

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ДОДАТКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЕЛЕМЕНТАХ СТАЛЕВИХ КАНАТІВ ПРИ НАБІГАННІ НА БЛОКИ ТА БАРАБАНИ

© Ломакін А. О.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Ломакін Андрій Олександрович (Lomakin Andrii): ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6729-3168>; e-mail: lomakin@upra.edu.ua, Українська інженерно-педагогічна академія, кандидат технічних наук, доцент кафедри практичної психології, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті розглядаються теоретичні та експериментальні підходи до дослідження додаткових напружень, що виникають в елементах сталевих канатів при набіганні на блоки та барабани. Постановка проблеми висвітлює важливість цього питання для широкого кола галузей промисловості, де використовуються сталеві канати, та необхідність підвищення їх міцності, надійності й довговічності. В основній частині роботи наведені різноманітні формули для визначення додаткових напружень, запропоновані вітчизняними та зарубіжними дослідниками, такими як Маліновський В.А., Нікітін І.Ф., Глушко М.Ф., Сергеев С.Т., Бенойт Дж., Ісааксен І., Ернст У., Лейдер, Шмідт К. та іншими. Зазначається, що більшість цих формул застосовна лише для спіральних канатів і не враховує конструктивні особливості канатів подвійної звивки. Порівняння значень додаткових напружень, отриманих розрахунковим способом і експериментальним шляхом, проведене Нікітиним І.Ф., демонструє значні розбіжності між ними. Далі детально розглядаються експериментальні методи визначення напружень, застосовані різними дослідниками. Особлива увага приділяється дослідом Нікітіна І.Ф., який використовував спеціальні П-подібні тензорезистори для вимірювання деформацій діаметрально протилежних пасм дротів у канаті, що дозволило виключити вплив вигину та скручування. Наводяться осцилограми додаткових напружень, отримані в його експериментах, та підкреслюється, що це були прямі виміри саме додаткових напружень. Інші дослідники, такі як Вік та Шиффнер Г., наклеювали тензодатчики на зовнішнє пасмо дротів і вимірювали сумарні напруження розтягу й вигину, отримуючи відповідні осцилограми. У роботі Шмідта К. представлено результати трьох серій експериментів з непрямого визначення додаткових напружень, які базувалися на вимірюванні моменту внутрішнього конструкційного тертя, прогину каната при поперечному навантаженні та визначенні втомної міцності при знакозмінному вигині на блоках. Узагальнюючи результати різних дослідів, Шмідт К. робить висновок про величину подвійної амплітуди коливань напружень у дроті при потраплянні його на випуклу та ввігнуту сторони каната для різних конструкцій канатів і якості їх змащення. Водночас автор підкреслює, що в усіх цих дослідях додаткові напруження розглядалися як повністю сформовані силами тертя ковзання між дротами при їх відносному зсуві, що не враховує низку інших факторів.

Ключові слова: сталеві канати; додаткові напруження; набігання на блоки та барабани; теоретичні підходи; експериментальні підходи; формули для визначення напружень; тензорезистори; осцилограми напружень; момент внутрішнього тертя; втомна міцність.

Lomakin A. “Theoretical and experimental approaches to studying additional stresses in elements of steel wire rope during winding on sheaves and drums”

The article discusses theoretical and experimental approaches to studying additional stresses that arise in elements of steel wire ropes during winding on sheaves and drums. The problem statement highlights the importance of this issue for a wide range of industries utilizing steel wire ropes and the necessity to increase their strength, reliability, and durability. The main part of the work presents various formulas for determining additional stresses, proposed by domestic and foreign researchers such as V.A. Malinovsky, I.F. Nikitin, M.F. Glushko, S.T. Sergeev, J. Benoit, I. Isaacsen, U. Ernst, Leider, K. Schmidt, and others. It is noted that most of these formulas are applicable only to spiral ropes and do not account for the design features of double-lay ropes. The comparison of additional stress values calculated and experimentally obtained by I. F. Nikitin demonstrates significant discrepancies between them. Further, the article examines experimental methods for determining stresses used by various researchers in detail. Special attention is given to I.F. Nikitin's experiments, where U-shaped strain gauges were used to measure deformations of diametrically opposite strands of wires in the rope, excluding the influence of bending and torsion. The oscillograms of additional stresses obtained in his experiments are presented, emphasizing these were direct measurements of additional stresses. Other researchers, like Vik and G. Schiffner, glued strain gauges on the outer strands of wires and measured combined stresses of tension and bending, obtaining corresponding oscillograms. K. Schmidt's work presents results from three series of experiments for indirectly determining additional stresses, based on measuring internal construction friction torque, rope deflection under transverse loading, and determining fatigue strength under alternating bending on sheaves. Summarizing the results of various experiments, K. Schmidt concludes on the magnitude of double amplitude stress oscillations in the wire when it falls on the convex and concave sides of the rope for different rope constructions and lubrication quality. However, the author emphasizes that in all these studies, additional stresses were considered as fully formed by sliding friction forces between wires during their relative displacement, which does not account for several other factors.

Keywords: steel wire ropes; additional stresses; winding on sheaves and drums, theoretical approaches; experimental approaches; formulas for stress determination; strain gauges; stress oscillograms; internal friction torque; fatigue strength.

Постановка проблеми

У наш час дуже важко уявити розвиток основних галузей промисловості без застосування сталевих канатів. У гірничодобувній промисловості сталевий канат є основною тяговою ланкою, яка забезпечує транспортування корисних копалин на поверхню. Робота машинобудівних і металургійних підприємств з їхніми засобами механізації немислима без використання сталевих канатів. Для більшості конструкцій вантажопідйомних і будівельних машин сталевий канат є невід'ємним і найважливішим елементом. Сучасний рівень розвитку техніки висуває все нові й нові вимоги до підвищення міцності, надійності й довговічності сталевих канатів. Одним з місць концентрації напружень у канаті є ділянки набігання каната на блоки і барабани. Оскільки у цих місцях виникають локальні додаткові напруження, що істотно впливають на втомну і руйнівну міцність каната. Дослідженням питань виникнення додаткових напружень в елементах канатів займалися представники багатьох вітчизняних і закордонних шкіл, серед них Маліновський В.А. [1, 2], Нікітін І.Ф. [3-5], Глушко М.Ф. [6], Сергєєв С.Т. [7-9], Флоринський Ф.В., Почтаренко Є.С., Шмідт К. [10], Шіффнер Г. [11], Бенойт Дж., Фейрер К., Ернст У. та інші.

Основний матеріал

У науковій та технічній літературі питанню додаткових напружень у сталевих канатах приділяється достатньо уваги. При цьому практично всі автори розглядали гвинтовий

елемент у канаті як гнучку нитку на шорсткуватій поверхні осердя, а в якості граничного критерію приймали силу тертя-ковзання на цій поверхні. Для визначення додаткових напружень різні автори пропонували такі формули:

$$\text{Маліновський В.А. [1, 2] – } \max \sigma_d = \Delta t_0 / f_i$$

Δt_0 – надлишкове натягнення,

f_i – площа перерізу гвинтового елемента.

Але дана формула застосовна тільки для спіральних канатів, а для канатів подвійної звивки дає середнє додаткове напруження по перерізу пасма.

$$\text{Нікітін І.Ф. [3, 4] – } \sigma_d = \sigma_r \left(e^{\mu \left[\frac{r \cos^2 \alpha}{R \sin \alpha} + \left(\varphi_0 + \frac{\pi}{2} \right) \sin \alpha \right]} - 1 \right);$$

$$\text{Глушко М.Ф. [6] – } \sigma_d = \sigma_r \left(e^{\mu \frac{(x-l) \sin^2 \alpha}{r \cos \alpha}} - 1 \right);$$

$$\text{Сергєєв С.Т. [7-9] – } \sigma_d = \sigma_r \left(e^{\frac{1}{\rho} - (x-l)} - 1 \right);$$

$$\text{Бенойт Дж. [1] – } \sigma_d = \sigma_r \left(e^{\mu \frac{\delta}{2} \sin \alpha} - 1 \right), \sigma_d = \pm \mu \frac{\delta}{2} \sigma_r \cdot \sin \alpha;$$

$$\text{Ісааксен І. [1] – } \sigma_d = \mu \sigma_r \pi \sin \alpha;$$

$$\text{Ернст У. [1] – } \sigma_d = \sigma_r \left(e^{\mu \sin \alpha \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right)} - 1 \right);$$

$$\text{Лейдер [1] – } \sigma_d = \sigma_r \left(e^{\mu \varphi \sin \alpha} - 1 \right);$$

$$\text{Шмідт К. [10] – } \sigma_d = \sigma_r \left(e^{\mu \sin \alpha (\varphi_0 - \varphi)} - 1 \right),$$

де e – основа натурального логарифма;

R – радіус блоку або барабану;

r – радіус каната;

α – кут звивки дротів каната;

μ – коефіцієнт тертя між дротом і осердям;

φ_0 та φ – початковий і поточний полярні кути в перерізі каната;

ρ – радіус кривизни осі згину каната на блоці або барабані;

l – довжина перехідної ділянки, на якій відбувається загасання додаткових напружень,

x – координата вздовж осі каната, що відраховується від точки набігання.

Усі наведені вище формули придатні тільки для спіральних канатів.

Порівняння значень додаткових напружень, отриманих розрахунковим способом і отриманих експериментальним шляхом Нікітіним І.Ф., наведено на Рис. 1.

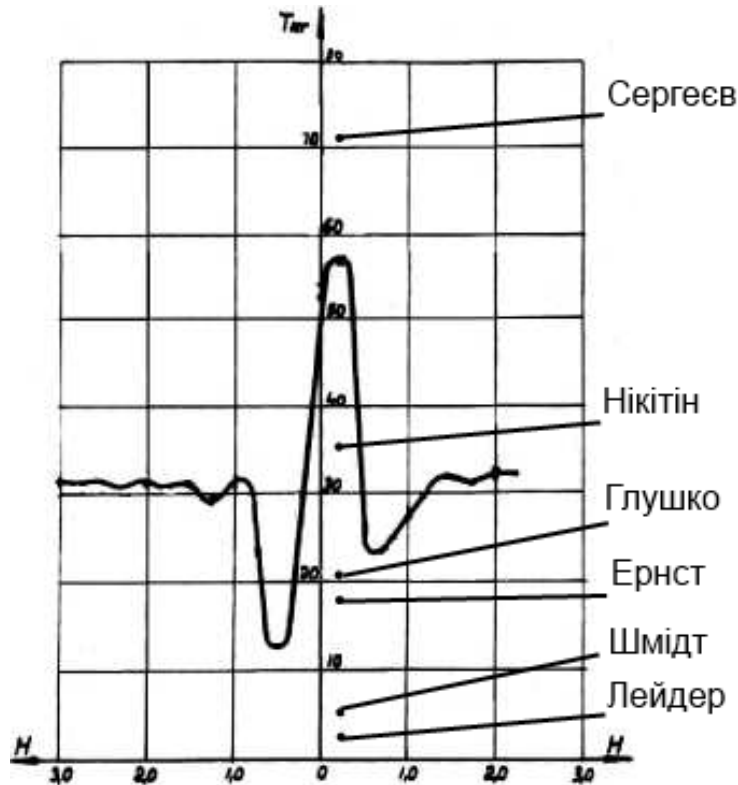


Рис. 1 – Порівняння значень додаткових напружень, отриманих розрахунковим способом і отриманих експериментальним шляхом

Розглянемо наявні експериментальні методи визначення напружень. Слід відзначити, що в чистому вигляді ці напруження визначав Нікітін І.Ф. [3, 4], який застосовував спеціальні П-подібні тензорезистори, що дозволили вимірювати деформації діаметрально протилежних пасм дротів і таким чином виключити вплив вигину і скручування Рис. 2.

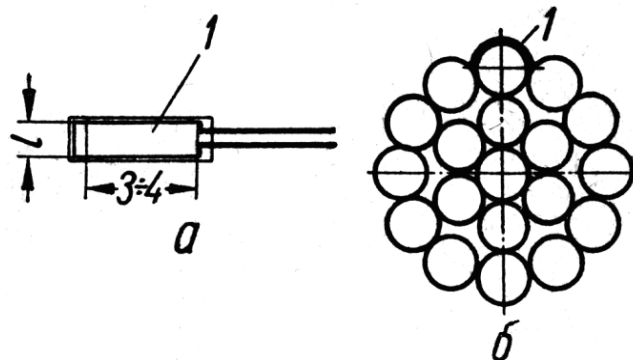


Рис. 2 – Досліджуваний канат в експериментах Нікітіна І.Ф.
 а) П-подібний тензорезистор; б) спосіб установки тензорезистора на канат

Для дослідів був обраний спіральний канат точкового дотику конструкції 1+6+12 діаметром 6 мм, $\delta_1 = 1,2$ мм, $\delta_2 = 1,2$ мм, $h_1 = 46$ мм, $h_2 = 65$ мм. На випробовуваний зразок каната наклеювалися від чотирьох до семи датчиків.

Навішування каната проводилось так, щоб датчики в момент набігання каната на блок знаходилися з боку випуклості.

Як бачимо з осцилограм, Рис. 3, максимальні додаткові напруження $\max \sigma_d$ при $D/d = 25$ складають (0,80-0,87) σ_r а при $D/d = 44$ і тих же навантаженнях – (0,58-0,70) σ_r . Тут σ_r – напруження розтягу дроту в прямій гілці каната.

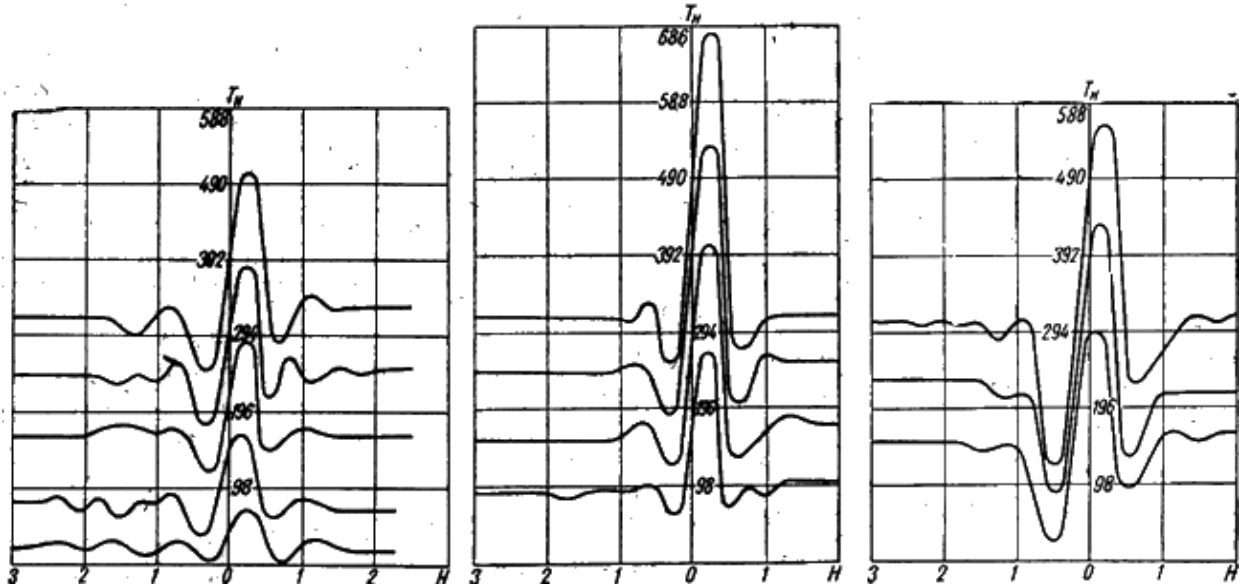


Рис. 3. – Осцилограми додаткових напружень в дослідженнях Нікітіна І.Ф.

Інші дослідники наклеювали тензодатчики на зовнішнє пасмо дротів на випуклому боці каната і вимірювали таким чином сумарні напруження розтягу і вигину, одержуючи осцилограми типу наведених на Рис. 4.

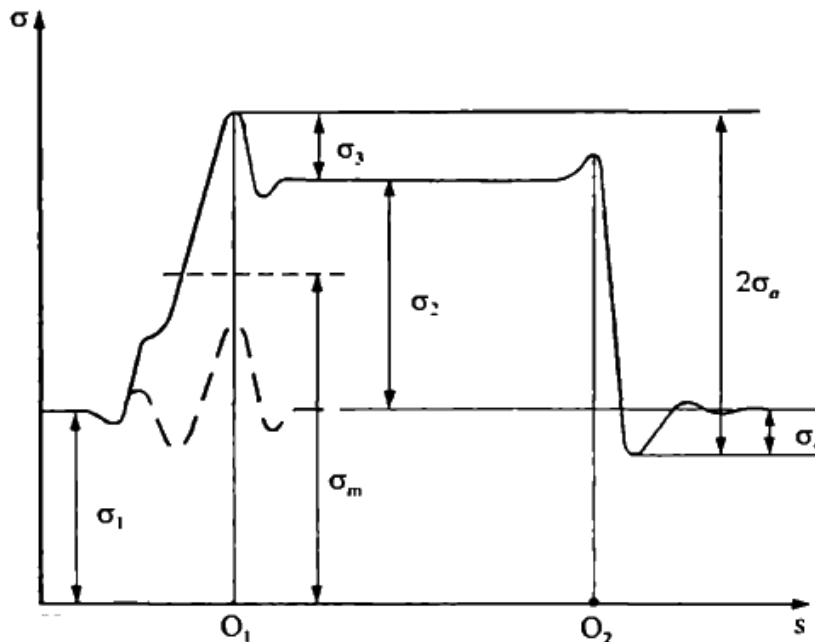


Рис. 4. – Осцилограма нормальних напружень в волокні каната при обгинанні циліндричної поверхні

Так чинили Вік [1] та Шиффнер Г. [10]. Типова осцилограма для зовнішнього дроту каната 6x19(1+9+9)+о.с. діаметром 35,7 мм при співвідношенні $D/d=28,8$ з роботи [10] наведена на Рис. 5. У цій же роботі досліджувалася залежність величини піку нормальних напружень у точці набігання $\sigma_3 = \max \sigma_d$ від числа відпрацьованих циклів. Встановлено, що на початку випробувань $\max \sigma_d = (0,25 \div 0,3) \bar{\sigma}_r$, а в ході роботи каната відбувається збільшення цих напружень. Наприклад, при відпрацюванні канатом половини числа циклів до руйнування максимальні додаткові напруження становлять 40-60% від середніх

напружень розтягу при $\bar{\sigma}_r = 150$ Н/мм², 40-50% при $\bar{\sigma}_r = 300$ Н/мм² і 35-42% при $\bar{\sigma}_r = 600$ Н/мм². Автор пояснює таке збільшення $\max \sigma_a$ більшенням защемлення пасм в міжпасповому контакті в ході роботи каната.

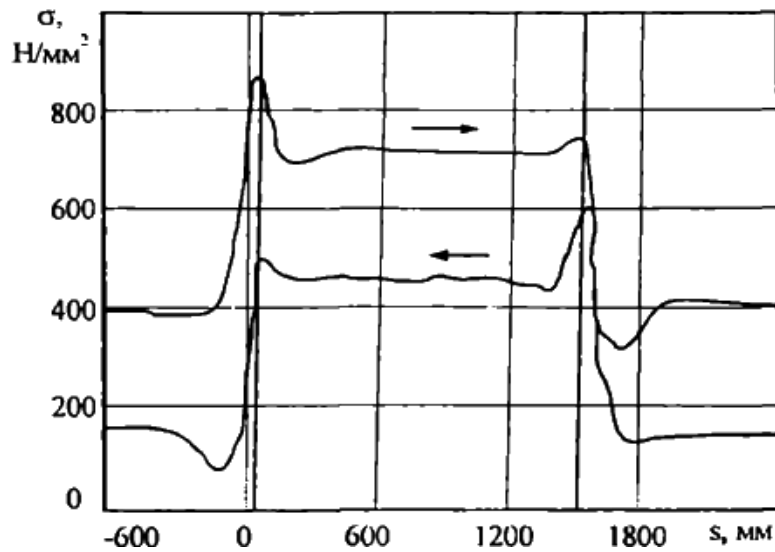


Рис. 5. – Типова осцилограма для зовнішнього дроту каната 6x19(1+9+9)+о.с. діаметром 35,7 мм при співвідношенні $D/d=28,8$.

Три серії експериментів з непрямого визначення додаткових напружень виконав Шмідт К. [10]. У першій серії він визначав момент внутрішнього конструкційного тертя при набіганні каната на блок і збіганні з нього, для чого в дослідах вимірювалися різниці плечей жорсткості. Потім за чисельним значенням моменту тертя розрахунковим шляхом визначалися додаткові напруження.

У другій серії дослідів канат піддавався хвилеподібному вигину шляхом поперечного прикладання навантаження через систему рухомих і нерухомих роликів, при цьому вимірювався прогин каната в процесі навантаження і розвантаження, і по різниці між ними також розрахунковим шляхом визначалися додаткові напруження.

У третій серії проводилися дослідів з визначення втомної міцності при знаковмінному вигині на блоках в області малоциклової втоми, тобто при навантаженнях близьких до руйнівних. Для цього на блоках випробовувалися окремо дріт, пряжка і канати, які були виготовлені з такого ж дроту, будувалися криві втомної міцності $N(\bar{\sigma}_r)$, а потім по зсуву між кривими визначалися додаткові напруження в пряжці і в канаті в порівнянні з окремим дротом. Як і інші автори, Шмідт К. при постановці і обробці своїх дослідів виходив з припущення, що додаткові напруження повністю формуються силами тертя ковзання між дротами при їх відносному зсуві. Зрозуміло, що така постановка не враховує цілий ряд інших факторів.

Оцінка результатів проводилася за подвійною амплітудою коливань напружень $2\sigma_a$ в дроті при потраплянні його на випуклу і ввігнуту сторони каната. Узагальнюючи результати всіх дослідів, Шмідт робить висновок, що величина $2\sigma_a$ при якісному змащенні під час вигину на блоках в області кранових співвідношень D/d становить 40-60% від величини середнього напруження розтягу для канатів 6x7+о.с., 80-120% для канатів ТК 6x19 + о.с. і 120-160% для канатів ТК 6x37 + о.с.. При неякісному змащенні або наявності корозії наведені значення можуть збільшуватися вдвічі. Менші значення відповідають канатам односторонньої звивки, а більші - хрестовій, що суперечить результатам інших дослідників [11].

В досліджах Нікітіна І.Ф. [3, 4] зі спіральними канатами встановлено, що пік зміщений від точки набігання на чверть кроку звивання каната в бік зігнутої на блоці ділянки. У дослідженнях інших дослідників [10] з канатами подвійної звивки пік напружень відноситься до точки набігання, хоча не вказується, як саме визначалася його координата. З огляду на механіку формування перехідної ділянки є підстави вважати, що і в канатах подвійної звивки пік напружень зміщений на чверть кроку звивки відносно точки набігання, але в відомих досліджах на це, можливо, не було звернено увагу.

Висновки

Провівши порівняльний аналіз теоретичних підходів до дослідження додаткових напружень в елементах сталевих канатів при набіганні на блоки та барабани, можна зробити висновок, що існуюча практика визначення додаткових напружень, які виникають у канаті при набіганні його на шків або барабан, дуже далека від результатів, отриманих експериментально. Багато авторів, крім Нікітіна І.Ф. і Сергєєва С.Т., навіть не враховують у розрахунку діаметр шківа, що збільшує його наближеність та точність. А аналіз експериментальних підходів свідчить про наявність різних підходів, які потребують узагальнення та подальшого розвитку і впровадження у вигляді комплексного експериментального дослідження.

Список використаних джерел:

1. Малиновский В. А. Стальные канаты. Ч. 1: Некоторые вопросы технологии, расчета и проектирования / В. А. Малиновский. – Одесса : Астропринт, 2001. – 188 с.
2. Малиновский В. А. Стальные канаты. Ч. 2: Основы теории изгиба и взаимодействия с опорной поверхностью / В. А. Малиновский. – Одесса : Астропринт, 2002. – 180 с.
3. Никитин И. Ф. Дополнительные усилия при переходе каната из прямого в изогнутый / И. Ф. Никитин // Стальные канаты, вып. 4 / И. Ф. Никитин. – Киев : Изд-во Техника, 1967. – С. 81–84.
4. Никитин И. Ф. Распределение напряжений в канате при пробегании его по блоку / И. Ф. Никитин // Стальные канаты, вып. 3 / И. Ф. Никитин. – Киев : Изд-во Техника, 1966. – С. 130–139.
5. Никитин И. Ф. Процесс формирования изогнутого каната при набегании его на шкив / И. Ф. Никитин, Н. Н. Фидровская // *Машинобудування* : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2009. – Вип. 4. – С. 46–52.
6. Глушко М. Ф. Стальные подъемные канаты / М. Ф. Глушко. – Одесса : Астропринт, 2013. – 327 с. – (Репр. изд).
7. Сергеев С. Т. Теоретическое исследование переходных процессов при набегании каната на блок / С. Т. Сергеев // Стальные канаты, вып. 1 / С. Т. Сергеев. – Киев : Техника, 1964. – С. 108–115.
8. Сергеев С. Т. Фактические усилия в элементах набегающего на блок каната / С. Т. Сергеев // Стальные канаты, вып. 2 / С. Т. Сергеев. – Киев : Техника, 1965. – С. 116–121.
9. Сергеев С. Т. Оценка влияния радиуса кривизны набегающей на блок ветви каната в переходном процессе / С. Т. Сергеев // Стальные канаты, вып. 2 / С. Т. Сергеев. – Киев : Техника, 1965. – С. 181–185.
10. Schmidt K. Die sekundäre Zugbeanspruchung der Drahtseile aus der Biegung / K. Schmidt // VDI. – 1965. – № 13. – pp. 181–184.
11. Schiffner G. Spannungen in Laufenden Drahtseilen Dissertation / G. Schiffner ; Universitat Stuttgart. – Stuttgart, 1986. – 173 p.

References:

1. Malinovskiy, VA 2001, *Stal'nyye kanaty. Ch. 1: Nekotoryye voprosy tekhnologii, rascheta i proyektirovaniya [Steel Ropes. Part 1: Some Issues of Technology, Calculation and Design]*, Astroprint, Odessa.
2. Malinovskiy, VA 2002, *Stal'nyye kanaty. Ch. 2: Osnovy teorii izgiba i vzaimodeystviya s opornoj poverkhnost'yu [Steel Ropes. Part 2: Fundamentals of Bending Theory and Interaction with the Support Surface]*, Astroprint, Odessa.
3. Nikitin, IF 1967, "Dopolnitel'nyye usiliya pri perekhode kanata iz pryamogo v izognuty" [*Additional Efforts in the Transition of the Rope from Straight to Curved*], *Stal'nyye kanaty*, iss 4, Pp. 81-84.
4. Nikitin, IF 1966, "Raspredeleniye napryazheniy v kanate pri probeghanii yego po bloku" [*Stress Distribution in a Rope Running over a Block*], *Stal'nyye kanaty*, iss 3, pp. 130-139.
5. Nikitin, IF & Fidrovskaya, NN 2009, "Protseess formirovaniya izognutogo kanata pri nabeganii yego na shkiv" [*The Process of Forming a Curved Rope When Running onto a Sheave*], *Mashynobuduvannya*, iss 4, Pp. 46-52.

6. Glushko, MF 2013, *Stal'nyye pod'yemnyye kanaty [Steel Hoisting Ropes]*, Astroprint, Odessa.
7. Sergeyev, ST 1964, "Teoreticheskoye issledovaniye perekhodnykh protsessov pri nabeganii kanata na blok" [*Theoretical Study of Transient Processes in Rope Running onto a Block*], *Stal'nyye kanaty*, iss 1, Pp. 108-115.
8. Sergeyev, ST 1965, "Fakticheskiye usiliya v elementakh nabegayushchego na blok kanata" [*Actual Forces in the Elements of a Rope Running onto a Block*], *Stal'nyye kanaty*, iss 2, Pp. 116-121.
9. Sergeyev, ST 1965, "Otsenka vliyaniya radiusa kriviny nabegayushchey na blok vetvi kanata v perehodnom protsesse" [*Evaluation of the Effect of the Radius of Curvature of the Rope Branch Running onto the Block in the Transient Process*], *Stal'nyye kanaty*, iss 2, pp. 181-185.
10. Schmidt, K 1965, "Die sekundare Zugbeanspruchung der Drahtseile aus der Biegung", *VDI*, iss 13, Pp. 181-184.
11. Schiffner, G 1986, "Spannungen in Laufenden Drahtseilen" [*Stresses in Running Wire Ropes*], Ph.D. thesis, Universitat Stuttgart.

Стаття надійшла до редакції 18 червня 2024 року.