

# Робота на здобуття премії Президента України для молодих учених в 2024 році



## Технології швидкого відновлення зруйнованих конструкцій, будівель і споруд

---

**Автор:**

**ОНИЩЕНКО Сергій Валерійович** - кандидат технічних наук,  
доцент кафедри механічної та біомедичної інженерії  
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»



# АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

- ❖ **Відбудова** зруйнованих внаслідок воєнних дій **конструкцій, будівель і споруд** є важливою складовою **обороздатності** та **відновлення економіки** країни.
- ❖ **Житлові, промислові та логістичні об'єкти** потребують **раціональних та ефективних рішень** щодо їх швидкого введення в експлуатацію.
- ❖ Перспективним напрямком відновлення зруйнованої інфраструктури є технології, в яких використовуються **сучасні композитні матеріали**, наприклад, **еластомерно-тросові ванти** для **утримання сталезалізобетонних конструкцій**.
- ❖ Перевага таких технологій у **суттєво меншій металомісткості** за рахунок застосування вантової системи їх підвішування. Це **зменшує вартість відновлення** або зведення споруди.
- ❖ **Тривала експлуатація** таких виробів у індустрії **показала їх значну довговічність та високу надійність**.
- ❖ Досягається **можливість створення та виготовлення** широкого спектру структурно-ортотропних **композитних вантових канатів** різної тягової спроможності для **забезпечення необхідної несучої здатності** відбудованих конструкцій і споруд.



**Рис. 1 – Зруйнований міст**

**Розробка технологій швидкого відновлення зруйнованих внаслідок воєнних дій конструкцій, будівель і споруд на основі обґрунтування науково-прикладних засад створення та застосування структурно-ортотропних композитних вантових канатів (СОКВК), є актуальною науково-технічною проблемою, розв'язання якої виконано в роботі**



# ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧІ РОБОТИ

## ❖ Об'єкт дослідження

Технології відновлення зруйнованих внаслідок воєнних дій конструкцій, будівель і споруд із використанням композитних структурно-ортотропних елементів утримування.

## ❖ Предмет дослідження

Закономірності силової взаємодії багатопараметричних структурних складових конструкцій, будівель і споруд вантового типу.

## ❖ Мета роботи

створення і впровадження технологій відновлення зруйнованих внаслідок воєнних дій конструкцій, будівель і споруд країни на основі обґрунтування науково-прикладних засад використання структурно-ортотропних композитних елементів утримування та встановлення закономірностей силової взаємодії їх складових частин.

## ❖ Задачі дослідження

- побудова моделей структурно-ортотропних композитних вантових канатів як несучих елементів відбудованих інфраструктурних об'єктів;
- дослідження розривів неперервності елементів армування структурно-ортотропних композитних вантових канатів;
- дослідження впливу розташування розривів елементів армування закріпленої на споруді композитної ванти на її напружено-деформований стан;
- встановлення впливу нелінійності деформування складових ванти на її напружено-деформований стан;
- дослідження способу інструментального контролю розривів елементів армування композитної ванти;
- обґрунтування науково-прикладних засад використання структурно-ортотропних композитних елементів утримування конструкцій, будівель і споруд задля створення технологій їхнього швидкого відновлення.



# НАУКОВА НОВИЗНА

- ❖ В роботі отримано залежності та закономірності напружено-деформованого стану нового технічного об'єкту - структурно-ортотропного композитного вантового канату, що **дозволило досягнути практичного результату**, який полягає в **обґрунтуванні технологій утримання відбудованих конструкцій і споруд** з використанням композитних тягових органів. Встановлено закономірності напружено-деформованого стану (НДС) СОКВК із порушеною структурою та за нелінійно залежного від деформації модуля зсуву еластомера.
- ❖ **Розроблено алгоритм розрахунку НДС багат шарового тягового органа** із комплексним урахуванням його конструкції, механічних властивостей його складових з ушкодженим довільним елементом армування.
- ❖ **Встановлено характер впливу розташування цілих тросів між ушкодженими** у композитному тягово-несучому органі на максимальні сили розтягу тросів та дотичні напруження в еластичних прошарках між елементами армування.
- ❖ **Встановлені у замкненій формі аналітичні залежності величини електричного струму (опору)** дозволяють в автоматичному режимі аналізувати отримані значення електричних опорів, **визначати появу розриву будь-якого елемента армування** вантового каната.

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Поставлені завдання розв'язувались шляхом виконання комплексу досліджень із застосуванням **апробованих аналітичних та чисельних методів**, побудованих на положеннях **механіки пружного тіла та композитних матеріалів**, для розрахунку напружено-деформованого стану композитних виробів, армованих системою паралельних елементів.



# ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ

- ❖ Транспортна інфраструктура
- ❖ Промислові будівлі
- ❖ Цивільні споруди та конструкції

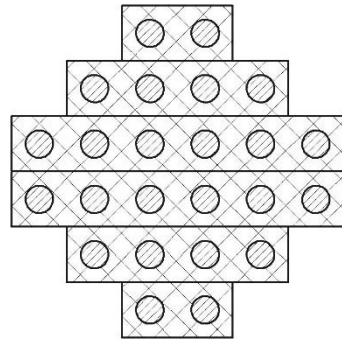


Рис. 2 – Багатошарова ванта необхідної тягової спроможності, складена із композитних еластомерно-тросових канатів



Рис. 3 – Вантовий міст



Рис. 4 – Лінія з виробництва еластомерно-тросових канатів у м. Кривий Ріг

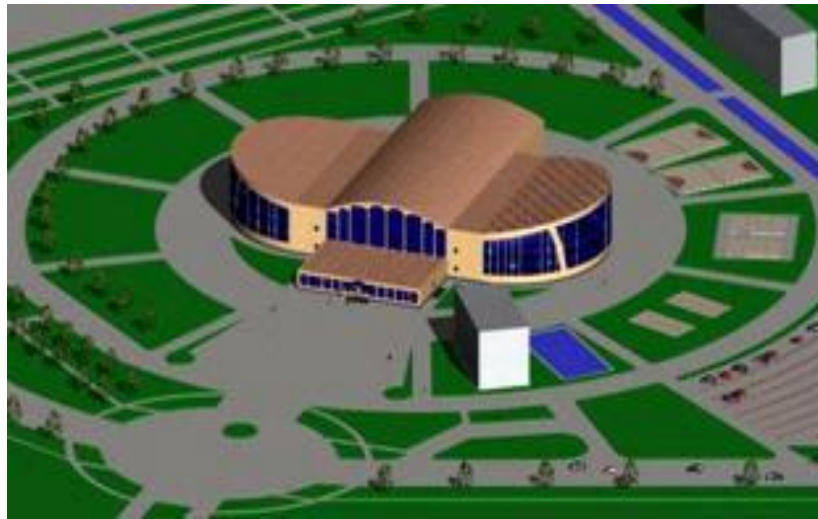


Рис. 5 – Будівля з циліндрично-плитовантовим покриттям (без анкерних опор)

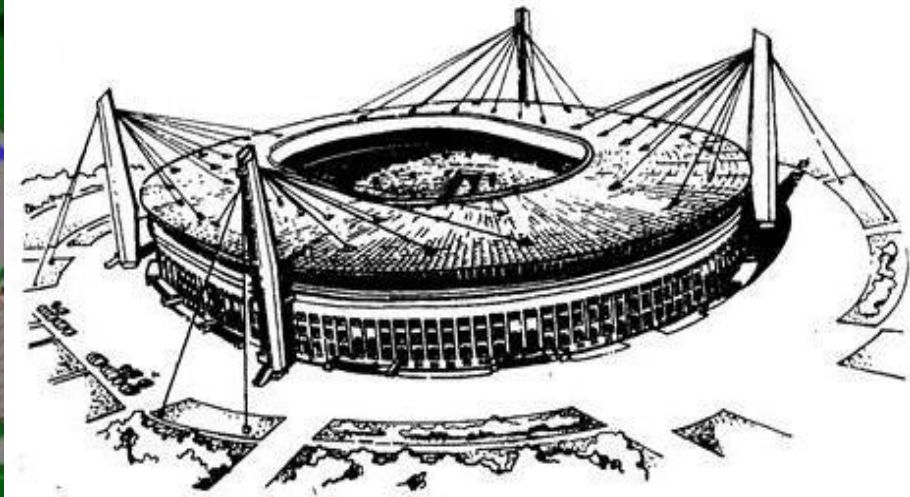


Рис. 6 – Покриття споруди, що утримується анкерними опорами



# ПОБУДОВА МОДЕЛІ КОМПЗИТНОГО ВАНТОВОГО КАНАТА

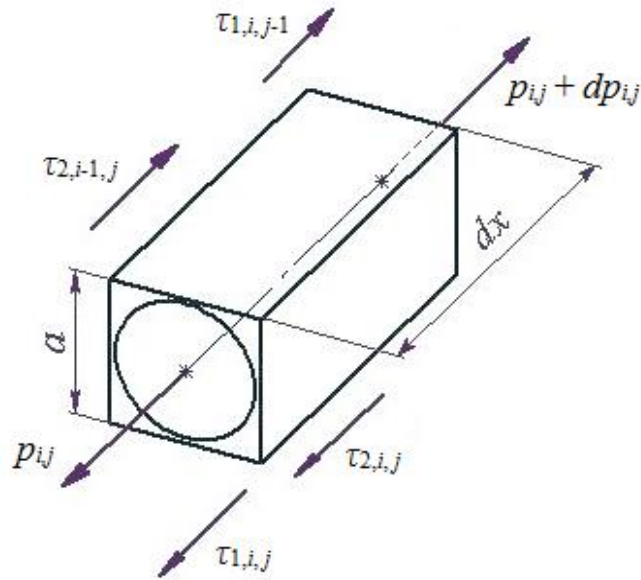


Рис. 7 – Частина матриці малої довжини композиту з волокнами укладеними з кроком  $a$

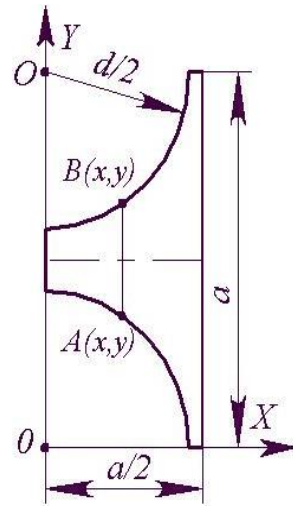


Рис. 8 – Форма частини матриці еластичної оболонки

- ❖ Отрото́пний композит багатосарової конструкції;
- ❖ **Крок укладання** для системи регулярно розташованих волокон  $a$ ;
- ❖ Кількість шарів волокон  $N$ . Номери шарів  $j$  (від 1 до  $N$ );
- ❖ В кожному шарі –  $M$  волокон. Номери волокон  $i$  (від 1 до  $M$ );
- ❖ Вісь  $x$  паралельно волокнам;
- ❖ Умовно вирізана частина призматичної форми довільного  $i,j$ -того волокна разом з матрицею малої довжини  $dx$  (Рис. 7).

**Умова рівноваги** частини матриці з урахуванням лінійного закону Гука при розтягу у формі однорідної системи рівнянь

$$\frac{d^2 u_{i,j}}{dx^2} + \frac{G k_G a}{E F (a-d)} (u_{i,j-1} - 4u_{i,j} + u_{i,j+1} + u_{i-1,j} + u_{i+1,j}) = 0. \quad (1)$$

Прийнята форма рішення однорідної системи рівнянь (1) у вигляді переміщень довільного  $i,j$ -того волокна композита.

$$u_{i,j} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[ e^{\beta_{m,n} x} \cos(\mu_m (i-0,5)) \cos(\chi_n (j-0,5)) + e^{\beta_{m,n} x} \cos(\mu_m (i-0,5)) + e^{\beta_{m,n} x} \cos(\chi_n (j-0,5)) \right] + \frac{P x}{E F} + \delta,$$

де  $\mu_m = \frac{\pi m}{M}$  ;  $\chi_n = \frac{\pi n}{N}$  ;  $P$  – середнє значення зовнішнього зусилля, прикладеного до композиту вздовж його волокон;  $\delta$  – переміщення композитної конструкції як жорсткого тіла.



# РОЗВ'ЯЗАННЯ МОДЕЛІ КОМПЗИТНОГО ВАНТОВОГО КАНАТА

Переміщення волокон орторопного тягового органа регулярної будови в загальній формі

$$u_{i,j} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \left( A_{m,n} e^{\beta_{m,n} x} + B_{m,n} e^{-\beta_{m,n} x} \right) \cos(\mu_m (i-0,5)) \cos(\chi_n (j-0,5)) + \sum_{m=1}^M \left( A_{m_m} e^{\beta_{m_m} x} + B_{m_m} e^{-\beta_{m_m} x} \right) \cos(\mu_m (i-0,5)) + \sum_{n=1}^N \left( A_{n_n} e^{\beta_{n_n} x} + B_{n_n} e^{-\beta_{n_n} x} \right) \cos(\chi_n (j-0,5)) + \frac{P x}{E F} + \delta, \quad \text{де } A_{m,n}, B_{m,n}, A_{m_m}, B_{m_m}, A_{n_n}, B_{n_n} - \text{масиви коефіцієнтів} \quad (2)$$

Усереднені значення дотичних напружень в еластомерній матриці

$$\tau_{1,i,j} = \frac{G k_G}{a-d} \left( \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \left[ \left( A_{m,n} e^{\beta_{m,n} x} + B_{m,n} e^{-\beta_{m,n} x} \right) \left( \cos(\mu_m (i-0,5)) \left( \cos(\chi_n (j-0,5)) - \cos(\chi_n (j-1,5)) \right) \right) \right] + \sum_{m=1}^M \left( A_{m_m} e^{\beta_{m_m} x} + B_{m_m} e^{-\beta_{m_m} x} \right) \cos(\mu_m (i-0,5)) + \sum_{n=1}^N \left( A_{n_n} e^{\beta_{n_n} x} + B_{n_n} e^{-\beta_{n_n} x} \right) \left( \cos(\chi_n (j-0,5)) - \cos(\chi_n (j-1,5)) \right) \right), \quad (3)$$

$$\tau_{2,i,j} = \frac{G k_G}{a-d} \left( \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \left[ \left( A_{m,n} e^{\beta_{m,n} x} + B_{m,n} e^{-\beta_{m,n} x} \right) \left( \left( \cos(\mu_m (i-0,5)) - \cos(\mu_m (i-1,5)) \right) \cos(\chi_n (j-0,5)) \right) \right] + \sum_{m=1}^M \left[ \left( A_{m_m} e^{\beta_{m_m} x} + B_{m_m} e^{-\beta_{m_m} x} \right) \cos(\mu_m (i-0,5)) - \cos(\mu_m (i-1,5)) \right] + \sum_{n=1}^N \left( A_{n_n} e^{\beta_{n_n} x} + B_{n_n} e^{-\beta_{n_n} x} \right) \cos(\chi_n (j-0,5)) \right), \quad (4)$$

Внутрішні сили навантаження довільного  $i, j$ -того волокна композита.

$$P_{i,j} = \frac{1}{E F} \left( \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \left[ \left( A_{m,n} e^{\beta_{m,n} x} - B_{m,n} e^{-\beta_{m,n} x} \right) \beta_{m,n} \cos(\mu_m (i-0,5)) \cos(\chi_n (j-0,5)) \right] + \sum_{m=1}^M \left( A_{m_m} e^{\beta_{m_m} x} - B_{m_m} e^{-\beta_{m_m} x} \right) \beta_{m_m} \cos(\mu_m (i-0,5)) + \sum_{n=1}^N \left( A_{n_n} e^{\beta_{n_n} x} - B_{n_n} e^{-\beta_{n_n} x} \right) \beta_{n_n} \cos(\chi_n (j-0,5)) \right) + P. \quad (5)$$

Вирази (2) - (5), доповнені умовами навантаження композитного тягового органа або умовами його приєднання до споруди, становлять модель багатошарового вантового каната.



# ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРИВУ НЕПЕРЕРВНОСТІ ТРОСА ВАНТОВОГО КАНАТА

Особливості деформування та навантаження елементів армування в перерізі  $z = 0$

$$u_{i,j} = U_0 \begin{cases} 0 & i \neq I \vee j \neq J \\ 1 & i = I \wedge j = J \end{cases}, \quad p_{I,J} = 0.$$

Переміщення перерізу ушкодженого троса

$$U_0 = \frac{P M N}{2 E F} \left( \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} 2B_{m,n} \beta_{m,n} \cos^2(\mu_m(I-0,5)) \cos^2(\chi_n(J-0,5)) + \sum_{m=1}^{M-1} B_{m_m} \beta_{m_m} \cos^2(\mu_m(I-0,5)) + \sum_{n=1}^{N-1} B_{n_n} \beta_{n_n} \cos^2(\chi_n(j-0,5)) \right)^{-1}. \quad (6)$$

Показники НДС для вант з  $i = j$ , тросами діаметром 8,25 мм і кроком укладання 1,2d

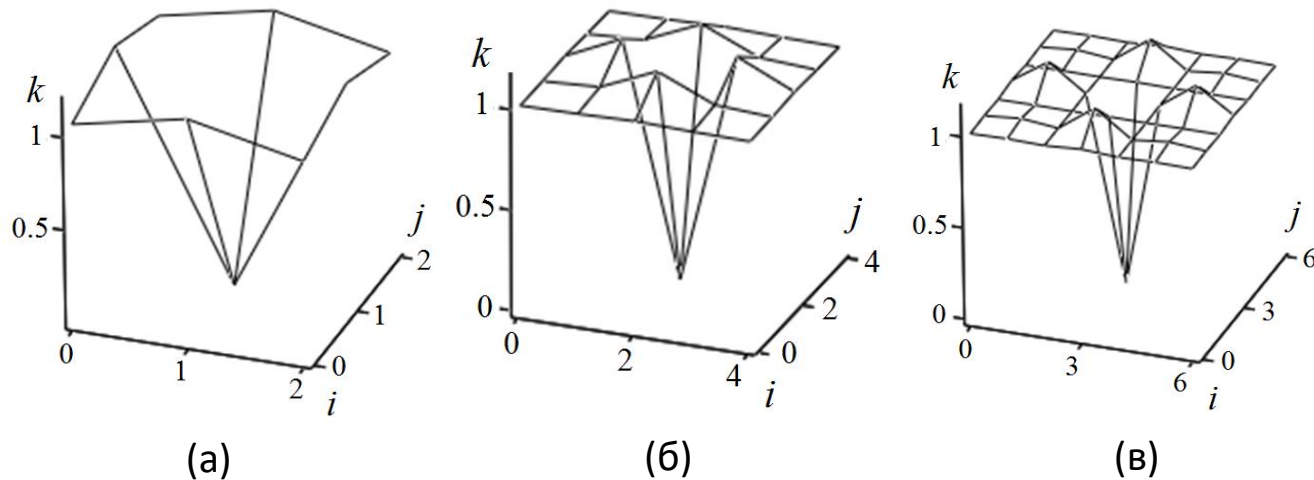


Рис. 9 – Розподіл коефіцієнтів навантаження  $k$

тросів з номерами  $j, i$  вант з ушкодженим центральним тросом: ванта з дев'яти (а), двадцяти п'яти (б) та сорока дев'яти (в) тросів

- ❖ Ванта з довільним ушкодженим тросом в перерізі приєднання до споруди, в перерізі  $z = 0$ .
- ❖ Вісь  $z$  спрямована вздовж вант.
- ❖ Трос ушкоджений має  $I$ -тий номер в  $J$ -тому шарі
- ❖ Ушкоджений трос не обмежений в переміщенні  $U_0$

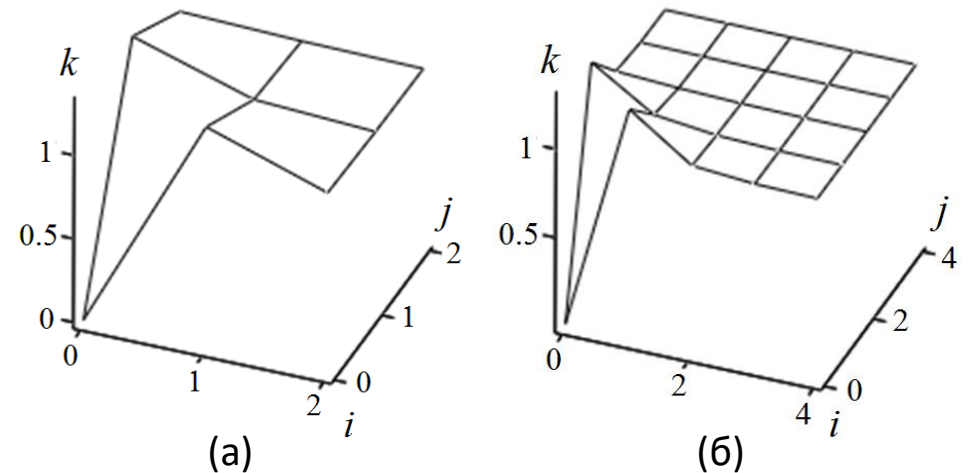


Рис. 10 – Розподіл коефіцієнтів навантаження  $k$

тросів з номерами  $j, i$  вант з ушкодженим кутовим тросом: ванта з дев'яти (а), двадцяти п'яти (б) тросів





# ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРИВУ НЕПЕРЕРВНОСТІ ТРОСА ВАНТОВОГО КАНАТА

Залежності максимальних коефіцієнтів навантаження тросів від кількості шарів тросів та тросів в шарах

- ❖ Ушкодження одного троса призводить до суттєвої зміни внутрішніх навантажень **лише суміжних тросів** з ушкодженим тросів;
- ❖ **Коли ушкоджений центральний трос** зміна навантажень припадає на **суміжні 4 троси**, навантаження суміжних тросів зростає майже на **20 %**;
- ❖ **Коли ушкоджений крайній трос** зміна навантажень припадає на **2 суміжних троси**, їхні навантаження зростають більш ніж на **31 %**.
- ❖ Більш суттєво впливає **розрив кутового троса** вантового каната на втрату його тягової спроможності;
- ❖ Доцільно приймати **мінімальний запас міцності** вантового гумотросового каната з урахуванням впливу **розриву кутового троса**.

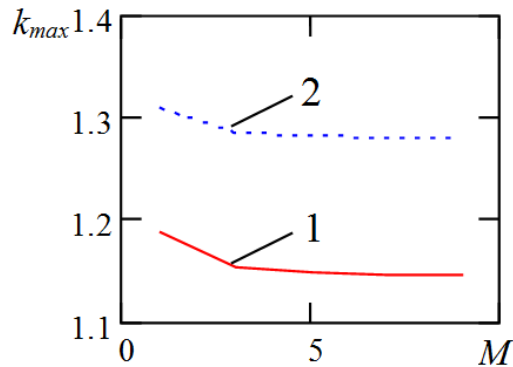


Рис. 11 – Залежність максимальних коефіцієнтів навантаження тросів  $k_{max}$  з номерами  $j, i$  ванти з ушкодженням центральним **1** та кутовим **2** тросом від кількості шарів тросів  $M$  та тросів в шарах  $M$

Умова міцності ванти з ушкодженням (кутовим) тросом

$$p_{1,1} = E F \left( \begin{aligned} & \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} (A_{m,n} - B_{m,n}) \beta_{m,n} \cos(0,5\mu_m) \cos(0,5\chi_n) + \\ & + \sum_{m=1}^{M-1} (A_{m_m} - B_{m_m}) \beta_{m_m} \cos(0,5\mu_m) + \\ & + \sum_{n=1}^{N-1} (A_{n_n} - B_{n_n}) \beta_{n_n} \cos(0,5\chi_n) \end{aligned} \right) + P \leq [P].$$



# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗТАШУВАННЯ РОЗРИВІВ НЕПЕРЕВНОСТІ ВОЛОКОН АРМУВАННЯ ОРТОТРОПНОЇ ЗАКРІПЛЕНОЇ ВАНТИ НА ЇЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН

Граничні умови взаємодії зі спорудою кінців тягового елемента

- ❖ тяговий композитний волоконний елемент довжиною  $L$ ;
- ❖ довільне регулярне розташування волокон у перерізі;
- ❖ розрив неперервності троса на відстані  $l$  від одного з країв;
- ❖ ушкоджене волокно має номер  $I$  у шарі за номером  $J$ ;
- ❖ Початок осі  $z$  суміщено з ближнім до перерізу ушкодження волокна кінця тягового елемента зі спорудою;

$$\text{коли } z = 0, \quad u_{i,j} = 0$$

$$\text{коли } z = L, \quad u_{i,j} = u_{i\pm 1, j\pm 1}$$

$$\text{коли } z = l, \quad p_{2,i,j} - p_{1,i,j} = 0$$

$$\text{коли } z = l, \quad u_{2,i,j} - u_{1,i,j} = U_0 \begin{cases} 0 & i \neq I \vee j \neq J \\ 1 & i = I \wedge j = J \end{cases} \wedge p_{2,I,J} = p_{1,I,J} = 0$$

де  $U_0$  – зазор між кінцями волокна, утворений розривом його неперервності, 1 і 2 у індексах – номери відрізків каната.

Вираз розподілу сил між волокнами другого відрізка

$$\left( \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left[ \frac{2 \cos(\mu_m(I-0,5)) \cos(\chi_n(J-0,5)) (e^{\beta_{m,n}(z-2L)} - e^{-\beta_{m,n}z})}{e^{-\beta_{m,n}l} - e^{\beta_{m,n}(l-2L)} - \frac{e^{2\beta_{m,n}(l-L)} + 1}{e^{2\beta_{m,n}l} + 1} (e^{-\beta_{m,n}l} - e^{\beta_{m,n}l})} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \beta_{m,n} \cos(\mu_m(i-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5)) \right] + \sum_{m=1}^{M-1} \left[ \frac{\cos(\mu_m(I-0,5)) (e^{\beta_{m,m}(z-2L)} + e^{-\beta_{m,m}z})}{e^{-\beta_{m,m}l} - e^{\beta_{m,m}(l-2L)} - \frac{e^{2\beta_{m,m}(l-L)} + 1}{e^{2\beta_{m,m}l} + 1} (e^{-\beta_{m,m}l} - e^{\beta_{m,m}l})} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \beta_{m,m} \cos(\mu_m(i-0,5)) \right] + \sum_{n=1}^{N-1} \left[ \frac{\cos(\chi_n(J-0,5)) (e^{\beta_{n,n}(z-2L)} + e^{-\beta_{n,n}z})}{e^{-\beta_{n,n}l} - e^{\beta_{n,n}(l-2L)} - \frac{e^{2\beta_{n,n}(l-L)} + 1}{e^{2\beta_{n,n}l} + 1} (e^{-\beta_{n,n}l} - e^{\beta_{n,n}l})} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \beta_{n,n} \cos(\chi_n(j-0,5)) \right] \right) + P$$



# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗТАШУВАННЯ РОЗРИВІВ НЕПЕРЕВНОСТІ ВОЛОКОН АРМУВАННЯ ОРТОТРОПНОЇ ЗАКРІПЛЕНОЇ ВАНТИ НА ЇЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН

Значення невідомого зазору утвореного внаслідок розриву неперервності троса

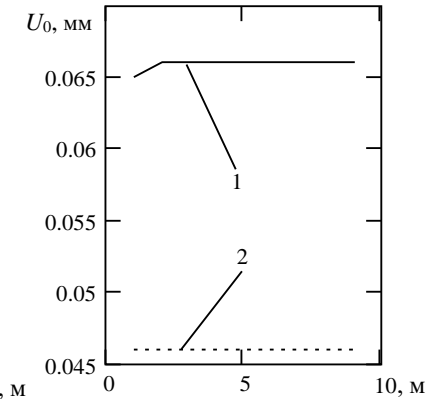
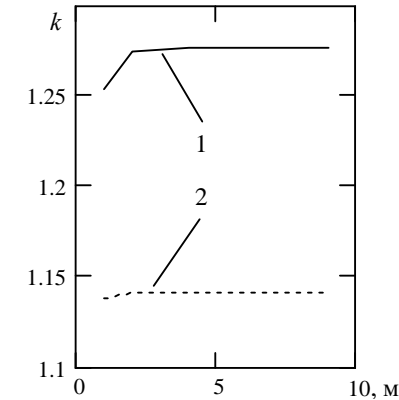
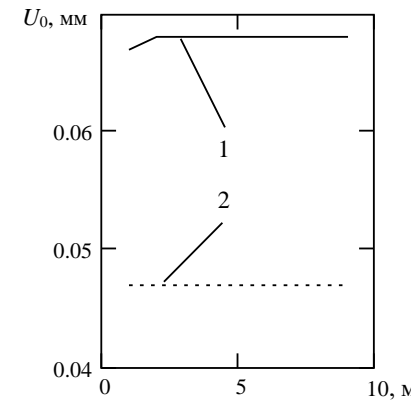
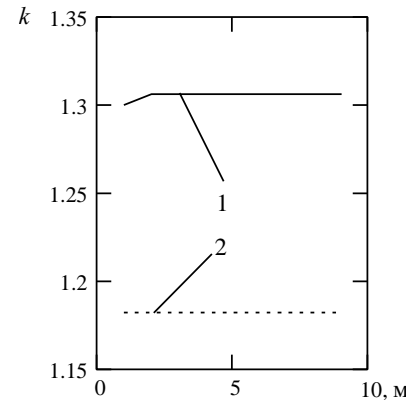
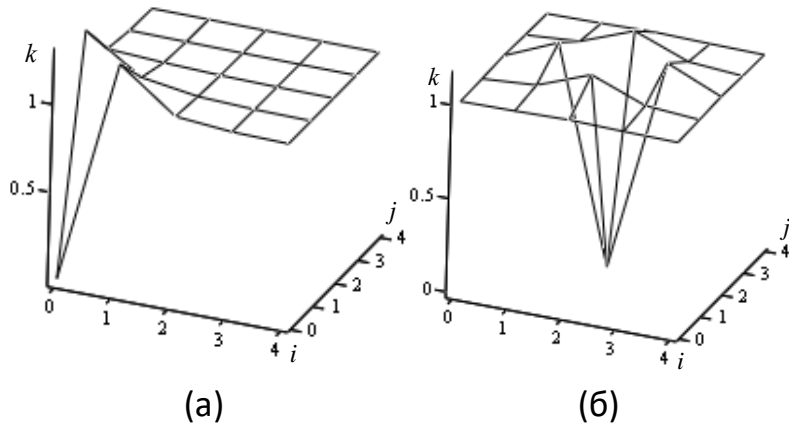
$$U_0 = \frac{M N P}{2 E F} \left( \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left[ \frac{\cos^2(\mu_m(I-0,5)) \cos^2(\chi_n(J-0,5)) (e^{\beta_{m,n}(l-2L)} + e^{-\beta_{m,n}l}) \beta_{m,n}}{e^{-\beta_{m,n}l} - e^{\beta_{m,n}(l-2L)} - \frac{e^{2\beta_{m,n}(l-L)} + 1}{e^{2\beta_{m,n}l} + 1} (e^{-\beta_{m,n}l} - e^{\beta_{m,n}l})} \right] + \sum_{m=1}^{M-1} \left[ \frac{\cos^2(\mu_m(I-0,5)) (e^{\beta_{m,m}(l-2L)} + e^{-\beta_{m,m}l}) \beta_{m,m}}{e^{-\beta_{m,m}l} - e^{\beta_{m,m}(l-2L)} - \frac{e^{2\beta_{m,m}(l-L)} + 1}{e^{2\beta_{m,m}l} + 1} (e^{-\beta_{m,m}l} - e^{\beta_{m,m}l})} \right] + \sum_{n=1}^{N-1} \left[ \frac{\cos^2(\chi_n(J-0,5)) (e^{\beta_{n,n}(l-2L)} + e^{-\beta_{n,n}l}) \beta_{n,n}}{e^{-\beta_{n,n}l} - e^{\beta_{n,n}(l-2L)} - \frac{e^{2\beta_{n,n}(l-L)} + 1}{e^{2\beta_{n,n}l} + 1} (e^{-\beta_{n,n}l} - e^{\beta_{n,n}l})} \right] \right)^{-1}$$

Величини зазорів  $U_0$ , що створюються між кінцями ушкоджених тросів під дією зовнішнього навантаження (розтягу) ортотропного тягового органа, в межах лінійного деформування, пропорційні зовнішньому навантаженню  $P$  та залежать і від загальної довжини  $L$ , і від відстані від одного з його кінців до перерізу розриву  $l$



# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗТАШУВАННЯ РОЗРИВІВ НЕПЕРЕВНОСТІ ВОЛОКОН АРМУВАННЯ ОРТОТРОПНОЇ ЗАКРІПЛЕНОЇ ВАНТИ НА ЇЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН

Показники НДС для ванти довжиною  $L$  з числом  $i = j = 5$ , тросами діаметром 8,25 мм і кроком укладання  $1,2d$ . Відстань від одного з кінців ванти до перерізу розриву  $l$ .



**Рис. 12 – Коефіцієнти розподілу навантажень  $k$  в композиті довжиною чотири метри, складеним за схемою 5x5, з ушкодженням в перерізі симетрії волокном: а – кутовим; б – центральним**

**Рис. 13 – Максимальні абсолютні значення коефіцієнтів розподілу навантажень  $k$  (а) та зазорів  $U_0$  (б) за різних довжини зразка складеного за схемою 3x3 з ушкодженням волокном: 1 – кутовим; 2 – центральним**

**Рис. 14 – Значення максимальних абсолютних значень коефіцієнтів розподілу навантажень  $k$  (а) та зазорів  $U_0$  (б) за різних довжини зразка складеного за схемою 9x9 з ушкодженням волокном: 1 – кутовим; 2 – центральним**

- ❖ Суттєва різниця в кількості елементів армування вантового каната 9 та 81 (рис. 13 та 14) не супроводжується суттєвою різницею розподілів максимальних внутрішніх сил навантаження елементів армування;
- ❖ Крайові ефекти локальної зміни побудови ванти з вказаними механічними параметрами та вказаної конструкції не перевищують 1,5-2м та не залежать від конструкції ванти;
- ❖ Для вант меншої довжини доцільно використовувати елементи армування меншого діаметра.



# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗТАШУВАННЯ РОЗРИВІВ НЕПЕРЕВНОСТІ ВОЛОКОН АРМУВАННЯ ОРТОТРОПНОЇ ЗАКРІПЛЕНОЇ ВАНТИ НА ЇЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН

Показники НДС для ванти довжиною  $L$  з числом  $i = j = 5$ , тросами діаметром 8,25 мм і кроком укладання 1,2d. Відстань від одного з кінців ванти до перерізу розриву  $l$ .

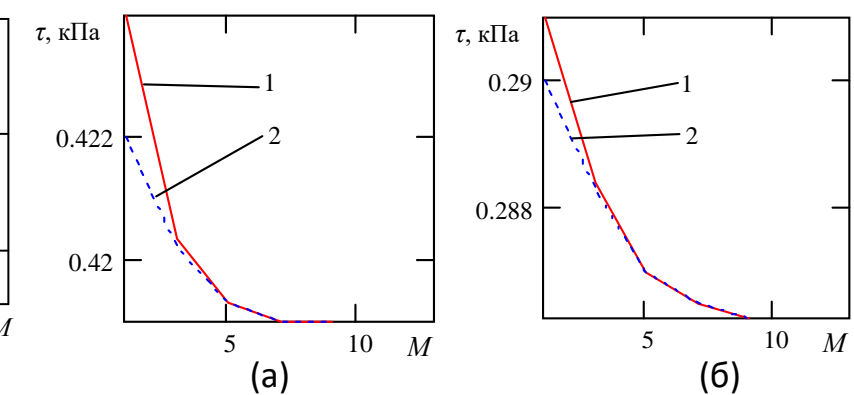
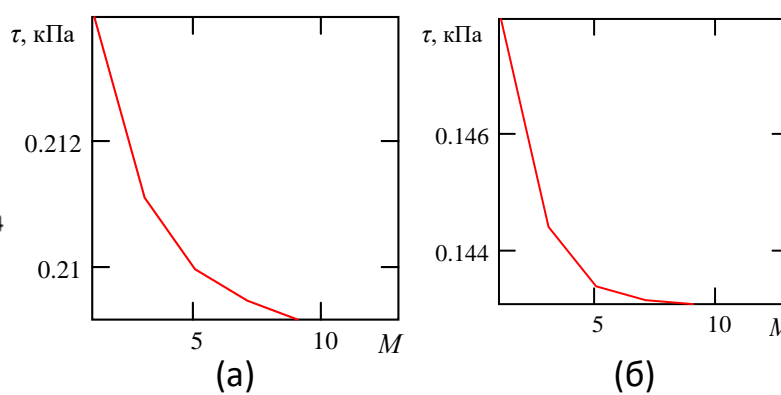
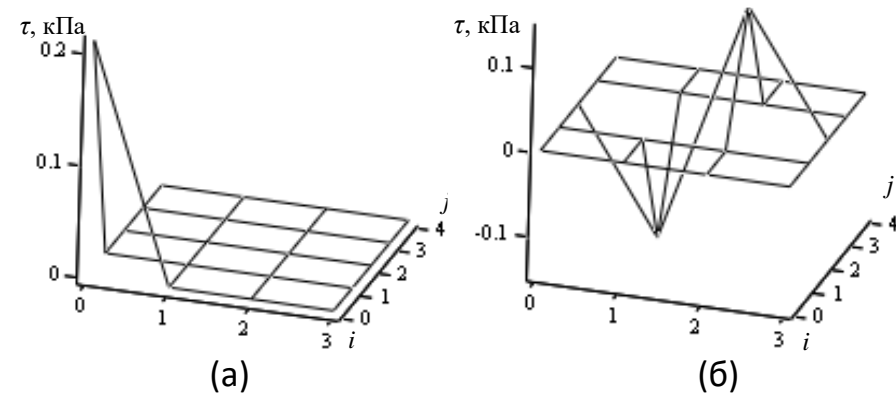


Рис. 15 – Розподіл дотичних напружень  $\tau$  в неперервному матеріалі, розташованому між елементами армування за номерами  $i$  та  $i+1$  в шарах за номерами  $j$  у ванті довжиною 4 метри, складеним за схемою 5x5, з ушкодженням в перерізі симетрії елементом армування: а – кутовим; б – центральним

Рис. 16 – Розподіл дотичних напружень  $\tau$  в неперервному матеріалі, розташованому між елементами армування за номерами  $i$  та  $i+1$  в шарах за номерами  $j$  у ванті довжиною 4 метри, складеній за схемою  $M \times M$ , з ушкодженням в перерізі симетрії елементом армування: а – кутовим; б – центральним

Рис. 17 – Розподіли дотичних напружень  $\tau$  в неперервному матеріалі, розташованому між елементами армування за номерами  $i$  та  $i+1$  в шарах за номерами  $j$  у вантах довжиною 4 метри, складених за схемами  $M \times (M+2)$  (крива 1) та  $M \times (M+4)$  (крива 2), з ушкодженням в перерізі симетрії елементом армування: а – кутовим; б – центральним

- ❖ Збільшення кількості шарів лише на два, кількісно суттєво впливає на напружений стан неперервного матеріалу;
- ❖ Відмінність кількості шарів від кількості елементів армування ванти призводить до, практично, подвійного зростання дотичних напружень в неперервному матеріалі ванти з ушкодженням елементом армування.



# ВПЛИВ НЕЛІНІЙНОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ СКЛАДОВИХ ВАНТИ НА ЇЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН

## Побудова моделі

**Загальний випадок** експлуатації ванти – наявність **декількох елементів армування та декількох розривів**.

- ❖ Ванта має  **$M$  паралельних волокон в  $N$  шарах**, а також **розриви декількох елементів армування в одному перерізі**.
- ❖ **Схема ванти симетрична відносно** площини розташування **розривів** неперервності.
- ❖ Пари номерів розірваних волокон об'єднані у множину  $\zeta_\nu \in U_0 \quad (1 \leq \nu \leq \Upsilon)$ , де  $\Upsilon$  – кількість елементів з розривами неперервності.
- ❖ Невідомі **симетричні переміщення кінців волокон**, утворені розривами їх неперервності  $w(I_\nu, J_\nu) \in W \quad (1 \leq \nu \leq \Upsilon)$
- ❖ **Характер переміщень волокон** 
$$u_{i,j} = \zeta_\nu \begin{cases} 0 & i \neq I_\nu \vee j \neq J_\nu \\ 1 & i = I_\nu \wedge j = J_\nu \end{cases}$$
 та **внутрішні сили їх навантаження**  $p_{I,J} = 0 \quad (i = I_\nu \wedge j = J_\nu)$
- ❖ **Розриви неперервності волокон спричиняють локальний перерозподіл сил** між елементами армування;
- ❖ В перерізі розривів **виникають максимальні сили розтягу волокон та дотичні напруження**;
- ❖ Значення **сил та дотичних напружень** можуть сягати значень, за яких **присутнє нелінійне деформування**;
- ❖ Усі **складові ванти на інтервалі  $0 \leq z \leq l$**  деформуються в умовах, коли **модулі зсуву матриці та волокон на розтяг менші** за відповідні значення за **лінійного деформування**;
- ❖ Приймається, що **залежності модулів зсуву та розтягу підкоряються лінійно-кусовим законам**, та мають по **дві лінійні частини**.
- ❖ Коли  $z > l$  **відсутні умови нелінійного деформування**.



# ВПЛИВ НЕЛІНІЙНОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ СКЛАДОВИХ ВАНТИ НА ЇЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН

## Побудова моделі

Переміщення та внутрішні сили навантаження на ділянці з **нелінійним деформуванням**

$$u_{i,j} = \left( \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left[ \left( \frac{4}{MN} \sum_{\nu=1}^{\Upsilon} \zeta_{\nu} \cos(\mu_m(I_{\nu}-0,5)) \cos(\chi_n(J_{\nu}-0,5)) \right) e^{\beta_{m,n}z} + B_{m,n} \left( e^{-\beta_{m,n}z} - e^{\beta_{m,n}z} \right) \right] \times \cos(\mu_m(i+0,5)) \cos(\chi_n(j+0,5)) \right) + \sum_{m=1}^{M-1} \left[ \left( \frac{2}{MN} \sum_{\nu=1}^{\Upsilon} \zeta_{\nu} \cos(\mu_m(I_{\nu}-0,5)) e^{\beta_{m,m}z} + B_{m,m} \left( e^{-\beta_{m,m}z} - e^{\beta_{m,m}z} \right) \right) \cos(\mu_m(i+0,5)) \right] + \sum_{n=1}^{N-1} \left[ \left( \frac{2}{MN} \sum_{\nu=1}^{\Upsilon} \zeta_{\nu} \cos(\chi_n(J_{\nu}-0,5)) e^{\beta_{n,n}z} + B_{n,n} \left( e^{-\beta_{n,n}z} - e^{\beta_{n,n}z} \right) \right) \cos(\chi_n(j+0,5)) \right] \right) + \frac{Pz}{E c_{EF}} + \frac{1}{MN} \sum_{\nu=1}^{\Upsilon} \zeta_{\nu}$$

Переміщення та внутрішні сили навантаження на ділянці з **лінійним деформуванням**

$$u_{2i,j} = \left( \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} B_{2m,n} e^{-\beta_{2m,n}z} \cos(\mu_m(i+0,5)) \cos(\chi_n(j+0,5)) + \sum_{m=1}^{M-1} B_{m,2m} e^{-\beta_{m,2m}z} \cos(\mu_m(i+0,5)) + \sum_{n=1}^{N-1} B_{n,2n} e^{-\beta_{n,2n}z} \cos(\chi_n(j+0,5)) \right) + \frac{Pz}{E2 F} + \delta 2,$$

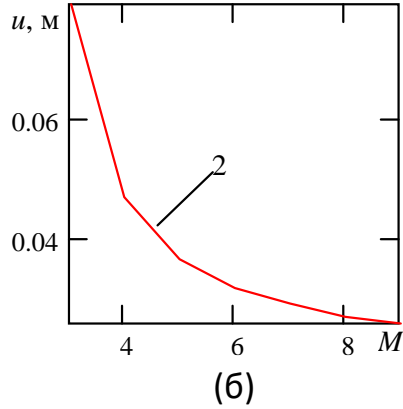
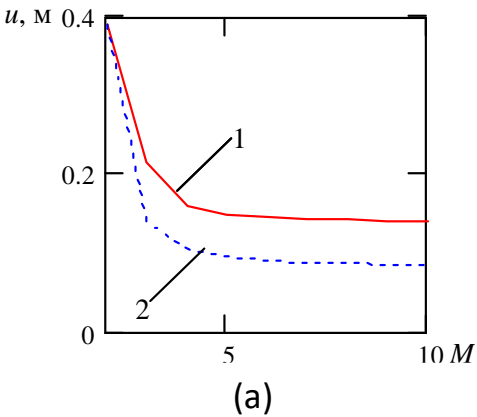
$$P_{i,j} = E c_{EF} \left( \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left[ \left( \frac{4}{MN} \sum_{\nu=1}^{\Upsilon} \left\{ \zeta_{\nu} \cos(\mu_m(I_{\nu}-0,5)) \times \cos(\chi_n(J_{\nu}-0,5)) \right\} e^{\beta_{m,n}z} - B_{m,n} \left( e^{-\beta_{m,n}z} + e^{\beta_{m,n}z} \right) \right) \times \beta_{m,n} \cos(\mu_m(i+0,5)) \cos(\chi_n(j+0,5)) \right] + \sum_{m=1}^{M-1} \left[ \left( \frac{2}{MN} \sum_{\nu=1}^{\Upsilon} \zeta_{\nu} \cos(\mu_m(I_{\nu}-0,5)) e^{\beta_{m,m}z} - B_{m,m} \left( e^{-\beta_{m,m}z} + e^{\beta_{m,m}z} \right) \right) \times \beta_{m,m} \cos(\mu_m(i+0,5)) \right] + \sum_{n=1}^{N-1} \left[ \left( \frac{2}{MN} \sum_{\nu=1}^{\Upsilon} \zeta_{\nu} \cos(\chi_n(J_{\nu}-0,5)) e^{\beta_{n,n}z} - B_{n,n} \left( e^{-\beta_{n,n}z} + e^{\beta_{n,n}z} \right) \right) \times \beta_{n,n} \cos(\chi_n(j+0,5)) \right] \right) + P.$$

$$p_{2i,j} = -E F \left( \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left[ B_{2m,n} e^{-\beta_{2m,n}z} \beta_{2m,n} \times \cos(\mu_m(i+0,5)) \cos(\chi_n(j+0,5)) \right] + \sum_{m=1}^{M-1} B_{m,2m} e^{-\beta_{m,2m}z} \beta_{m,2m} \cos(\mu_m(i+0,5)) + \sum_{n=1}^{N-1} B_{n,2n} e^{-\beta_{n,2n}z} \beta_{n,2n} \cos(\chi_n(j+0,5)) \right) + P$$

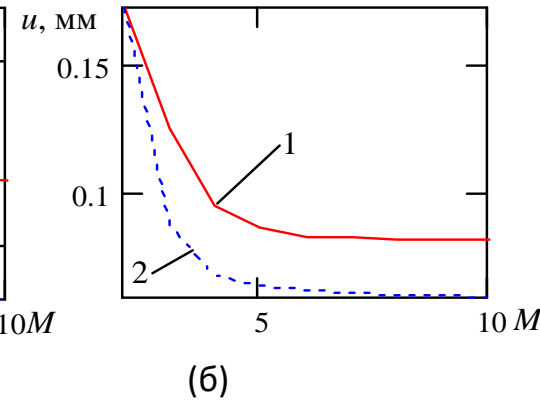
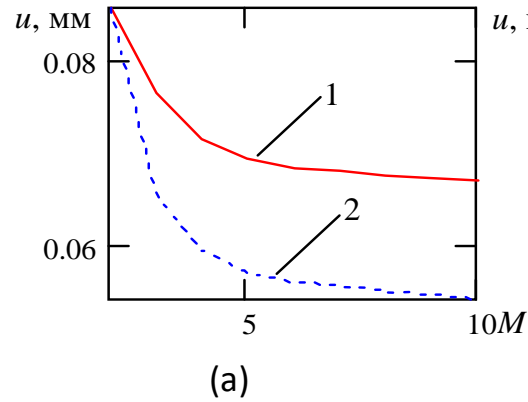


# ВПЛИВ НЕЛІНІЙНОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ СКЛАДОВИХ ВАНТИ НА ЇЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН

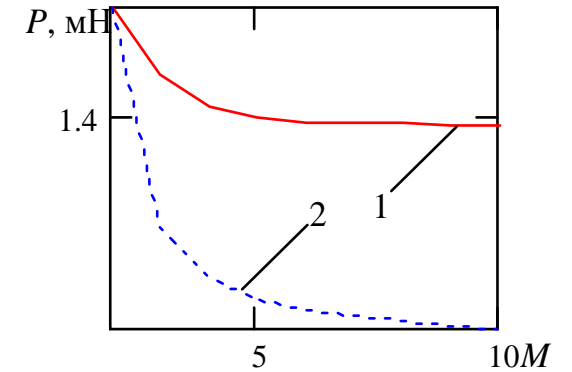
Показники НДС ванти на ділянці з нелінійним деформуванням



**Рис. 18** – Залежність довжин ділянок прояву нелінійного закону деформування від кількості волокон  $M$ : а) в перерізі  $z = 0$ , б) в перерізі  $z = l$   
1 – волокна укладені за схемою  $2 \times M$ ,  
2 – волокна укладені за схемою  $M \times M$



**Рис. 19** – Залежність переміщень ушкодженого волокна від кількості волокон в шарі ванти; а) в перерізі  $z = 0$ , б) в перерізі  $z = l$   
1 – волокна укладені за схемою  $2 \times M$ ,  
2 – волокна укладені за схемою  $M \times M$



**Рис. 20** – Залежність максимальних навантажень волокон у разі розриву суцільності кутового волокна  
1 – волокна укладені за схемою  $2 \times M$ ,  
2 – волокна укладені за схемою  $M \times M$

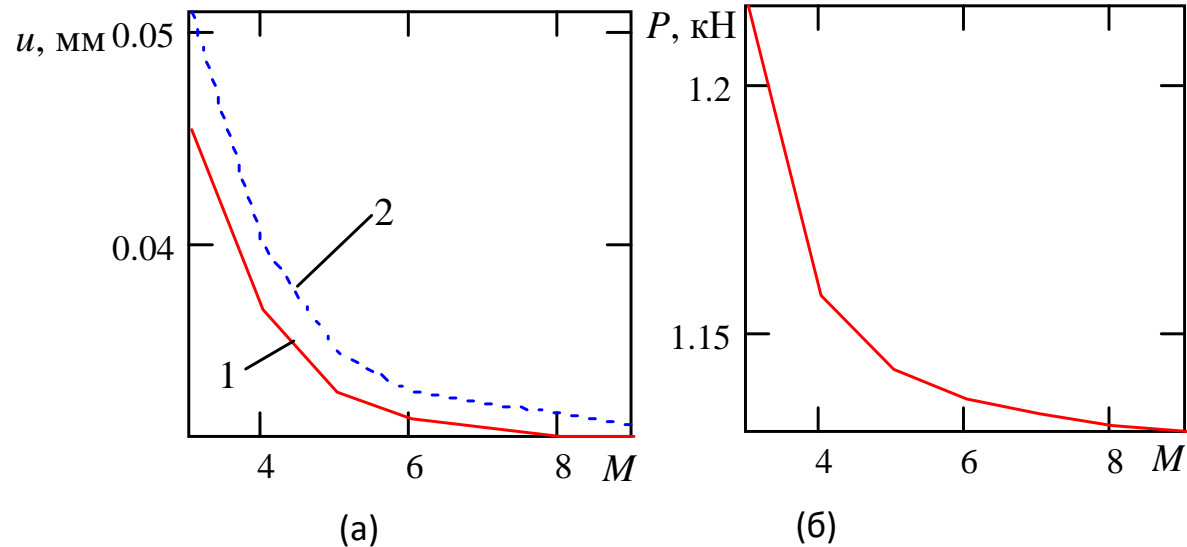
- ❖ Залежності довжин ділянок, на яких навантаження окремих волокон перевищує навантаження лінійного деформування від кількості волокон в шарах ванти нелінійні, спадні;
- ❖ Залежності переміщень ушкодженого волокна від кількості волокон в шарі ванти нелінійні, спадні.



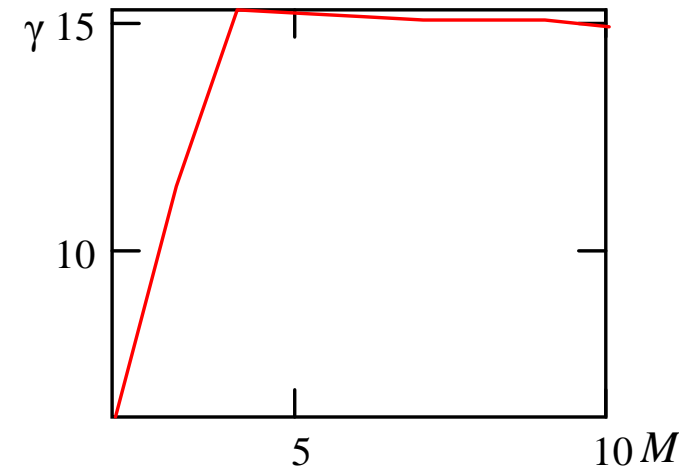


# ВПЛИВ НЕЛІНІЙНОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ СКЛАДОВИХ ВАНТИ НА ЇЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН

Показники НДС ванти на ділянці з нелінійним деформуванням



**Рис. 21** – Залежність показників напружено-деформованого стану ванти від кількості волокон  $M$  у ванті, складеної за схемою  $M \times M$  з ушкодженим центральним волокном: а) переміщення ушкодженого волокна, б) максимальне навантаження волокон ванти  
1 – переміщення перерізу  $z = 0$ ,  
2 – переміщення перерізу  $z = l$

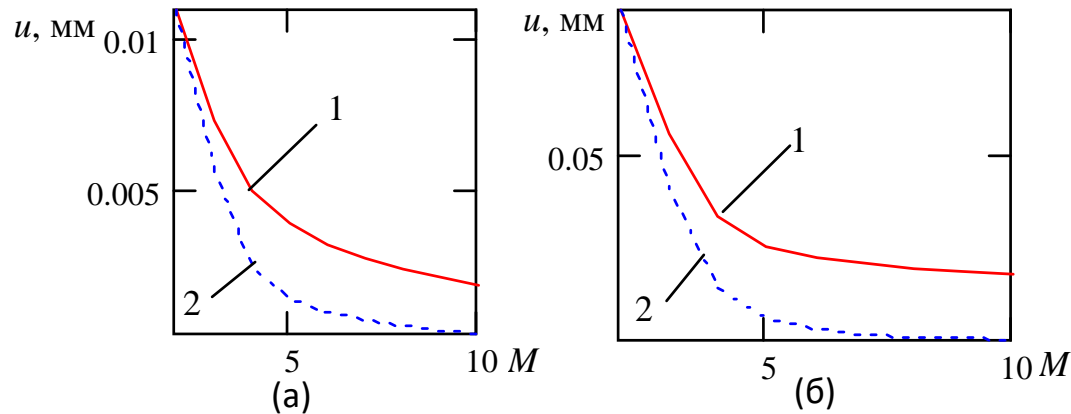


**Рис. 22** – Залежність максимальних кутів зсуву матеріалу матриці двохшарової ванти з ушкодженим кутовим волокном від кількості волокон в  $M$  шарах ванти складеної за схеми  $2 \times M$  та нелінійного деформування її складових

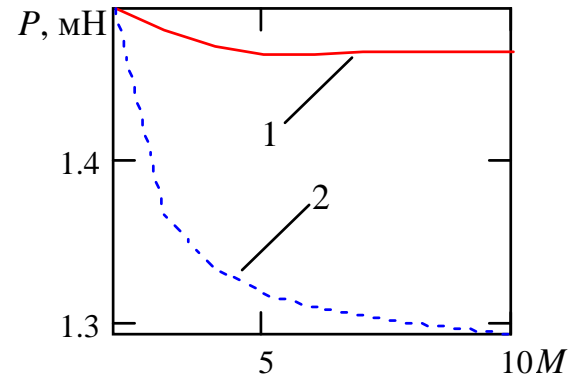


# ВПЛИВ НЕЛІНІЙНОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ СКЛАДОВИХ ВАНТИ НА ЇЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН

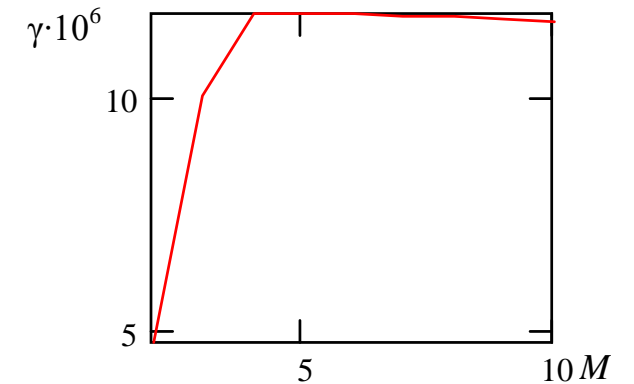
Показники НДС ванти на ділянці з лінійним деформуванням



**Рис. 23** – Залежність переміщень ушкодженого волокна від кількості волокон в шарі ванти за лінійного закону деформування; а) в перерізі  $z = 0$ , б) в перерізі  $z = l$   
 1 – волокна укладені за схемою  $2 \times M$   
 2 – волокна укладені за схемою  $M \times M$



**Рис. 24** – Залежність максимальних навантажень волокон у разі розриву суцільності кутового волокна за лінійного закону деформування  
 1 – волокна укладені за схемою  $2 \times M$   
 2 – волокна укладені за схемою  $M \times M$



**Рис. 25** – Залежність максимальних кутів зсуву матеріалу матриці двохшарової ванти з ушкодженим кутовим волокном від кількості волокон в  $M$  шарах ванти складеної за схеми  $2 \times M$  за лінійного деформування її складових

- ❖ **Нелінійність деформування несуттєво впливає на характер залежності максимальних кутів зсуву матеріалу матриці.** Екстремальні їх значення менші;
- ❖ **Зростання кутів зсуву внаслідок нелінійного деформування волокон становить від 33 % за схеми  $2 \times 2$  та 30 % за схеми  $2 \times M$  ( $M \geq 4$ ) за умови значення модуля розтягу волокон на нелінійній частині вдвічі меншій за лінійний.**



# КОНТРОЛЬ РОЗРИВІВ ТРОСІВ КОМПОЗИТНИХ ВАНТОВИХ КАНАТІВ

## Електричний опір композитних вантових канатів

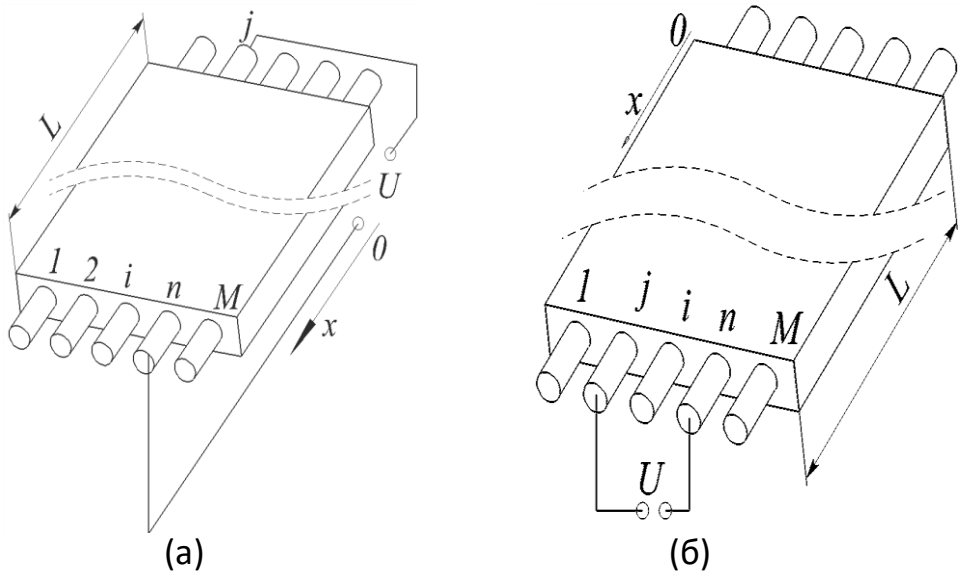


Рис. 26 – Схеми підведення різниці потенціалів до тросів протилежних кінців канату (а), одного кінця канату (б)

Для випадку підведення струмів до тросів одного краю канату (рис. 26, б)

$$U_i = \frac{2r}{M} \sum_{m=1}^{M-1} \left[ \left( \cos(\mu_m(n-0,5)) - \cos(\mu_m(j-0,5)) \right) \frac{e^{\beta_m x} + e^{-\beta_m x}}{\beta_m (e^{\beta_m L} - e^{-\beta_m L})} \cos(\mu_m(i-0,5)) \right]$$

$$I_i = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^{M-1} \left[ \left( \cos(\mu_m(n-0,5)) - \cos(\mu_m(j-0,5)) \right) \left( \frac{e^{\beta_m x} - e^{-\beta_m x}}{e^{\beta_m L} - e^{-\beta_m L}} \right) \cos(\mu_m(i-0,5)) \right]$$

Розподіл потенціалів у тросах  $U_i = \sum_{m=1}^M \left( A_m e^{\beta_m x} + B_m e^{-\beta_m x} \right) \cos(\mu_m(i-0,5)) + ax + b$ ,

де  $A_m, B_m, a, b$  – сталі інтегрування,  $\beta_m = \sqrt{2rq(1 - \cos(\mu))}$ ,  $\mu_m = \frac{\pi m}{M}$

Значення струму в тросах  $I_i = \frac{1}{r} \sum_{m=1}^M \left( A_m e^{\beta_m x} - B_m e^{-\beta_m x} \right) \beta_m \cos(\mu_m(i-0,5)) + a$

Для випадку підведення електричної напруги до протилежних країв каната (рис. 26, а)

$$U_i = \frac{2r}{M} \sum_{m=1}^M \left[ \left( \frac{\cos(\mu_m(n-0,5)) + \frac{\cos(\mu_m(j-0,5)) - \cos(\mu_m(n-0,5))e^{\beta_m L}}{e^{\beta_m L} - e^{-\beta_m L}}}{e^{\beta_m L} - e^{-\beta_m L}} \right) e^{\beta_m x} + \left( \frac{\cos(\mu_m(j-0,5)) - \cos(\mu_m(n-0,5))e^{\beta_m L}}{e^{\beta_m L} - e^{-\beta_m L}} \right) e^{-\beta_m x} \right] \frac{\cos(\mu_m(i-0,5))}{\beta_m} + \frac{r}{M} x$$

$$I_i = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M \left[ \left( \frac{\cos(\mu_m(n-0,5)) + \frac{\cos(\mu_m(j-0,5)) - \cos(\mu_m(n-0,5))e^{\beta_m L}}{e^{\beta_m L} - e^{-\beta_m L}}}{e^{\beta_m L} - e^{-\beta_m L}} \right) e^{\beta_m x} - \left( \frac{\cos(\mu_m(j-0,5)) - \cos(\mu_m(n-0,5))e^{\beta_m L}}{e^{\beta_m L} - e^{-\beta_m L}} \right) e^{-\beta_m x} \right] \cos(\mu_m(i-0,5)) + \frac{1}{M}$$

# КОНТРОЛЬ РОЗРИВІВ ТРОСІВ КОМПОЗИТНИХ ВАНТОВИХ КАНАТІВ

## Розподіл потенціалів у канаті з ушкодженим тросом

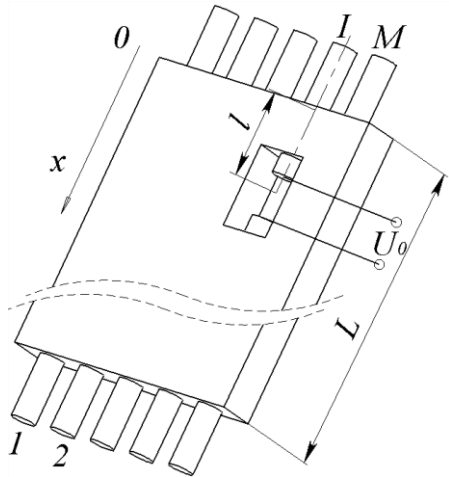


Рис. 27 – Умовна схема підведення напруги до кінців ушкодженого троса

Дві частини каната:  $x < l$  та  $x > l$

$$\text{умови в перерізі } x = l \quad I_{i,1} - I_{i,2} = 0 \wedge I_{i,I} = -1, \quad U_{i,1} = U_{i,2} = U_0 \begin{cases} 0 & i \neq I \\ 1 & i = I \end{cases}$$

Величина різниці потенціалів, що має бути прикладена для забезпечення проходження струму одиничної величини кінцями ушкодженого троса в перерізі розриву його неперервності

$$U_0 = -2 \frac{r}{M} \left( \sum_{m=1}^{M-1} \frac{\cos^2(\mu_m(I-0,5)) \beta_m}{\frac{e^{\beta_m l} + e^{-\beta_m l}}{e^{\beta_m(l-2L)} + e^{-\beta_m l}} - \frac{e^{\beta_m l} - e^{-\beta_m l}}{e^{\beta_m(l-2L)} - e^{-\beta_m l}}} \right)^{-1}$$

Абсолютна зміна електричного опору канату викликана розривом  $I$ -того троса, за умови проходження струму одиничної величини

$$\Delta R_{\rho} = |U_{n,\rho} - U_{j,\rho}|$$

Відносне зростання електричного опору  $R_{\text{від},\rho} = \frac{|U_{n,0} - U_{j,0}| + |U_{n,\rho} - U_{j,\rho}|}{|U_{n,0} - U_{j,0}|}$

## Залежності електричного опору від довжини каната

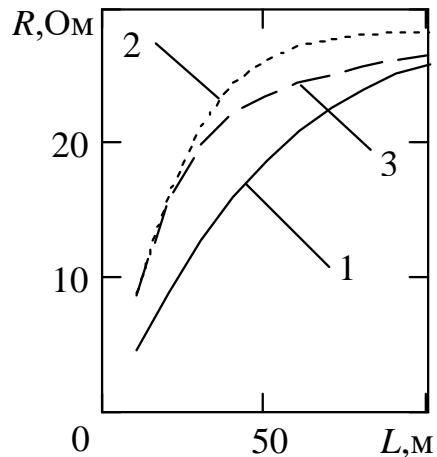
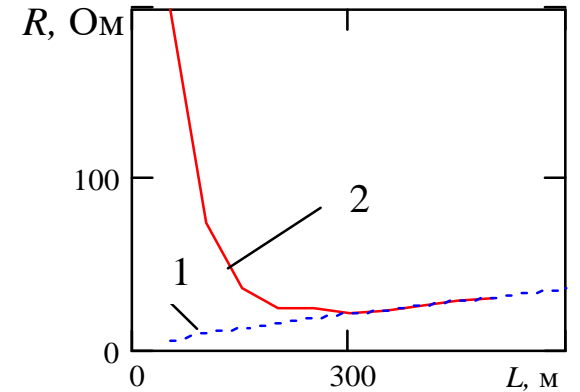


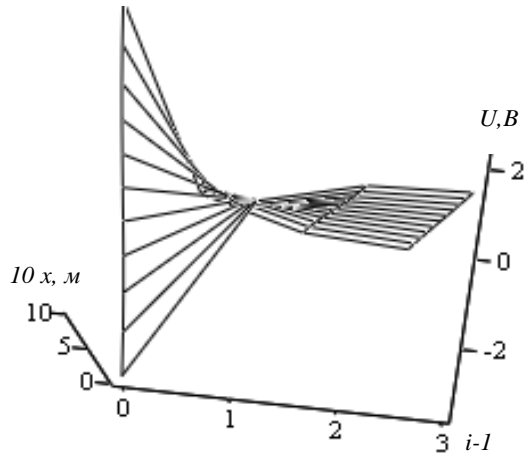
Рис. 28 – Залежності внутрішнього електричного опору канату  $R$  від його довжини  $L$ : 1 – для каната без ушкоджень, 2 – для випадку ушкодження першого троса посередині каната, 3 – для випадку ушкодження першого троса посередині каната та на відстані від перерізу підведення різниці потенціалів, що дорівнює 90% довжини каната

Рис. 29 – Залежність електричних опорів  $R$  зразка каната від його довжини  $L$   
1 – опір каната без ушкоджень тросів,  
2 – опір каната з ушкодженим тросом

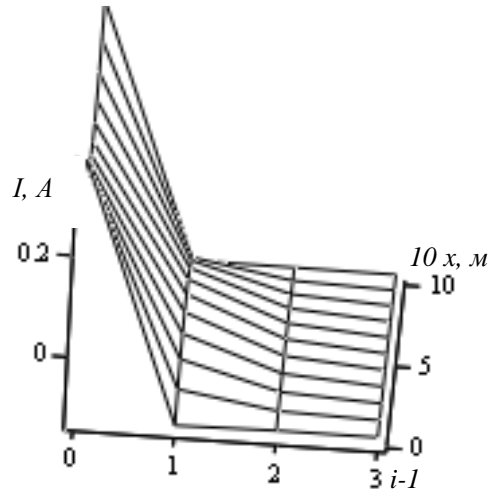


# КОНТРОЛЬ РОЗРИВІВ ТРОСІВ КОМПОЗИТНИХ ВАНТОВИХ КАНАТІВ

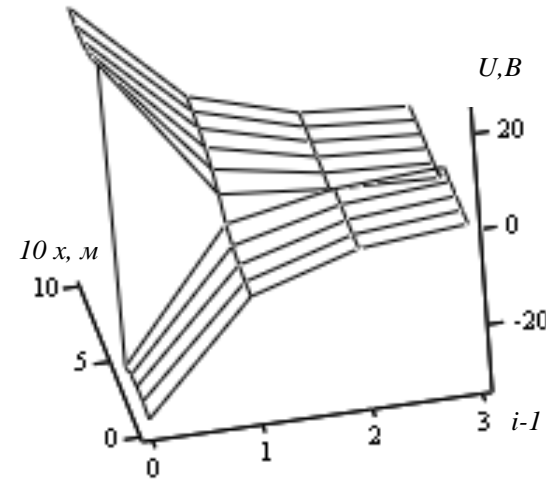
Залежності напруг та струмів у канаті довжиною 100 м без ушкоджень тросів та з ушкодженням першого троса у разі підведення струму до першого троса



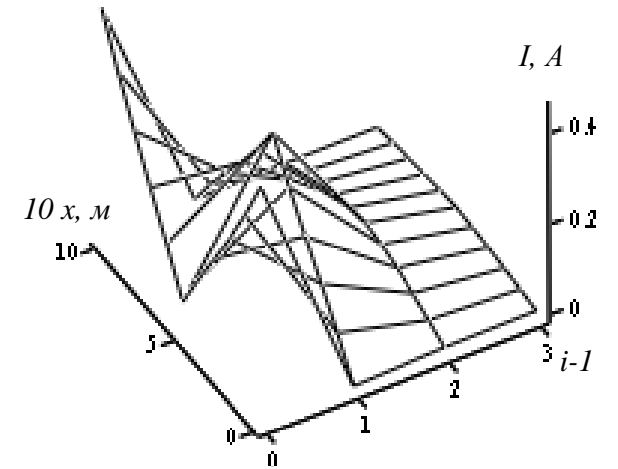
**Рис. 30** – Розподіл електричних потенціалів в еластомерно-тросовому канаті без ушкоджених тросів



**Рис. 31** – Розподіл струмів в тросах в еластомерно-тросовому канаті без ушкоджених тросів



**Рис. 32** – Розподіл електричних потенціалів в еластомерно-тросовому канаті з ушкодженням посередині тросом



**Рис. 33** – Розподіл струмів в тросах еластомерно-тросового каната з ушкодженням посередині тросом

- ❖ Отримані залежності дозволяють визначати внутрішній електричний опір еластомерно-тросового каната без розривів тросів та з розривами
- ❖ Значення струму, що проходить еластомерно-тросовим канатом за відомої схеми підключення можуть бути використані в якості діагностичного параметру у разі руйнування тросів



# ВИСНОВКИ

- ❖ **Створено модель багат шарового структурно-ортотропного вантового тягового органа з комплексним урахуванням його конструкції та механічних властивостей його складових. Умови приєднання до споруди моделюються шляхом задання відповідних граничних умов.** Встановлено математичні залежності між параметрами ванти та показниками її напружено-деформованого стану.
- ❖ **Розроблено аналітичний алгоритм розрахунку** напружено-деформованого стану багат шарового тягового органа з комплексним урахуванням його конструкції, механічних властивостей його складових з ушкодженням довільним тросом та умов приєднання до споруди. Сформульовано умову міцності.
- ❖ **Побудовано модель взаємодії волокон ортотропного волоконного композиту, закріпленого кінцями, та з розривом** неперервності одного з його волокон. Встановлено вплив наявності та розташування розривів елементів армування закріпленої на споруді композитної ванти на її напружено-деформований стан. Встановлено характер впливу нелінійності деформування складових ванти на її напружено-деформований стан. Розроблено алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану композитної ванти з комплексним урахуванням ушкодження волокна та нелінійної залежності деформацій складових ванти від напружень.
- ❖ **Розроблено технічні вимоги до системи контролю розривів тросів** еластомерно-тросового каната, що ґрунтується на контролі змін електричного опору цілого чи пошкодженого каната при різних схемах підключення засобу контролю. Розробка та впровадження такої системи сприятиме підвищенню безпеки експлуатації еластомерно-тросового каната.
- ❖ **Розроблено наукові основи створення, розрахунку та використання як елементів утримування у відновлених конструкціях, будівлях і спорудах структурно-ортотропних композитних вантових канатів.** Ґрунтуючись на цьому, запропоновано технології швидкого відновлення зруйнованих капітальних конструкцій, будівель і споруд, у першу чергу, Харкова, Запоріжжя, Херсона, Миколаєва, Сум, Чернігова, Дніпра, Одеси, що полягають у реалізації нової концепції їх зведення з використанням багат шарових композитних вантових канатів заданої тягової спроможності. Технологія відбудови споруди конкретного типу отримується налаштуванням представлених в роботі моделей та алгоритмів розрахунку під особливості напружено-деформованого стану багатпараметричних структурних складових споруди, а умови експлуатації та приєднання композитного вантового каната задаються відповідними граничними умовами.



# СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ

- ❖ **Соціально-економічний ефект** роботи полягає у створенні вітчизняного науково-технічного продукту, який за своїми характеристиками є конкурентоспроможним на світовому ринку, та є базою розвитку галузей високотехнологічного виробництва, міського та промислового будівництва. Використання запропонованих підходів у комплексі із застосуванням нових матеріалів та конструкцій, відповідає сучасним світовим тенденціям, а для України є визначальним щодо стратегії воєнного, післявоєнного, міського та промислового будівництва.

## КІЛЬКІСТЬ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА РОБОТОЮ

- ❖ 3 розділи колективних монографій, у т.ч. 3 у зарубіжних виданнях,
- ❖ 20 статей (у т.ч. 4 у виданнях, що індексуються у Scopus),
- ❖ 2 тези доповідей (одноосібних),
- ❖ Отримано рішення про державну реєстрацію 1 корисної моделі.

## ВІДОМОСТІ ПРО ЦИТУВАННЯ

	Власне ім'я та прізвище кожного з авторів роботи	Згідно з базами даних (посилання за останні 5 років)					
		Web of Science кількість посилань / h-індекс		Scopus кількість посилань / h-індекс		Google Scholar кількість посилань / h-індекс	
1	Сергій ОНИЩЕНКО	0	0	36	3	81	3

