

УДК 621.86.065

А.Б. Хіхловський, канд. техн. наук, доц.,
В.О. Курган, спеціаліст,
Одес. нац. політехн. ун-т

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНОЇ ВІДДАЧІ ПІДЙОМНИХ ЗАКРИТИХ КАНАТІВ ПІСЛЯ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ І НАСТУПНОЇ ВИТЯЖКИ

А.Б. Хіхловський, В.О. Курган. Дослідження пружної віддачі підйомних закритих канатів після їх виготовлення і наступної витяжки. Проведено дослідження напружень та внутрішніх силових чинників в елементах канатів закритої конструкції при їх виготовленні. Отримано формули для приблизного визначення дотичних та нормальних напружень в елементах закритого канату не круглого профілю: клиноподібних, зетоподібних та іксоподібних.

Ключові слова: канати закритої конструкції, напруження, внутрішні силові чинники.

А.Б. Хихловский, В.О. Курган. Исследование упругой отдачи подъемных закрытых канатов после их изготовления и вытяжки. Проведено исследование напряжений и внутренних силовых факторов в элементах канатов закрытой конструкции при их изготовлении. Получены формулы по приближенному определению касательных и нормальных напряжений в элементах закрытого каната некруглого профиля: клинообразных, зетообразных и иксообразных.

Ключевые слова: канаты закрытой конструкции, напряжения, внутренние силовые факторы.

A.B. Khikhlovsky, V.O. Kurgan. Investigation of elastic recoil of the closed hoist ropes after manufacture and the hood. The stress and internal force factors in the elements of the closed design ropes in their manufacture are investigated. Formulas are obtained for the approximate determination of shear and normal stresses in the elements of the closed rope of noncircular profile: wedge, Z- and X-shaped.

Keywords: closed design ropes, stress, internal force factors.

Відмінність закритих та напівзакритих канатів від інших їх видів полягає у застосуванні при їх звиванні дроту не тільки круглого, а і некруглого (клиноподібного, зетоподібного, вісімкоподібного та іксоподібного) перерізу, що дозволяє відтворити так званий ефект “замка” у вигляді щільного прилягання звитих дротин некруглого перерізу однієї до одної. Ця відмінність обумовлює формування між двома або трьома зовнішніми шарами каната замкнених порожнин по усій його довжині, наявність яких забезпечує надійний захист каната від проникнення в його середину вологи, агресивних розчинів і виходу мастила з каната назовні. Завдяки такій захищеності канати даної конструкції знаходять широке застосування у підйомно-транспортному обладнанні, що використовується в будіванні технічних споруд, суднобудуванні, ливарному і хімічному виробництвах, в гірничодобувному обладнанні, в конструкціях висотних споруд, радіо- і телевеж, а також мостів. Саме тому до канатів закритої конструкції пред’являють підвищені вимоги щодо їх надійності і довговічності.

Досвід виготовлення і експлуатації канатів закритої конструкції показує, що безпосередньо після звивання закритий канат, який являє собою пружно-пластичну систему, при першому ж навантаженні набуває значних подовжень, а його напружено-деформований стан істотно змінюється. Внаслідок цього, найчастіше при перших же циклах експлуатації каната з’являється ряд серйозних структурних дефектів (розшарування, поява “хвилі”, розриви дротів та ін.), що є причиною виходу ще нового каната з ладу [1, 2].

Щоб оцінити надійність каната і попередити появу вказаних дефектів, а також провести оцінку його міцності і довговічності, необхідно знати напружено-деформований стан його

складових елементів, як у процесі його виготовлення, так і після першого осьового навантаження. Встановлено, що при звиванні каната закритої конструкції фасонні дроти зазнають разом з вигином і деформацію кручення, а потім при витяжці в процесі експлуатації деформацію розтягування. У цьому випадку фасонні дротини зазнають складного навантажування з супутнім поворотом осей тензора напружень. Слід зазначити, що вигин фасонних дротів деяких профілів є косим [3, 4]. Так, наприклад, при звиванні зетоподібних і вісімкоподібних дротин площина згинального моменту, що містить в собі нормаль гвинтової лінії, не збігається з головною віссю перерізу дроту y_0 або z_0 (рис. 1). Ці дротини відчувають косий вигин, а дроти круглого, іксоподібного і клиноподібного профілів зазнають плоского вигину. Таким чином, матеріал дротів піддається складному навантаженню, завдання аналізу якого існуючі теорії пластичності не вирішують. Відомі розробки деяких методик для вирішення цього завдання, але за цими методиками можна отримати лише локальні рішення, що відповідають жорстко обумовленим параметрам [1, 2, 5].

Таким чином, дослідження технологічних напружень і внутрішніх силових чинників в фасонних дротах закритих канатів у загальній формі являє собою актуальне науково-прикладне завдання.

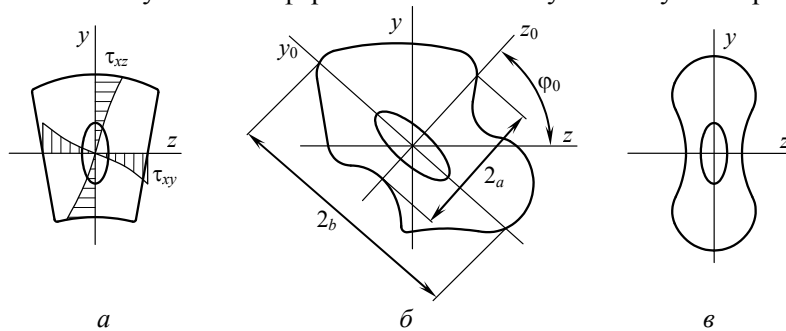


Рис. 1. Перерізи фасонних дротин закритих канатів: клиноподібний симетричний (а); зетоподібний несиметричний (б); вісімкоподібний симетричний (в)

Враховуючи складність поставленого завдання аналізу технологічних напружень і внутрішніх силових чинників в фасонних дротинах закритих канатів, дослідження запропоновано проводити щодо наближеного його розв'язання при загальному припущенні, що матеріал дротин ідеальний — пружно-пластичний, а весь поперечний переріз дротин охоплений пружно-пластичною деформацією.

Розглянемо напруження в пружній області поперечного перерізу дроту каната і визначимо його межу. Нормальне напруження від згину визначається:

— для фасонних поперечних перерізів симетричних відносно площини згину xy (клиноподібних, вісімкоподібних) дротів каната (рис. 1, а і в) за виразом

$$\sigma_{x,y}^{\text{зг}} = E\chi y, \quad (1)$$

де $\sigma_{x,y}^{\text{зг}}$ — нормальне напруження від згину;

$\chi = \sin^2 \alpha / R$ — кривизна осьової лінії дроту;

R — радіус кручення дроту;

E — модуль Юнга;

— для несиметричних фасонних перерізів (зетоподібних) дротин каната (рис. 1, б) за виразом

$$\sigma_{x,y}^{\text{зг}} = E\chi(z_0 \sin \psi + y_0 \cos \psi), \quad (2)$$

де z_0 і y_0 — головні центральні осі дроту.

На рисунку 1, б φ_0 — полярний кут, який відраховують від головної центральної осі z_0 .

Аналізуючи епюри дотичних напружень при крученні некруглих стержнів, для яких отримані точні розв'язки, можна відмітити, що вони мають незначну нелінійність (рис. 1, а). Ця нелінійність

тим менша, чим більша пологість окреслення профілю дроту, а для еліптичних та круглих форм поперечних перерізів дротин характер зміни дотичних напружень по перерізу є лінійним.

Ця обставина дає право прийняти декілька додаткових припущень. По-перше, для плавно окреслених профілів перерізів фасонних дротин закритого каната зсуви γ_{xy} і γ_{xz} з достатньо вірогідним наближенням можуть бути розраховані за лінійними функціями координат z і y (рис. 2). Функції координат для цього випадку

$$\begin{cases} \gamma_{xy} = \frac{\gamma_A}{a} z, & 0 \leq z \leq a; \\ \gamma_{xz} = \frac{\gamma_B}{b} y, & 0 \leq y \leq b, \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = -\frac{b}{a}, \quad (4)$$

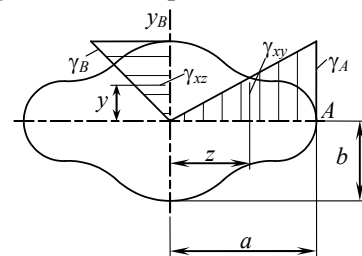


Рис. 2. Плавно окреслений профіль перерізу фасонної дротини

де a і b — відрізки на головних осях поперечного перерізу дротини.

По-друге, крутний момент в поперечному перерізі дроту з плавно окресленим профілем визначається виразом

$$M_x = \int_F (\tau_{xy} z - \tau_{xz} y) \cdot dF = G \int_F (\gamma_{xy} z - \gamma_{xz} y) \cdot dF, \quad (5)$$

де τ_{xy} , τ_{xz} — проекції повного напруження на відповідні площини;

G — модуль пружності при зсуві.

Підставимо формулу (3) в вираз (5) і, враховуючи рівність (4), отримуємо

$$\begin{cases} \tau_{xy} = \frac{b^2 M_x}{a^2 I_z + b^2 I_y} z; \\ \tau_{xz} = -\frac{a^2 M_x}{a^2 I_z + b^2 I_y} y. \end{cases} \quad (6)$$

Повне дотичне напруження

$$\tau_{кр} = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2} = \frac{M_x}{a^2 I_x + b^2 I_y} \sqrt{b^4 z^2 + a^4 y^2}. \quad (7)$$

Кут закручування фасонних дротин визначається за формулою

$$\varphi = \frac{M_x l}{GI_k}, \quad (8)$$

де l — довжина ділянки;

I_k — момент інерції при чистому крученні з достатнім ступенем точності може бути визначеним за формулою Сен-Венана [6].

$$I_k = \frac{F^4}{4\pi^2 I_p}, \quad (9)$$

де F і I_p — площини і полярний момент інерції поперечного перерізу дроту, відповідно.

З формули (8) отримуємо

$$M_x = G \cdot I_k \cdot \frac{\varphi}{l}. \quad (10)$$

По-третє, момент пружної віддачі кожного шару дротів закритого каната з урахуванням виразу (1) визначено [1]

$$M_{кр}^{техн} = n \cdot [(1 + \cos^2 \alpha) \sin \alpha M_z + \cos^3 \alpha M_x],$$

де n — кількість дротин в кожному шарі;

α — кут звивання дротин;

M_z — момент згину відносно осі z поперечного перерізу кожної дротини;

M_x — крутний момент в поперечному перерізі кожної дротини.

На основі прийнятих припущень та проведених математичних досліджень напружень, які виникають в процесі виготовлення канатів, отримано спрощені формули для визначення згинаючих та крутних моментів в поперечних перерізах дротин закритого каната з урахуванням коефіцієнтів A_1 , B_1 , N_1 , N_2 , N_3 . Формули для їх визначення в полярній системі координат з початком в центрі тяжіння поперечного перерізу дроту отримані раніше [3].

При наближеному розв'язанні задачі отримано:

— для фасонних поперечних перерізів дротин, симетричних відносно площини згину xu (іксоподібних):

$$M_z = \sigma_T \cdot E \cdot \chi \cdot A_1,$$

$$C_1 = \frac{GI_k}{a^2 I_z + b^2 I_y}, \quad (11)$$

$$M_x = \sigma_T \cdot \Theta C_1 (a^2 A_1 + b^2 B_1),$$

де σ_T — умовна розрахункова межа плинності;

C_1 — коефіцієнт, який обумовлює залежність модуля пружності другого роду від осьових моментів інерції для симетричних фасонних поперечних перерізів дротин;

Θ — скрученість осьової лінії дроту;

— для несиметричних фасонних поперечних перерізів дротин (зетоподібних)

$$\begin{cases} M_{z_0} = \sigma_T E \chi (N_2 \cdot \sin \psi + N_3 \cos \psi); \\ M_{y_0} = \sigma_T E \chi (N_2 \cdot \cos \psi + N_1 \sin \psi), \end{cases}$$

$$C_2 = \frac{GI_k}{a^2 I_{z_0} + b^2 I_{y_0}},$$

$$M_x = \sigma_T \cdot \Theta C_2 (b^2 N_1 + a^2 N_3),$$

де ψ — кут, який визначає положення головних центральних осей інерції перерізу відносно осі, перпендикулярної до площини згину дроту;

C_2 — коефіцієнт, що обумовлює залежність модуля пружності другого роду від осьових моментів інерції для несиметричних фасонних поперечних перерізів дротин;

I_{z_0} , I_{y_0} , I_z , I_y — головні центральні моменти інерції поперечного перерізу дроту.

$$\begin{cases} A_1 = \frac{2}{3\sqrt{b_2}} \int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} \left(\frac{\cos^2 \varphi \rho_i^3(\varphi)}{\sqrt{1-l^2 \sin^2 \varphi}} \right) d\varphi; \\ B_1 = \frac{2}{3\sqrt{b_2}} \int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} \left(\frac{\sin^2 \varphi \rho_i^3(\varphi)}{\sqrt{1-l^2 \sin^2 \varphi}} \right) d\varphi, \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} N_1 = \frac{1}{3} \int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} \left(\frac{\cos^2 \varphi}{\Delta(\varphi)} \cdot \rho_i^3(\varphi) \right) d\varphi; \\ N_2 = \frac{1}{6} \int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} \left(\frac{\sin^2 \varphi}{\Delta(\varphi)} \cdot \rho_i^3(\varphi) \right) d\varphi; \\ N_3 = \frac{1}{3} \int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} \left(\frac{\sin^2 \varphi}{\Delta(\varphi)} \cdot \rho_i^3(\varphi) \right) d\varphi, \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{де } \begin{cases} b_2 = E^2 \chi^2 + 3C^2 a^4 \Theta^2; \\ l^2 = \frac{d_2}{b_2} - 1; \\ d_2 = 3C^2 b^4 \Theta^2. \end{cases} \quad (14)$$

Отримані результати можуть бути порівняні з коефіцієнтами A_0 , B_0 і C_0 , які характеризують ступінь пластичної деформації при одноосному навантаженні (розтягуванні) і мають таку саму інтенсивність, як і при складному навантаженні.

$$\begin{cases} \Delta(\varphi) = \sqrt{A_0 \cos^2 \varphi + 0,5 B_0 \sin 2\varphi + C_0 \sin^2 \varphi}; \\ A_0 = (E\chi \sin \psi)^2 + 3C_2^2 b^4 \Theta^2; B_0 = E^2 \chi^2 \sin 2\psi; \\ C_0 = (E\chi \cos \psi)^2 + 3C_2^2 a^4 \Theta^2, \end{cases} \quad (15)$$

де φ та $\rho_i(\varphi)$ — плинний полярний кут і радіус-вектор точок контурної лінії перерізу;
 $\Delta(\varphi)$ — приріст плинного полярного кута;

A_0 , C_0 , — характеризують ступінь пластичної деформації при одноосному навантаженні (розтягуванні).

Подальше дослідження пружної віддачі після витяжки закритого каната з використанням виразів (3) і (4) свідчить, що напружено-деформований стан складових елементів закритих канатів змінюється, при цьому проходить перерозподіл напружень в поперечних перерізах дротин, і момент пружної віддачі каната в цілому зменшується, що значно поліпшує умови його експлуатації і збільшує строк служби.

Основним критерієм, що обумовлює зміну моменту пружної віддачі, є симетричність або несиметричність фасонного перетину дроту. Щоб оцінити вплив витяжки на величину моменту пружної віддачі каната, проведено порівняльний аналіз отриманих результатів експерименту, в результаті якого спостерігалась значна різниця в розподілі зусиль по шарах не витягнутого і попередньо витягнутого каната при наступному номінальному навантаженні.

Розрахунки технологічних внутрішніх силових чинників в поперечних перерізах дротин і моментів пружної віддачі по шарах каната дають можливість не тільки оцінити ступінь технологічної невірноваженості каната, але й раціонально вибрати напрями звивання по шарах, в результаті чого зменшити момент пружної віддачі і забезпечити надійність та довговічність структури каната в процесі його роботи.

Література

1. Козлов, В.Т. Экспериментальное исследование моментов упругой отдачи закрытых канатов / В.Т. Козлов // Стал. канаты: науч.-техн. сб. — К.: Техніка, 1969. — Вып. 6. С. 45 — 49.
2. Козлов, В.Т. Исследование свивочных напряжений и внутренних силовых факторов в канатах закрытой конструкции / В.Т. Козлов, П.М. Калиниченко // Стал. канаты: науч.-техн. сб. — К.: Техніка, 1968. — Вып. 5. С. 71 — 75.
3. Калиниченко, П.М. Упругая отдача подъемных закрытых канатов после свивки и витяжки / П.М. Калиниченко, А.Б. Хихловский // Стал. канаты: науч.-техн. сб. — К.: Техніка, 1971. — Вып. 6. — С. 45 — 50.

4. Арутюнян, Н.Х. Кручение упругих тел / Н.Х. Арутюнян, Б.Л. Абрамян. — М.: Физматгиз, 2003. 686 с.
5. Козлов, В.Т. Технологическое уравнивание закрытых канатов / В.Т. Козлов, П.М. Калинин // Стал. канаты: науч.-техн. сб. — К.: Техніка, 1970. — Вып. 7. — С. 63 — 70.
6. Сен-Венан. 5-й Мемуар о кручении призм. — М.: Физматгиз, 2001. — 519 с.

References

1. Romanina, A.L. Vozdeystvie elektrostantsiy na okruzhayushchuyu sredu [The impact of power plants on the environment] / A.L. Romanina. — St. Petersburg, 2004.
2. Noskov, A.S. Vozdeystvie TES na okruzhayushchuyu sredu i sposoby snizheniya nanosimogo ushcherba (tekhnologicheskie aspekty) [The impact of thermal power plants on the environment and the ways to reduce the damage (technological aspects).] / A.S. Noskov, M.A. Savinkina, L.Ya. Anishchenko. — Novosibirsk 1990. — 177 p.
3. Shpirt M.Ya. Bezotkhodnaya tehnologiya. Utilizatsiya otkhodov dobychi i pererabotki tverdykh goryuchikh iskopaemykh [Waste-free technology. Utilization of wastes of mining and processing of solid combustible minerals] / M.Ya. Shpirt. — Moscow, 1986.
4. Kizil'shteyn L.Ya. Komponenty zol i shlakov TES [Components of ashes and slags of TPP] / L.Ya. Kizil'shteyn, N.V. Dubov, A.L. Shpitsgluz. — Moscow, 1993.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-ту Яглинський В.П.

Надійшла до редакції 16 липня 2013 р.