New York, Springer- Verlag, 1990, 106 s.
- [3] J. Fries : Maintenance of long wall shearer, *In. Diago, TU Ostrava*, 2000, s. 55-61.
- [4] Krešák, J., Kropuch, S., Peterka, P.: Skúsenosti z defektoskopických kontrol oceľových lán. *In.: In Výskum, výroba a použitie oceľových lán, Podbanské, 1998, s. 204-207.*
- [5] Krešák, J., Kropuch, S., Peterka, P.: Vývoj a výskum nových defektoskopických prístrojov na Fakulte BERG TU v Košiciach, *In Diagnostika strojov DIS 2000, Košice, 2000, s.34-38.*
- [6] Krešák, J.: Sledovanie kvality a životnosti oceľových lán, *Doktorandská dizertačná práca, Košice, 2001, 117 s.*
- [7] Kropuch, S., Peterka, P., Krešák, J.: Defektoskopické skúšky oceľových lán súčasný stav, problémy a skúsenosti. *In Nové poznatky v oblasti vrtania, ťažby, dopravy a uskladňovania uhl'ovodíkov", Podbanské, 1999, s. 101-104.*
- [8] Roth, O., Roman, J., Ďuricová, A., Rovňák, M., Kul'ková, E.: Diagnostika mosta cez Váh v Púchove, *In Inžinierske stavby, Košice, 1995, s. 334-337.*
- [9] Stroffek, E., Leššo, I.: Acoustic method for measurement of Young modul of steel wire ropes, *Metallurgy vol. 39,2000 , s. 216-218.*
- [10] Zrník, J., Krešák, J., Kropuch, S., Peterka, P.: Modelovanie životnosti oceľových lán, *In LOADO, Vysoké Tatry, 2001, s. 407-410.*

Summary

It results from the above-mentioned facts that when designing a rope or rope strand it is necessary to fulfill the condition of mutual non-contacting of rope wires and strands within the same wire or strand layer. If this condition is fulfilled, the axial load of strand or rope is evenly decomposed into coupling forces working in strands or wires and the winding of wires within strand (or winding angle of strands within rope) has no unfavourable impact on system of coupling forces. Service life of rope is monitored by technical diagnosis methods, e.g. magneto-inductive crack detection or acoustic crack detection. These crack detection methods affirm the above-mentioned assumption. If during manufacture of rope a mutual contact of wires within the same layer or of strands within the same layer of strands occurs, unequal loads of particular wires or strands will be caused which would lead to undesirable deformation of rope or to early occurrence of disruptions of rope wires. It can be expected that safeguarding of the condition of mutual non-contacting of wires or strands within the same layer during manufacture of steel rope, could increase its service life and improve its functional properties.

Recenzenti: Prof. Ing. Jaromír Pištora, CSc., VŠB-TU Ostrava,
Prof. Ing. Horst Gondek, CSc., VŠB-TU Ostrava.