

УДК 624.072.2

**ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕВОЇ СІТКИ**

Канд. техн. наук О. О. Калмиков, асп. В. В. Шматко

**PLANNING OF AN EXPERIMENT TO DETERMINE THE PHYSICO-MECHANICAL
CHARACTERISTICS OF STEEL MESH**

PhD (Tech) O. Kalmykov, Postgraduate Student V. Shmatko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336379>



***Анотація.** У статті подано науково обґрунтовану методику експериментального визначення фізико-механічних характеристик сталевих тросових сіток, які застосовують як гнучкі мембранні елементи в сучасних конструкціях. Зроблено огляд світових підходів для випробувань мембранних матеріалів, включаючи двовісні, рамкові та продавлювальні методики. Запропоновано конструкцію стенда, методику навантаження та систему вимірювань, що дає змогу врахувати ортотропну поведінку сітки та забезпечити її правильне моделювання в інженерному розрахунку.*

Ключові слова: сталеві тросові сітки, фізико-механічні характеристики, ортотропність, експериментальні випробування, навантаження-прогин, випробувальна установка, мембранний елемент.

Abstract. The article presents a scientifically grounded experimental methodology for determining the physico-mechanical characteristics of steel cable meshes, which are increasingly used as flexible membrane elements in modern architectural and engineering structures. The research addresses a gap in standardized approaches to characterizing such materials, which exhibit pronounced orthotropic behavior due to the structural arrangement of steel cables in woven or ferruled configurations.

A comprehensive review of international testing practices for membrane materials was conducted, including biaxial tensile tests, central deflection (bulge) tests, uniaxial tear tests, and puncture resistance methods. The article establishes strong methodological analogies between steel meshes and other anisotropic membrane materials such as technical fabrics, PVC membranes, and biological tissues, all of which require specialized multi-axial testing for accurate modeling.

The proposed methodology involves securing mesh samples in a rigid test frame and subjecting them to stepwise loading, simulating realistic stress conditions encountered in architectural and structural applications. The article outlines the design of the test rig, including flexible roller-based edge restraints that simulate hinged boundary conditions, force application protocols using incremental weights, and measurement strategies using force sensors and displacement tools. Particular attention is given to capturing orthotropic membrane behavior, including differential stiffness in longitudinal and transverse directions, shear deformability, and geometric nonlinearity under large deformations.

Importantly, the article provides a modeling framework based on treating steel meshes as orthotropic membranes within structural analysis software, such as RFEM, using experimentally derived material constants. This allows structural designers to integrate steel mesh components more reliably into load-bearing systems. The methodology aims to bridge the gap between manufacturer data and real-world performance, offering a practical verification tool for both product development and structural validation.

The conclusions emphasize the scientific and engineering benefits of adopting a unified testing protocol for steel meshes, aligning with global standards and improving structural safety and economic efficiency. Further experimental work is planned to validate the method with physical testing of various mesh configurations, ultimately leading to standardized procedures for the industry.

Keywords: Steel cable meshes, physico-mechanical properties, orthotropy, experimental testing, load-deflection behavior, test rig, membrane element.

Вступ. Гнучкі сітчасті огороження на основі сталевих тросів набувають дедалі більшого поширення в сучасних інженерних і архітектурних конструкціях. Зокрема, тросові сітки застосовують у зоопарках для вольєрів і авіаріїв, архітектурі як прозорі фасадні системи та огорожі, а також для забезпечення безпеки (антивандальні та протизалізні сітки) [1]. Такі сітки поєднують високу міцність і довговічність нержавіючої сталі з гнучкістю і прозорістю, що

забезпечує мінімальну візуальну перешкоду та доступ світла. Завдяки конструкції з переплєтених сталевих канатів сітка може набувати криволінійних форм і витримувати значні навантаження без руйнування, розподіляючи зусилля між тросами. Водночас особливістю роботи такої сітки є її ортотропність – різна жорсткість і несуча здатність уздовж двох основних напрямків плетення (вздовж і поперек). Це означає, що поведінка матеріалу сітки подібна до

мембрани чи тканини, де властивості в «основі» і «утоку» відрізняються. Для адекватного прогнозування напружено-деформованого стану сітчастих конструкцій потрібні спеціальні моделі матеріалу (ортотропні, нелінійно-пружні) і достовірні параметри, отримані експериментально.

На сьогодні виробники пропонують широкий діапазон типорозмірів сталевих тросових сіток. Наприклад, стандартні системи X-TEND від Carl Stahl доступні з комірками (ромбічними отворами) від 20 до 200 мм і канатами діаметром 1.5, 2.0 або 3.0 мм [2]. За даними виробника HMJ Zoo Design, тросові сітки можна виготовляти для конкретних вимог – діаметр тросів від ~1,2 до 3,5 мм, розміри комірок від 20×20 до 150×150 мм [3]. Міцність таких сіток є доволі високою: наприклад, сітка з канатом діаметром 1,6 мм з розміром комірки ~30×30 мм витримує ~2,1 кН (~480 фунтів) розривного навантаження, а для каната 3,2 мм і комірки ~120×120 мм міцність становить близько 7,1 кН. Відомо, що тросові сітки здатні працювати як під статичними, так і динамічними навантаженнями. У літературі описано, зокрема, дослідження сітчастих огорожень від каменепадів, де випробування проводять із падінням важкого тіла для оцінювання енергоємності сітки [4]. Такі сітки (ланцюгові та тросові) в експериментах поглинають енергію до десятків тисяч кілоджоулів, демонструючи високі деформаційні здібності до та після пластичного деформування. Для перевірки працездатності під дією вітрових навантажень дослідники споруджують фрагменти фасадів розміром 5×9 м із натягнутими тросами діаметром ~14 мм і скляними панелями [5]. Повномасштабні експерименти дають змогу врахувати непередбачувані особливості роботи формоактивних сіткових структур під навантаженням. Для гнучких мембранних матеріалів (тканин, ПВХ-мембран) стандартною практикою є біаксіальні випробування – одночасне розтягування

зразка у двох перпендикулярних напрямках [6], що необхідно для визначення анізотропних характеристик (модулів пружності вздовж основи і утку, модулів зсуву тощо). Випробування тросових сіток є аналогічно важливими, адже дають змогу експериментально отримати ефективні параметри матеріалу сітки, необхідні для її правильного врахування з проєктуванням.

Отже, актуальним науково-практичним завданням є розроблення методики випробування сталевих сіток, яка враховує специфічний характер їхньої роботи (ортотропність, геометричну та фізичну нелінійність) і дає змогу визначити потрібні для інженерних розрахунків характеристики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Двовісні розтягувальні випробування мембран

Для точного визначення властивостей мембранних матеріалів, особливо анізотропних, широко застосовують двовісні розтягувальні випробування (biaxial tensile tests). На відміну від стандартного одноосьового розриву, двовісне навантаження дає змогу одночасно прикладати напруження у двох перпендикулярних напрямках, що відтворює реальні умови роботи мембран (тканин, плівок тощо). Ще в 1991 році було описано спеціальний стенд для випробування мембранних біоматеріалів під двовісним навантаженням: зразок закріплювали по периметру (початково квадрат 12–25 мм) і сили прикладали до чотирьох точок на кожному боці, забезпечуючи розтяг до ~80 % початкової довжини [7]. У таких установках вимірюють зусилля (через датчики сили) і двовісні деформації центральної області зразка, щоб визначити пружні константи (модулі пружності в напрямках основи й утку, коефіцієнти Пуассона) та інші характеристики матеріалу в умовах площинного напруженого стану.

Двовісні випробування стали фактично необхідним інструментом для оцінювання властивостей гнучких матеріалів, що працюють під багатовісним навантаженням. Зокрема, у біомедичних дослідженнях м'яких тканин (шкіра, судини, біомембрани) встановлено, що такі тканини є сильно анізотропними, тому одновісні тести не відображують їхню поведінку повною мірою. Планарні двовісні тести дають змогу випробувати зразок за навантажень, близьких до фізіологічних, і є суттєвими для правильного оцінювання механіки біоматеріалів [8]. Аналогічно, у галузі полімерних плівок і еластомерів двовісне розтягування використовують для побудови моделей матеріалу та перевірки їхньої придатності, оскільки деформації в умовах реальної експлуатації (наприклад у гумових мембранах, балонах тощо) є багатовісними.

Архітектурні тканини і ПВХ-мембрани також випробовують двовісно, адже вони мають різні властивості за напрямком основи та утоку (ортотропія). Для таких матеріалів розроблено стандартизовані методики. Зокрема, впроваджено міжнародні стандарти: японський стандарт MSAJ/M-02-1995 став першою широко визнаною методикою двовісного розтягу мембран [9]. На основі нього нещодавно розроблено ISO 13118:2024 [10] і відповідні європейські норми (наприклад DIN EN 17117 [11]), які визначають порядок визначення пружних характеристик тканин за двовісного навантаження. У таких тестах зазвичай застосовують хрестоподібні зразки або квадратні полотна, затиснуті по периметру рами і навантажені у двох напрямках із заданим співвідношенням напружень. Наприклад, стандарт MSAJ передбачає випробування за кількох співвідношень навантаження «основа:уток» (1:1, 2:1, 1:2 тощо) для повної характеристики ортотропного матеріалу. Це дає змогу визначити модулі пружності і міцність у кожному напрямку, а також урахувати

вплив взаємодії ниток основи і утоку. Дослідники відзначають, що одноосьові випробування не здатні повністю охарактеризувати такі матеріали, тому двовісні тести є критично важливими [12]. Практика показує, що міцність і деформаційні характеристики за одночасного навантаження двома осями можуть відрізнятися від результатів окремих одноосьових випробувань. Так, у роботі [12] продемонстровано, що міцність тканини за рівномірного двовісного розтягування (1:1) виявляється вищою за міцність по утоку, але трохи нижчою за міцність по основі, тобто проміжною між двома одноосьовими значеннями. Це підтверджує необхідність двовісних тестів для правильного прогнозування поведінки мембранних матеріалів.

Випробування натягнутих мембран на прогин і продавлювання

Аналогічно до сталеві сітки, матеріали мембранного типу часто випробовують, закріпивши зразок по контуру жорсткої рами і навантажуючи його перпендикулярно до площини (на прогин або продавлювання). Такі експерименти імітують дію розподіленого навантаження (тиск вітру, гідростатичний тиск, ударний вплив) на натягнуту мембрану. Метод булевого (надувного) тесту є класичним прикладом: круглу або прямокутну мембрану затискають по краю і прикладають тиск, спричиняючи випинання (буління) зразка. За виміряною залежністю тиск–прогин можна визначити пружні характеристики тонких плівок і мембран, зокрема модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та залишкові напруження [13]. Булевий тест широко використовують для тонких полімерних плівок і покриттів (наприклад для визначення властивостей тонких металевих мембран у МЕМС або пластикових плівок) і вважають стандартною методикою для таких матеріалів. Він дає змогу випробувати матеріал у стані двовісного розтягування за дії рівномірного тиску, що подібне до умов

експлуатації (наприклад надуті оболонки, мембранні датчики тощо).

Існують стандартизовані варіанти таких тестів. Зокрема, у текстильній промисловості відомий тест на розрив через прорив (burst test), де зразок тканини затискають у кільцевому затискачі і продавлюють сталюю кулькою або гідравлічною мембраною до розриву. На класичному приладі Маллена (Mullen Burst Tester) використано гідравлічний тиск для розриву тканини і визначення її міцності на прорив. Для технічних текстильних мембран і геомембран ASTM розробив випробування на прокол: наприклад, стандарт ASTM D4885 регламентує випробування широких смуг геосинтетичних мембран, закріплених по краях, шляхом їх розтягування до розриву за дії нормального навантаження [14]. Цей метод оцінює ефективну міцність полотна з урахуванням фіксації по ширині, що більш наближено до умов закріплення матеріалу в конструкції, ніж звичайний вузький зразок. Інший близький метод – випробування на прокол (puncture test) геотекстилю та сіток, де закріплений на рамі матеріал продавлюють штирем або пуансоном до прориву. Такі випробування показують опір мембрани локалізованому навантаженню, який залежить від розтягуваності та міцності матеріалу.

У контексті сталевих сіток, що розглядають як мембранні елементи, надзвичайно актуальними є випробування на концентроване продавлювання. У літературі описані численні експерименти, де зразок сітки або гнучкої сітчастої мембрани закріплюють по периметру, а в центрі до нього прикладають зосереджене навантаження (наприклад через плиту або сферичний вантаж). Показово, що такі тести давно застосовують для оцінювання протизсувних і протикамнепадних систем: випробовують гнучкі сітчасті покриття, як протиігріничі укріплення, натягуванням сітки в рамі і статичним або динамічним навантаженням посередині [15].

Дослідження показали, що жорстко закріплена по краях сітка під зосередженим навантаженням демонструє нелінійну залежність «навантаження-прогин»: спочатку м'який прогин за рахунок вигину елементів, а далі різке зростання жорсткості з натягуванням сітки. Виявлено два основні механізми руйнування таких систем – прорив (прокол) сітки в місці прикладання навантаження та зсувне прослизання сітки по краях кріплення. Для їх урахування стандартизовано методики випробувань. Наприклад, в Італії введено стандарт UNI 2012, що описує протокол випробування гнучких сіток під локальним навантаженням. Отже, метод закріплення зразка в рамі і продавлювання його в центрі є загальноприйнятим для оцінювання міцності та жорсткості мембранних систем (у тому числі сіток) за позаплощинного навантаження.

Порівняння з одноосьовими розривними випробуваннями

Традиційні одноосьові розривні випробування (uniaxial tensile tests) залишаються базовим методом визначення міцності і деформативності матеріалів. У стандартах (наприклад ISO 1421 для технічних тканин) зазвичай використовують два варіанти: випробування смужки (strip test) і захоплення (grab test) [16]. У випробуванні смужки зразок заданої ширини затискають на повну ширину в розривну машину і розтягують до розриву, визначаючи міцність і відносне подовження. Метод захоплення передбачає затиснення лише частини ширини (імітує реальне захоплення тканини), що дає змогу оцінити міцність з урахуванням структури полотна (наявність незакріплених країв). Такі одноосьові тести стандартизовані й широко застосовувані (ISO 1421, ASTM D5035 тощо). Проте для мембранних матеріалів із вираженою ортотропією результати одноосьових випробувань є недостатніми. Одноосьово можна визначити міцність і модуль вздовж окремих напрямків (наприклад лише основи чи лише утку

тканини), але міжосьова взаємодія та зсувні характеристики залишаються неврахованими. До того ж в одноосьовому тесті не відтворено реальний напружений стан, коли матеріал одночасно розтягнений у двох напрямках. У літературі зазначено, що для технічних текстилів результати одноосьових і двовісних випробувань можуть значно розрізнятися [12]. Зокрема, міцність за двовісного навантаження нерідко є нижчою за очікувану із сумування окремих розривних зусиль, оскільки навантаження розподілено інакше, а деформації ниток взаємопов'язані.

Іншим різновидом розривних випробувань для мембран є тести на розрив по шву чи надрізу (tear tests). Для тканин стандартно застосовують випробування на розрив із надрізом (наприклад трапецієподібний тест на роздирання), де вимірюють зусилля, необхідне для розповсюдження розриву через полотно. Це важливо для матеріалів на основі сітки або тканини, оскільки початковий розрив може далі збільшуватися між нитками. Такі тести доповнюють картину міцності мембрани, але теж не характеризують її поведінку під складним навантаженням. Тому повної картини можна досягти лише в такому поєднанні: одноосьові випробування дають базові міцнісні показники, двовісні – пружність і реальні робочі деформації, рамкові – зсувну гнучкість, а випробування на прогин/прокол – стійкість до позаплощинних сил. Кожен із методів доповнює інші, і тільки комплексний підхід дає змогу адекватно описати фізико-механічні характеристики ортотропної мембрани.

Ортотропія та анізотропія: урахування в методиках

Мембранні матеріали, такі як тканини, технічні плівки, біологічні мембрани та сітки, за своєю природою часто ортотропні або анізотропні, тобто їхні властивості розрізняються за різними напрямками в площині. Наприклад, у тканинах міцність і жорсткість вздовж ниток основи зазвичай

відрізняється від аналогічних показників уздовж утку, а взаємне переплетення ниток спричиняє суттєву зсувну податливість матеріалу. Сталева сітка як випробуваний матеріал також є яскравим прикладом ортотропного середовища: уздовж сталевих дротів вона має високу осьову жорсткість і міцність, тоді як за деформацій, що змушують дроти зближуватися або розходитися (зсув сітки, зміна кута комірок), опір значно менший. Крім того, залежно від конструкції сітки (плетена, зварна, ромбічна тощо) її поведінка може бути істотно анізотропною (різні характеристики по двох головних осях).

З огляду на це, експериментальні методики мають урахувати ортотропність. Двовісні тести спеціально створені для вимірювання пружних констант ортотропних мембран – вони дають модуль пружності і міцність по кожній осі та коефіцієнти взаємного впливу (наприклад «м'якість» утку за натягнутої основи). Одночасно з аналітичним моделюванням і чисельним розрахунком ортотропних оболонних матеріалів необхідно знати повний набір констант: E_x , E_y (модулі Юнга), G_{xy} (модуль зсуву) і коефіцієнти Пуассона ν_{xy} , ν_{yx} . Перелічені вище методики саме й націлені на експериментальне визначення цих параметрів. Зокрема, стандарт MSAJ/M-02-1995 рекомендує п'ять різних співвідношень навантажень для побудови повної поверхні «напруження-деформація» ортотропної мембрани [9]. Отже, серія двовісних випробувань дає змогу знайти пружні модулі E_x , E_y (зі співвідношень 1:0 і 0:1), коефіцієнти Пуассона (зі співвідношення 1:1, вимірюючи поперечні деформації) і модуль зсуву G_{xy} (із випробувань типу picture-frame або еквівалентних двовісних із несиметричним навантаженням). Без таких даних модель поведінки сітки чи тканини буде неповною. Тому підхід із натягуванням зразка на раму і багатоосьовим навантаженням є єдино

правильним для повноцінного опису анізотропних мембранних матеріалів.

Слід зазначити, що в деяких випадках для опису ортотропії застосовують спрощені підходи, наприклад визначають пружні константи з кількох одноосових випробувань зразків, вирізаних під різними кутами до ниток (методика підкутових зразків). Однак для сильнозалежних від напрямку матеріалів цей підхід менш точний і не відображує взаємодії ниток під навантаженням [12]. Тому сучасні норми й дослідження одностайно сходяться на доцільності саме багатовісного випробування.

Аналогії та обґрунтування методики для сталевих сітки

Методика випробування сталевих сітки, закріпленої на жорсткій рамі з прикладенням навантаження (на розтяг або прогин) цілком спирається на напрацювання у сфері гнучких мембран. Сталеву сітку можна розглядати як особливий випадок технічної мембрани: вона тонка, працює переважно на розтягнення уздовж дротів і майже не чинить опору згину окремих елементів. Це подібно до поведінки тканин або сітчастих полімерних мембран, де основний опір – натяг уздовж волокон, а гнучкість – внаслідок зсуву між волокнами. Отже, для сталевих сіток застосовані ті самі експериментальні підходи, що й для текстильних архітектурних мембран чи геосинтетичних армувальних сіток.

По-перше, двовісне розтягування сітки (закріплення її по периметру рами та прикладення розтягувальних зусиль у двох напрямках) дає змогу визначити її ефективну розтяжність і міцність у кожному напрямку комірки, а також оцінити взаємний вплив натягу вздовж двох осей. Такі тести для сталевих сіток описані, зокрема, у контексті гірничої справи: проводили порівняльні випробування різних типів плетених і зварних сіток під двовісним навантаженням для оцінювання їхньої придатності як утримуючих мембран у шахтах [15]. Результати цих досліджень

підтверджують, що параметри надійності сітки (наприклад навантаження, за якого вона досягає заданого прогину чи руйнування) залежать від напруження в обох напрямках сітки одночасно, а не лише від міцності окремого дроту.

По-друге, метод рамкового зразка з центральним навантаженням для сталевих сітки безпосередньо аналогічний до випробувань тканин на прогин і гнучких бар'єрних систем. Наприклад, у випробуваннях гнучких протикамнепадних систем сітчасті панелі 2×2 м закріплювали в рамі і навантажували концентрично, вимірюючи переміщення і напруження в дротах. Такі експерименти дають змогу виявити мембранний ефект: під навантаженням сітка спочатку прогинається зі згинанням дротів, а за великих переміщень дроти випрямляються і переймають значні осьові зусилля, різко підвищуючи несучу здатність (це явище називають тентовим ефектом або мембранною дією в інженерних конструкціях) [15]. Аналогічний мембранний ефект відомий і для тканинних мембран, і для легкого армованого бетону – коли велика прогинна деформація призводить до роботи на розтяг і підвищує міцність конструкції. Отже, випробування сталевих сіток на прогин у рамі дає змогу кількісно оцінити цей ефект (залежність навантаження від прогину) і порівняти її з мембранними матеріалами.

По-третє, завдяки численним аналогіям із тканинами методика випробувань сітки може бути обґрунтована посиленнями на стандарти для інших мембран. Наприклад, принцип закріплення сітки у квадратній рамі та рівномірного розтягнення відповідає підходам стандарту MSAJ для тканин [9]. А спосіб навантаження сітки сферичним індентором у центрі відповідає стандартним випробуванням на прокол текстильних або полімерних мембран (ASTM D4833, D5748 тощо). Тобто метод, застосований до сталевих сіток, не є чимось унікальним – він

є адаптацією перевірених експериментальних схем, використовуваних для оцінювання міцності і жорсткості гнучких оболонки.

І нарешті, залучення аналогій із різних матеріалів (тканин, ПВХ-мембран, біомембран) підсилює наукову обґрунтованість випробувань сталевих сіток. Якщо результати експериментів на сітці інтерпретувати з позицій теорії мембранної дії, розробленої для тканин, і порівняти з поведінкою інших відомих мембранних систем, це дасть змогу коректно сформулювати інженерні висновки. Уже зараз у літературі простежують тенденцію розглядати сталеві сітки як мембрани для стабілізації схилів або архітектурні оболонки. Наприклад, гнучкі фасадні сітки випробовують на стійкість до вітрового навантаження аналогічно до ПВХ-мембран фасадів ETFE, вимірюючи прогини та натяг в елементах. Застосування теоретичних моделей, створених для тканин (ортотропні моделі з урахуванням напружено-деформованого стану), до сталевих сіток уже підтверджено в окремих дослідженнях – вони адекватно прогнозують несучу здатність сітки за великих прогинів.

Огляд літературних джерел показує, що існує цілий арсенал експериментальних методик для визначення фізико-механічних характеристик мембранних матеріалів – від одноосових розривних випробувань до двовісних тестів, рамкових зсувних методик і випробувань на прогин. Усі вони розроблені з урахуванням анізотропної природи таких матеріалів і доповнюють один одного. Сталева сітка, будучи ортотропною мембранною структурою, цілком підпадає під ці підходи. Використання аналогій із тканинами, ПВХ-плівками та біомембранами не лише виправдане, але й необхідне для коректної інтерпретації результатів: воно підтверджує, що методика з натягуванням сітки на раму та навантаженням її на розтяг/прогин є науково обґрунтованою і узгодженою зі світовою практикою

випробування мембран. Такий міждисциплінарний підхід забезпечує високу достовірність отриманих характеристик і сприяє включенню сталевих сіток до загальної класифікації мембранних матеріалів в інженерній практиці.

Визначення мети і завдання дослідження.

Метою роботи є розроблення експериментальної методики визначення фізико-механічних характеристик сталевих тросових сіток на основі аналізу роботи і досвіду аналогічних випробувань, а також обґрунтування розміру і конструкції установки для випробувань. Для досягнення цієї мети вирішено такі основні завдання:

1. Проаналізувати сфери застосування і роботу сталевих тросових сіток за літературними джерелами; виявити особливості їхнього деформування (ортотропність, залежність жорсткості від натягу тощо) і наявні підходи щодо випробувань сітчастих і мембранних матеріалів.

2. Запропонувати конструкцію стенда (установки) для випробувань фрагмента сітки в лабораторних умовах, вибрати оптимальні параметри стенда (мінімальні розміри зразка, схема закріплення країв, спосіб навантаження), щоб результати можна було екстраполювати на реальні конструкції.

3. Розробити методику експерименту: порядок підготовки зразка сітки, початкового натягування, прикладання зовнішнього навантаження (циклічно, з наростанням), а також методи вимірювання деформацій (прогинів) і зусиль у сітці.

Основна частина дослідження. Як видно із результатів огляду аналогічних досліджень, для коректного опису фізико-механічних властивостей ортотропної мембрани необхідно знати значення набору матеріальних констант (рис. 1). Застосування методики моделювання сталевих сіток у вигляді мембран підтверджено рекомендаціями виробників програмного забезпечення, наприклад у

довідниках Dlubal вказано, що для моделювання кабельних сіток доцільно використовувати поверхневі елементи з еквівалентними ортотропними властиво-

стями, які відповідають параметрам сітки за даними виробника, із наступним застосуванням формознаходження для введення попереднього натягу (рис. 2) [17].

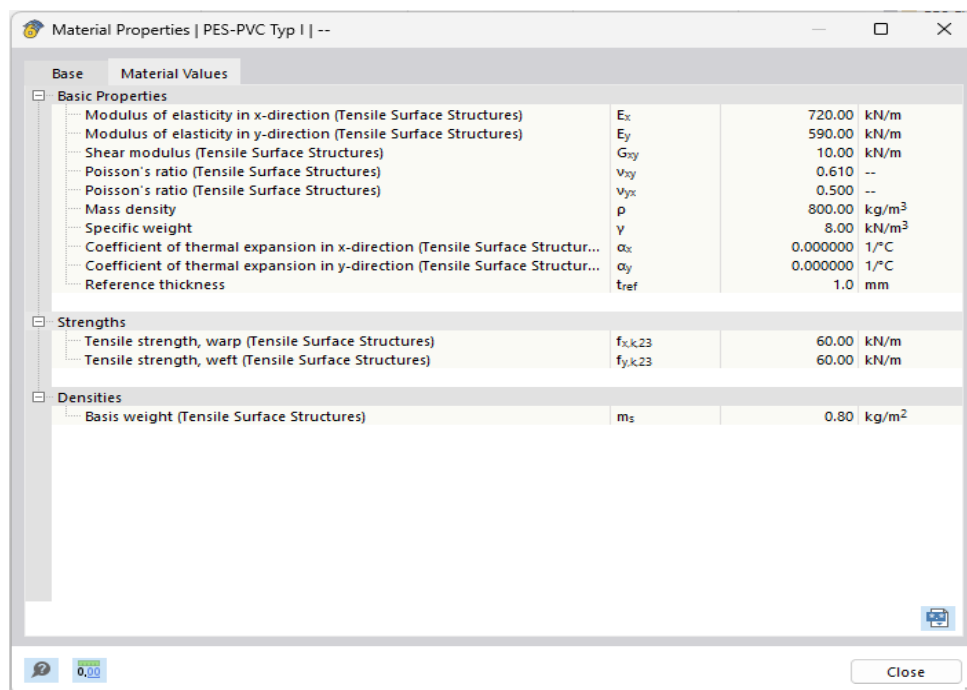


Рис. 1. Приклад матеріальних констант ортотропної мембрани, необхідних для визначення матеріалу в програмі RFEM6

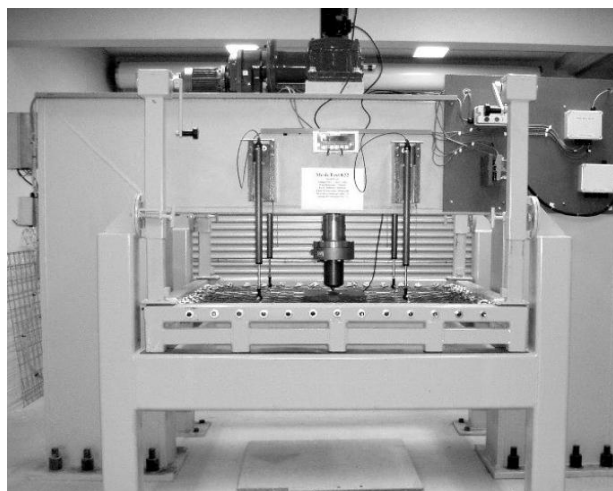
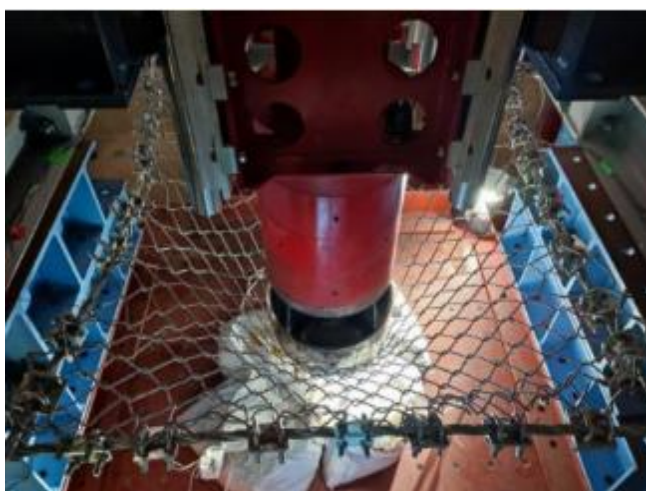


Рис. 2. Приклади розроблених експериментальних стендів для двовісних випробувань металевих сіток:
а – стенд, розроблений у Японії; б – стенд, розроблений в Австралії

Виходячи з огляду методик і способів випробувань, можна виділити декілька значущих прикладів експериментального визначення властивостей матеріалу металевих сіток.

Розробляючи власну методику, був урахований досвід розроблення саме цих експериментальних установок.

Об'єктом дослідження є гнучка сітка, сплетена зі сталевих канатів (тросів). Троси виготовлено з корозійностійкої сталі

(зазвичай AISI 316) і з'єднано між собою у вузлах за допомогою обтискних втулок (ферул), у такий спосіб утворюється дрібновічкова сітка типу *ferrule mesh*. Діаметр тросів, як зазначено у вступі, може складати від ~1,5 до 3,5 мм [3]. Від розміру троса та кроку плетіння залежить розмір комірки сітки: типовий діапазон – від 20–30 мм (для дрібних сіток із тонкого каната) до ~150–200 мм (для крупних сіток із товстого каната) (рис. 3) [2, 3].



Рис. 3. Зовнішній вигляд зразків сіток:
а – фрагменти сіток у транспортному положенні;
б – комірки сіток у робочому положенні

Зважаючи на розміри реальних конструкцій із використанням металевих сіток, визначено, що мінімальний розмір досліджуваного зразка складає 1×1 м. У той же час з урахуванням необхідності оцінити масштабний фактор зміни результатів залежно від розміру зразка доцільним є випробування щонайменше трьох типорозмірів - 1×1 , 1.5×1.5 і 2×2 м. Передбачено, що такі розміри дадуть змогу відслідкувати динаміку зміни властивостей матеріалу залежно від розміру фрагментів.

Для проведення експериментальних випробувань необхідно виготовити

спеціальну рамну установку, щоб закріпити зразок сітки розміром до 3×3 м і навантажувати його в контрольований спосіб. Каркас установки доцільно виконати з гарячекатаного сталевого профілю. Горизонтальні елементи рами мають забезпечувати достатню жорсткість по периметру. Вертикальні опори можуть бути розбірними, щоб полегшити монтаж зразка.

На рис. 4 показано загальний вигляд випробувальної установки (3D-модель) з основними конструктивними елементами.

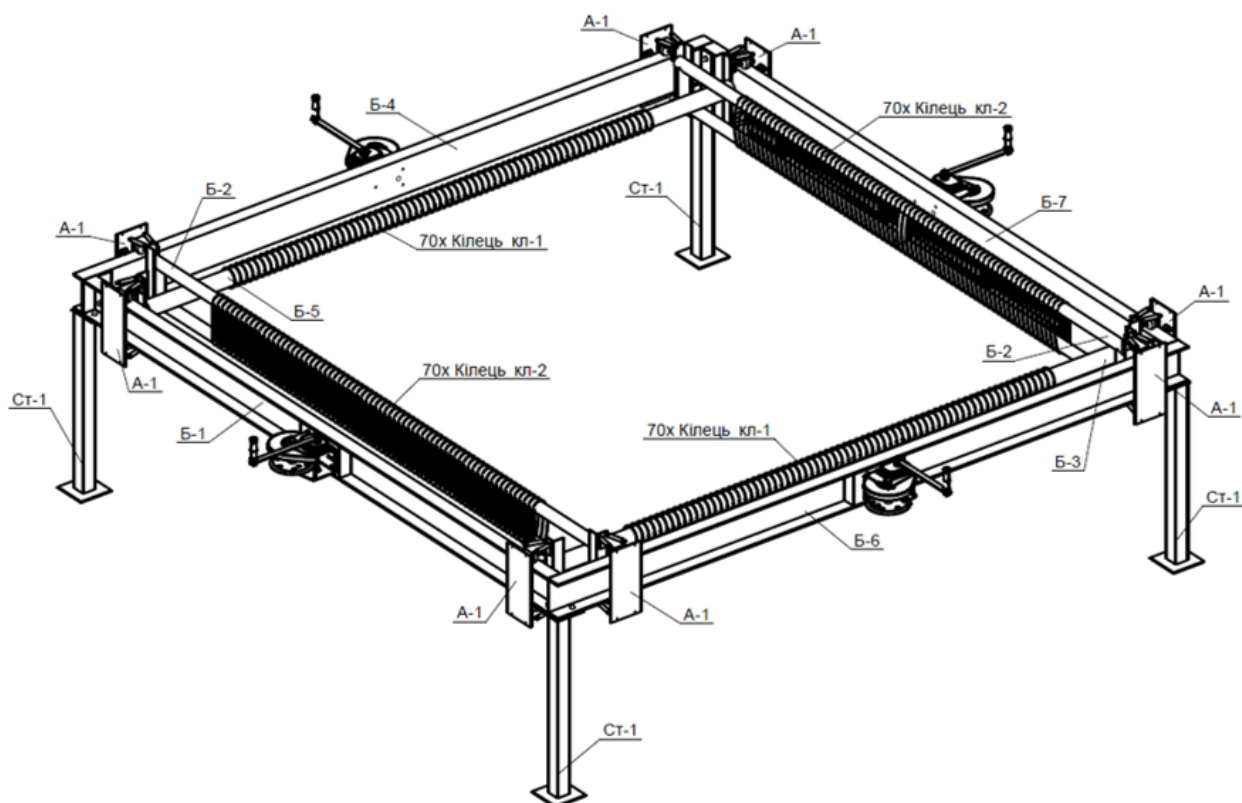


Рис. 4. Загальний вигляд випробувального стенда для сітки (фрагмент робочого креслення з позначенням елементів: Б-1...Б-7 – балки рами; А-1 – напрямні елементи роликів; Ст-1 – сталеві стояки-опори тощо)

Як видно з рис. 4, рама має суцільну квадратну форму. По краях рами розташовані напрямні елементи з роликами (позначення А-1), призначені для кріплення і натягування сітки. Вони виконують роль своєрідних пружинно-роликових вузлів. Краї сітки закріплюють на рухомих валах, що мають змогу рухатись незалежно один від одного і дають змогу сітці значно зміщуватися з навантаженням. Це рішення імітує шарнірне (рухоме) закріплення замість жорсткого затиснення, забезпечуючи рівномірніший розподіл зусиль і попереджаючи локальні розриви в кутах. Для установа зразків у робоче положення на кожній із чотирьох сторін установки необхідно установити пристрій для натягу, наприклад ручну або гідравлічну лебідку з допустимим зусиллям 1500 кг

кожна. До того ж у двох взаємоперпендикулярних напрямках необхідно встановити датчики зусиль (динамометри), які будуть фіксувати тягові зусилля вздовж кожного краю сітки.

Для моделювання локального навантаження необхідно передбачити можливість навантаження мірними вантажами. Навантаження необхідно прикладати в центрі фрагмента, що будуть випробувати. Навантаження необхідно збільшували ступінчасто – з кроком приблизно 5 кг, до максимально ~50 кг (для безпечної роботи зразка). Після досягнення максимального навантаження необхідно виконати плавне розвантаження. Такий цикл слід виконати не менше шести разів.

Під час експерименту необхідно знімати показники вертикального прогину

сітки в центрі під штампом, зусилля вздовж країв сітки в поздовжньому (X) і поперечному (Y) напрямках; а також фіксувати, за наявності, зміну геометричних розмірів сітки (розтягування між вузлами кріплення). Для вимірювання прогину необхідно використовувати лінійку, будівельний метр або лазерний далекомір, закріплений на рамі під сіткою. Таке експериментальне оснащення дасть змогу точно зафіксувати складний характер деформування гнучкої сітки під навантаженням.

Зусилля N_x і N_y необхідно реєструвати електронними динамометрами, встановленими у пружних вузлах кріплення з двох перпендикулярних сторін сітки. Зміну ширини та довжини сітки (B_x , B_y) необхідно відстежувати на кожному кроці прикладеного навантаження.

Отже, розроблена експериментальна методика теоретично буде давати змогу визначити необхідні дані для налаштування моделі сітки як ортотропної мембрани.

Висновки

1. Опрацьовано світовий досвід у сфері випробувань ортотропних мембран. На основі цього огляду розроблено науково обґрунтовану методику випробування сталевих тросових сіток, що включає конструкцію стенда, схему навантаження і систему вимірювань.

2. Запропоновано конструкцію випробувального стенда для випробування фрагментів сіток з урахуванням реальної схеми роботи і масштабного фактора,

зберігаючи при цьому невеликі зручні в роботі габаритні розміри зразків.

3. Розроблено підхід для моделювання сітки як ортотропної мембрани, який дає змогу включати сітку в розрахункові моделі, використовуючи стандартні елементи оболонки. Зокрема, у програмному комплексі RFEM 6 рекомендовано моделювати сітку як поверхню з ортотропною або тканинною моделлю матеріалу, задаючи еквівалентні характеристики за даними виробника та результатами випробувань. Запропонована методика випробувань може бути використана для будь-яких типів тросових сіток задля уточнення їхніх розрахункових параметрів. Виробники сіток і проєктувальники конструкцій отримують інструмент для верифікації своїх продуктів і рішень. Отже, урахування реальної роботи сітки (за експериментом) може дати суттєвий економічний ефект і підвищити надійність конструкцій.

Перспективи подальших досліджень. Заплановано провести експериментальне дослідження зразків сіток за розробленою методологією. Застосування розробленої методики в проєктній практиці – наступний крок для стандартизації випробувань тросових сіток. Упровадження лабораторних тестів фрагментів сітки перед будівництвом повномасштабних споруд сприятиме підвищенню точності розрахунків і надійності унікальних інженерних рішень із сталевими сітками.

Список використаних джерел

1. Wiremesh.co.nz. Green facades X-tend mesh 534. URL: https://www.wiremesh.co.nz/e_productshow/?534-Green-facades-X-tend-mesh-534.html#:~:text=One%20common%20application%20for%20this,security%2C%20aesthetic%20appeal%2C%20and%20durability (дата звернення: 12.06.2025).
2. Carl Stahl DecorCable. «X-TEND® Stainless Steel Cable Mesh». Carl Stahl DecorCable. URL: <https://decorcable.com/stainless-steel-mesh-x-tend/#:~:text=we%20can%20form%20various%20shapes,5%2C%202%2C%20or%203%20mm> (дата звернення: 12.06.2025).
3. HMJ Zoo Design. «Stainless Ferruled Net». HMJ Zoo Design. URL: <https://hmjzoodesign.com/product/stainless-ferruled-net/#:~:text=We%20can%20offer%20>

- configurations%20that,20%C3%9720%20mm%20to%20150%C3%97150%20mm (дата звернення: 12.06.2025).
4. Sugimoto M., Koizumi K., Arita T., Horiguchi T. Experimental study on structural behaviour of steel wire mesh under impact loading. *E3S Web of Conferences*, 2023, 415, 06017. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341506017> (дата звернення: 12.06.2025).
5. Celiker E. Y., Celik O. C. From design to experiment: proposed design procedures for full-scale structural testing of flat cable-net facades. URL: <https://www.facadetectonics.org/papers/from-design-to-experiment#:~:text=facade%20is%20designed%20as%205%2C136,net%20facade%20are%20determined%20and> (дата звернення: 12.06.2025).
6. Wikipedia contributors. Biaxial tensile testing. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Biaxial_tensile_testing#:~:text=Testing%20a%20material%27s%20tensile%20strength,along%20two%20perpendicular%20axes (дата звернення: 12.06.2025).
7. Nielsen P. M., Hunter P. J., Smaill B. H. Biaxial testing of membrane biomaterials: testing equipment and procedures. *J Biomech Eng*. 1991 Aug;113(3):295-300. DOI: 10.1115/1.2894887.
8. TestResources. Biaxial Testing of Membrane Biomaterials: Testing Equipment and Procedures. URL: <https://www.testresources.net/applications/test-types/biaxial-test#:~:text=Soft%20biological%20tissues%20exhibit%20complex,properties%20under%20realistic%20loading> (дата звернення: 12.06.2025).
9. MSAJ. MSAJ/M-02-1995. Методика двовісного розтягування матеріалів. MSAJ; 1995. Токіо, Японія.
10. Міжнародна організація зі стандартизації (ISO). ISO 13118:2024. Текстиль. Двовісні властивості тканин. Визначення еластичних властивостей за допомогою хрестоподібної проби. ISO; 2024.
11. Німецький інститут стандартизації (DIN). DIN EN 17117-1:2019. Текстильні матеріали з покриттям з гуми або пластмаси. Методи механічних випробувань при двовісних навантаженнях. Ч. 1. Властивості жорсткості на розтягнення. DIN; 2019.
12. Bletzinger K.-U., Oñate E., Kröplin B. (Eds). VIII International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures. Structural Membranes 2017. Chen W. J., Shi T. B., Gao C. J., Hu J. H., Zhao B. Experimental Method for Biaxial Tensile Strength of Fabrics and Preliminary Investigations. 2017. Шанхай, Китай.
13. Grigoras C. C., Zichil V., Ciubotariu V. A., Cosa S. M. Machine Learning, Mechatronics, and Stretch Forming: A History of Innovation in Manufacturing Engineering. *Machines*. 2024. 12(3). 180. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines12030180> (дата звернення: 12.06.2025).
14. ASTM International. ASTM D4885-01(2018). Standard Test Method for Puncture Resistance of Protective Clothing Materials. ASTM; 2018.
15. Morton E., Thompson A. G., Villaescusa E., Roth A. Testing and analysis of steel wire mesh for mining application of rock surface support. In: *Proceedings of the ISRM Congress*, Lisbon, January 2007.
16. ISO. ISO 1421:2016. Rubber- or plastics-coated fabrics. Determination of tensile strength and elongation at break. ISO; 2016.
17. Dlubal Software. FAQ 004849: Як змодельовати структуру сітки з кабелів за допомогою додаткового модуля RF-FORM-FINDING. 2020. URL: <https://www.dlubal.com/en/support-and-learning/learning/videos/002087> (дата звернення: 12.06.2025).

Калмиков Олег Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.
E-mail: oleg.kalmykov@kname.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7294-4279>.

Шматко В'ячеслав Володимирович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: viacheslav.shmatko@kname.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8765-073X>.

Oleg Kalmykov, PhD (Tech), Associate Professor, Building Structures department. O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: oleg.kalmykov@kname.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7294-4279>.

Viacheslav Shmatko Postgraduate student, Building Structures department. O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: viacheslav.shmatko@kname.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8765-073X>.

Статтю прийнято 24.06. 2025 р.