

## **ВІДГУК**

рецензента

доцента кафедри Будівельних конструкцій та мостів інституту будівництва та інженерних систем Національного університету Львівська політехніка

**Крамарчука Андрія Петровича**

на дисертаційну роботу **Козака Романа Петровича**

**„Несуча здатність тонких багат шарових скляних балок”**, представленої

на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192

«Будівництво та цивільна інженерія»

### **Актуальність теми дисертації**

Будівництво постійно розвивається, пропонуючи нові технології та підходи до використання будівельних матеріалів. Все частіше можна побачити скло, як елемент несучих конструкцій. Основними недоліками скла, є його крихке руйнування та велика варіативність характеристик міцності. Ці фактори відкривають велику перспективу для дослідження скляних елементів, щоб в подальшому знайти способи точніше описати роботу таких конструкцій. В українській архітектурно-будівельній галузі досі не має стандартів для проектування скляних конструкцій, як несучих елементів.

Подана на розгляд дисертаційна робота Козака Романа Петровича у повній мірі вирішує поставлені вище запитання. Тема дисертаційної роботи є актуальною з точки зору вивчення згинаних елементів із скла на прикладі тонких багат шарових балок трьох серій різних геометричних параметрів.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами.**

Тема дисертації «Несуча здатність тонких багат шарових скляних балок» відповідає науковому напряму кафедри «Будівельних конструкцій та мостів» «Теоретичні та експериментальні дослідження звичайних та попередньо напружених залізобетонних, металевих, дерев'яних та інших конструкцій будівель, споруд, мостів і фундаментів та методів їх підсилення з врахуванням різних видів армування, бетонування, способів та

інтенсивності навантаження, дії агресивного середовища, підвищених температур», дата затвердження на Вченій раді Інституту будівництва та інженерії довкілля - 08.10.2019, протокол №3; дата уточнення теми дисертації на Вченій раді Інституту будівництва та інженерних систем - 13.06.2023, протокол №10.

**Мета і завдання дослідження** полягає у встановленні несучої здатності скляних плоских балок, що працюють на згин під дією статичного навантаження. Для досягнення мети було поставлено наступні завдання:

а) виконати дослідження міцності скляних зразків скла на розтяг при згині із різною орієнтацією зразків відносно ширини поперечного перерізу та провести експериментальні дослідження скляних балок під дією статичного навантаження на згин різних геометричних параметрів;

б) провести аналіз отриманих результатів випробувань, визначити фактори які впливають на міцність скляних згинаних балок;

в) апробувати метод кореляції цифрових зображень з уточненням параметрів його використанням та використанням користувацьких цифрових фотокамер широкого вжитку для визначення деформацій бокових поверхонь скляних балок;

г) виконати аналітичний розрахунок тонких багатопарових скляних балок та розробити рекомендації з їх проектування, впровадити результати досліджень.

Дисертантом в якості об'єкта дослідження вибрано скляні багатопарові балки, що працюють на згин. За результатами досліджень визначено їх несучу здатність.

**Методи дослідження** полягали у експериментальних дослідженнях фізико-механічних характеристик скла на розтяг при згині та визначенні несучої здатності скляних балок із використанням механічних приладів та методу кореляції цифрових зображень. Також було виконано аналіз даних експериментальних досліджень з визначенням характеристичної міцності скла на розтяг при згині за допомогою статистичного розподілу Вейбулла. За результатами досліджень проведено аналіз отриманих експериментальних

даних скляних балок різної висоти та різною кількістю шарів скла. Виконано чисельний метод скінчених елементів (МСЕ) для можливості теоретичного аналізу несучої здатності скляних балок, що працюють згин.

**Новизна наукових положень і практичне значення отриманих результатів.**

Автором отримано нові результати дослідження фізико-механічних характеристик скла на розтяг при згині. Для експериментів використано зразки із різною орієнтацією скла відносно прикладання навантаження та проведено статистичний аналіз отриманих результатів. За матеріалами дослідження отримано нові експериментальні дані несучої здатності скляних балок різної висоти та кількості шарів скла, що працюють на згин. Вдосконалено та апробовану методика використання методу кореляції цифрових зображень із використанням користувацьких цифрових фотокамер із кольоровою матрицею. Покращено методика теоретичного розрахунку скляних балок на згин із урахуванням втрати стійкості. Виконано розрахунок скляних балок за допомогою об'ємних скінчених елементів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні методики дослідження несучої здатності скляних балок на згин та впровадження методу кореляції цифрових зображень для цифрових фотокамер широкого вжитку.

Отримано Висновки Державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент) про видачу патенту на корисну модель №153096 «Установка для випробування скляних балок на чотирьохточковий згин», заява № u202205097 від 28.12.2022, опубліковано 17.05.2023. Наявні акти про впровадження результатів досліджень (Додаток А) при проектуванні: скляної багат шарової стінки консольного басейну в СПА-зоні житлового комплексу готельного типу в ур. Вишні, с. Поляниця Яремчанського району, Івано-Франківської області від ТзОВ «ПЕЛЕНЖИНІРИНГ»; скляного покриття для сучасного мультифункціонального мистецького простору шляхом нового будівництва на вул. Стефаніка, 3, у м. Львові від ФОП «Семенченко Наталія Олександрівна».

## **Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

**Актуальність вибраної теми дисертаційної роботи** обґрунтована в дисертаційній роботі у повній мірі і не викликає жодних сумнівів.

Основним елементом будь яких пролітних конструкцій є балки. Логічним, виходячи із технологічного процесу виготовлення скла, є рішення виготовляти балки із вертикальною орієнтацією листів скла до осі прикладання навантаження. Такий підхід дозволяє економити дорогий матеріал, однак має чимало недоліків, основний із яких, втрата стійкості балок із площини. Іншим недоліком, але уже скла як матеріалу – є крихкість та доволі великий розкид характеристик міцності, які враховуються великими коефіцієнтами надійності, які коливаються в межах  $1.5 \div 1.8$ . Руйнування скла проходить раптово і може наступити до появи великих прогинів тощо. Технологія триплексування дозволяє виготовляти багат шарові скляні елементи з підвищеною експлуатаційною безпекою.

Проведення комплексних наукових досліджень тонких багат шарових скляних балок на сьогоднішній день є необхідним та дозволить вирішити актуальну проблему та сприятиме появі нових типів конструкцій, які продовжать розвиток інженерно-будівельної галузі.

## **Відповідність змісту анотації основним положенням дисертаційної роботи.**

Зміст анотації в повній мірі відображає основні положення, що представлені в дисертаційній роботі, відповідає її змісту, містить основні результати проведених досліджень і дає можливість в достатній мірі оцінити наукову новизну та практичну цінність. Стиль викладення матеріалу у дисертації та анотації відповідає загальноприйнятим нормам та є достатнім для однозначного сприйняття наведених положень.

## **Особистий внесок здобувача**

Результати дисертаційної роботи отримано здобувачем особисто або за безпосередньої участі. Сформовані автором мета і завдання направлені на вирішення актуальних питань теми дослідження та свідчать про обізнаність

Козака Романа Петровича з особливостями роботи скляних конструкцій. Дисертантом опубліковано чотири публікації у співавторстві та шість тез доповідей на міжнародних конференціях.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні результати дисертаційної роботи були оприлюднені та обговорені на: 8-му Міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus» (м. Львів, 22-24 листопада 2018 р., НУ ЛП); 9-му міжнародному молодіжному 22 науковому форумі «Litteris et Artibus» (м. Львів, 21-23 листопада 2019 р., НУЛП); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Нові технології в будівництві» (м. Київ, 19 листопада 2020р., КНУБА); Міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні конструкції та інноваційні будівельні матеріали» (м. Херсон, 15 квітня 2021р., ХДАЕУ); XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Interaction of society and science: prospects and problems» (м. Лондон, Великобританія, 20-23 квітня 2021р.); 11-тій Міжнародній науковій сесії прикладної механіки (м. Бидгощ, Польща, 18 листопада 2022 р.); наукових семінарах кафедри «Будівельні конструкції та мости» Національного університету «Львівська політехніка» (2019-2023).

### **Мова і стиль роботи**

Мова і стиль виконання чітка і зрозуміла та висвітлює здобуті науково-практичні результати з використанням загальноприйнятих норм і класичних правил стилістики. Структура дисертації узгоджується з її метою і завданням дослідження та характеризується логічністю, послідовним викладенням матеріалу, науковим стилем. Значних зауважень щодо орфографічних, синтаксичних чи друкарських помилок немає. Дисертаційна робота написана грамотно, з використанням сучасних наукових і технічних термінів. Рисунки, графіки та формули оформлені відповідно до чинних стандартів, є чіткими та зрозумілими. Для кращого сприйняття складних графічних залежностей вдало використано технічні засоби, зокрема, виноски та надписи. Стиль викладення роботи відповідає вимогам до наукових праць. Істотних зауважень щодо орфографічних, синтаксичних чи друкарських

помилки немає. У цілому оформлення роботи відповідає вимогам до дисертаційних робіт.

### **Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях.**

За результатами дисертації опубліковано 4 наукові праці. Серед них 2 публікації у наукових фахових виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз та 2 публікації у наукових періодичних виданнях інших держав, які включено до міжнародних наукометричних баз. Також дисертант опублікував 6 тез доповідей на міжнародних конференціях, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації та які додатково відображають наукові результати дисертації. Представлені в дисертаційній роботі результати повною мірою висвітлені в опублікованих працях у наукових та фахових виданнях і достатньо апробовані на міжнародних науково-практичних конференціях.

### **Аналіз змісту дисертації**

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 4-ох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 143 джерел та 4-ох додатків. Робота викладена на 189 сторінках, у тому числі 122 сторінки основного тексту, містить 86 рисунків, 16 таблиці, 16 сторінок списку виконаних джерел, 29 сторінок додатків. Структура та обсяг дисертації задовольняють вимогам, що висувається до кандидатських дисертацій.

У **вступі** обґрунтовано вибір та актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами та грантами, що свідчить про глибокий аналіз здобувачем вже існуючих напрацювань в напрямку наукового дослідження. Також зазначено відомості щодо публічної апробації матеріалів дисертації та оцінено особистий внесок здобувача.

**Перший розділ** присвячено огляду наукових джерел за темою дисертаційного дослідження.

Подано огляд існуючих досліджень та проектування скляних балок та визначення фізико-механічних характеристик скла. Зокрема, висвітлено методику розрахунку тонких скляних балок на стійкість за допомогою нелінійних рівнянь, що враховують впливи другого порядку. Після аналізу літератури визначені основні напрямки та поставлено завдання наукового дослідження, що полягає у вивченні несучої здатності тонких багат шарових скляних балок.

Проведено аналіз існуючих досліджень у яких було використано кореляцію цифрових зображень та подано оцінку використання кольорових сенсорів для методу КЦЗ.

На основі проведеного огляду літературних джерел автором зроблено висновки, щодо основних фізико-механічних характеристик скляних конструкцій, використання кольорових сенсорів для КЦЗ та актуальності досліджень тонких багат шарових скляних балок.

**У другому розділі** наведено обсяг досліджень та методики, які були використані для експериментальних досліджень скляних зразків та тонких багат шарових скляних балок.

Для дослідження міцності скла на розтяг при згині, автором було запроєктовано та виготовлено дві серії скляних зразків із звичайного флоат скла. Зразки серії 1 досліджувались на трьох точковий згин із горизонтальною орієнтацією зразка відносно осі прикладання навантаження, зразки серії 2 із вертикальною. Використано розподіл Вейбулла для аналізу міцності скла після випробування на згин.

Для проведення дослідження несучої здатності тонких багат шарових скляних балок було виготовлено 22 балки які були поділені на 3 серії за висотою перерізу. Балки були досліджені на чотирьох точковий згин із постійним приростом навантаження та ступеневим приростом навантаження.

Використано методику вимірювання деформацій однієї із граней тонких багатошарових скляних балок методом кореляції цифрових зображень (КЦЗ) із використанням кольорових сенсорів.

**Третій розділ** дисертаційної роботи є експериментальним, в якому представлено результати проведених досліджень, зокрема фізико-механічні характеристики скляних зразків, міцність скла на розтяг при згині та результати досліджень тонких багатошарових скляних балок на згин.

За результатами досліджень скляних зразків на трьох точковий згин було отримано міцність скла на розтяг при згині для двох серій зразків. За допомогою моделі Вейбулла виконано статистичний аналіз та одержано характеристичні значення міцності скла на розтяг при згині та визначено розрахункове значення міцності.

Подано результати дослідження для тонких багатошарових скляних балок на згин із постійним приростом навантаження. Для балок наведені графіки залежності відносних деформацій від прикладеного навантаження та описано характер їх руйнування.

Подано результати дослідження для тонких багатошарових скляних балок на згин із ступеневим приростом навантаження. Проведено аналіз поведінки балок під час дослідження. Описано характер зміни бокових деформацій від прикладеного навантаження, а також зміну відносних деформацій. Описано характер руйнування балок.

Проведено аналіз отриманих результатів дослідження тонких скляних багатошарових балок на згин. Отримано значення допустимого навантаження та напруження для балок. Виконано порівняння між собою балок із різним типом прикладення навантаження, різною висотою та різною кількістю шарів.

**У четвертому розділі** представлено три методики розрахунку тонких багатошарових скляних балок на згин: аналітичну; та дві за допомогою методу скінчених елементів. Подано рекомендації щодо проектування тонких багатошарових скляних балок.



Розроблено алгоритм розрахунку тонких багатошарових скляних балок на згин із урахуванням кривих втрати стійкості використовуючи коефіцієнти  $\alpha_0 = 0.2$  та  $\alpha_{LT} = 0.26$ . Виконано алгоритм розрахунку за допомогою чисельно-аналітичного методу на основі методу кінцевих елементів у програмному комплексі Dlubal RFEM за двома методиками. Перша - це моделювання скла об'ємними елементами із урахуванням нелінійних властивостей матеріалу, друга - це використання вбудованого модулю RF-Glass для розрахунку скляних балок.

**У висновках** наведено основні результати роботи. Достовірність наукових і практичних результатів підтверджуються узгодженістю теоретичних напрацювань з експериментальними даними отриманих упродовж досліджень. Одержані результати пройшли апробацію через публікації в фахових виданнях та публічних конференціях. Отримані автором висновки обґрунтовані теоретичними викладами та практичною реалізацією в експериментальній частині роботи, що свідчить про достатній рівень компетенції та професійної кваліфікації здобувача.

#### **Дискусійні положення, зауваження та пропозиції.**

1. Чи перевірялась достовірність замірів за допомогою методу кореляції цифрових зображень на інших типах конструкцій, наприклад залізобетонних. Яким чином при замірах ви виключали неточності пов'язані із вигином балок із площини та інших можливих дефектів конструкцій скляних балок. Зважаючи на те, що метод кореляції цифрових зображень при замірах вимагає ідеально рівну площину, як виконувались заміри вказаним методом при втраті стійкості балок.

2. Чому відстань між зосередженими силами була прийнята по 100 мм від центру балки, якщо величина зони чистого згину при проліті балки 1000 мм є більшою.

3. У розділі 3.3 на сторінці 117 сказано наступне: «Як видно із графіку при навантаженні  $N_d=6.8$  кН, бокові вигини балки верхньої зони Вм-3.1.1 та Вм-3.1.2 перевищили значення  $b/6$ , на етапі  $N_i=5.3$  кН. На етапі завантаження  $N_d=6.8$  кН балки Вм-3.1.1 та Вм-3.1.2 коефіцієнт

використання даних балок становив 0.52 та 0.66. Припинення експлуатації балки на даному навантаженні є доцільним та забезпечує достатньою несучу здатність балок. Не зрозуміло чому саме значення завантаження  $N_d=6.8$  кН прийнято за несучу здатність балок (за момент експлуатаційної придатності), якщо воно значно перевищує етап навантаження  $N_i=5.3$  кН при якому балки втрачають стійкість і переходять у двохвісний напружений стан (бокове відхилення значно більше за координату ядра перерізу).

4. У дисертаційній роботі варто було виконати епюри нормальних напружень по висоті досліджуваних балок усіх серій для точнішої їх оцінки напружено-деформованого стану

5. У розділі 3.3 на сторінці 116 сказано наступне: «Використавши отримані експериментальні значення бокових деформацій, балки було поділено на дві групи: балки у яких значення бокових деформацій становили менше координати ядра перерізу і ті у яких ця величина перевищувала її. До перших відносились балки із одним шаром скла: Вm-1.1.3 ( $u_{y,max}=4,20$  мм), Вm-1.1.4 ( $u_{y,max}=5.64$  мм), Вm-3.1.1 ( $u_{y,max}=6.95$  мм) та Вm-3.1.2 ( $u_{y,max}=3.55$  мм). Для яких  $b/6=1.66$  мм. А також балка Вm-1.2.4, із двома шарами скла, для якої значення вигину  $u_{y,max}=3.45$  мм перевищило значення координати ядра перерізу  $b/6=3.33$  мм. Речення побудовані не коректно, очевидно переплутані місцями групи балок у яких значення бокових деформацій становили менше та більше координати ядра перерізу.

6. У дисертаційній роботі, зокрема у висновках до третього розділу та у загальних висновках, не чітко сформовано критерій несучої здатності досліджуваних балок. Чому відповідають наведені у висновках до третього розділу та у загальних висновках значення критичних сил при порівнянні балок різних серій (руйнуючому моменту чи моменту експлуатаційної придатності). Яке при цьому значення бокового вигину відповідає для вказаних значень навантажень, і чи перевищує воно і на скільки координату ядра перерізу.

7. Оскільки у дисертаційній роботі двохвісний напружений стан не розглядається, варто було б подати зведену таблицю результатів досліджень

в момент втрати ними стійкості, що є визначальним для досліджуваних балок із відповідним співвідношенням ширини до висоти.

8. Подана наукова робота присвячена згинаним елементам, відповідно порівняння несучої здатності балок у висновках необхідно було робити використовуючи згинальні моменти, а не навантаження у вигляді зосереджених сил.

9. Для можливості порівняння експериментальних та теоретичних даних у таблиці 4.1 варто було б вказати експериментальний момент, що відповідає навантаженню  $N_d$  і характеризує початок втрати стійкості дослідних зразків. Натомість у вказаній таблиці подано лише максимальний експериментальний момент  $M_u$  фізичного руйнування балок.

Вказані вище зауваження, побажання і пропозиції не впливають на загальне позитивне ставлення до дисертаційної роботи, не зменшують її наукової новизни та практичної значимості. Представлення наукової роботи до офіційного захисту є можливим, а зауваження разом із побажаннями та пропозиціями можуть бути предметом подальших досліджень автора.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота *Козака Романа Петровича "Несуча здатність тонких багат шарових скляних балок"*, представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» є самостійно завершеною науковою працею, яка містить низку нових, актуальних та достовірних результатів, що свідчать про її складність, систематичність та важливе значення. У роботі вирішується важливе завдання несучої здатності та деформативності багат шарових скляних балок які працюють на згин.

Основні положення і результати роботи опубліковані у фахових виданнях включених в перелік МОН України та в наукових виданнях які належать до наукометричних баз даних. За результатами дослідження отримано патент на корисну модель.

Враховуючи змістовність наукових досліджень, їх актуальність, новизну і практичні значення отриманих результатів, вважаю, що дисертаційна робота є завершеною науковою працею.

Дисертаційна робота «Несуча здатність тонких багат шарових скляних балок» є завершеною науковою працею і відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації (зі змінами внесеними від 12.07.2019р), Порядку присудження доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022р. №44 зі змінами внесеними від 22.03.2022р), а її автор Козак Роман Петрович заслуговує присвоєння наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Рецензент –

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри «Будівельні  
конструкції та мости»  
Національного університету  
«Львівська політехніка»



Андрій КРАМАРЧУК

Вчений секретар

Національного університету

«Львівська політехніка»

Підпис доцента

Андрія КРАМАРЧУКА засвідчує

к.т.н., доцент Роман БРИЛИНСЬКИЙ


