

Голові разової спеціалізованої вченої ради ДФ 41.085.031
Одеської державної академії будівництва та архітектури
д.т.н., проф. Кровякову Сергію Олексійовичу

В І Д Г У К

офіційного опонента кандидата технічних наук, доцента,
Горба Олександра Григоровича на дисертаційну роботу

Метлицького Віталія Вікторовича

на тему: «Несуча здатність та тріщиностійкість фібробетонних циліндричних оболонок», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Актуальність теми дисертації. Будівельна галузь, як одна з ключових галузей економіки, постійно стикається з новими викликами та потребує гнучкості для адаптації до мінливого світу. Сьогоднішня ситуація, з її геополітичною нестабільністю, технологічним прогресом та зростаючими екологічними вимогами, ставить перед будівельним сектором особливо складні завдання. Зокрема виділяється важливість впровадження та адаптації нових технологій, матеріалів та конструктивних рішень для підвищення ефективності будівельних процесів та якості кінцевого продукту.

Зазначеним викликам відповідає вивчення шляхів вдосконалення високоефективних тонкостінних тіл у вигляді викривлених поверхонь (оболонки), які здатні сприймати значні навантаження при мінімальних поперечних перерізах за рахунок мембранних зусиль. Середина поверхня в кожній точці оболонки може мати кінцеві радіуси кривизни або нескінченний радіус кривизни в одному напрямку, наприклад, як у випадку циліндричної оболонки. Циліндричні оболонки є надзвичайно поширеними структурами, які знаходять застосування у різноманітних галузях сучасної техніки та інженерії. Їх

універсальність і ефективність роблять їх незамінними в багатьох сферах.

У будівельній індустрії циліндричні оболонки використовуються як ефективні покриття для різноманітних споруд, забезпечуючи великі прольоти без потреби у великій кількості опор. Це дозволяє створювати простори та відкриті внутрішні простори, які ідеально підходять для спортивних арен, виставкових залів, складських приміщень та інших великих об'єктів. У хімічній та нафтовій промисловості циліндричні оболонки є ключовим елементом для створення резервуарів і ємностей, призначених для зберігання та транспортування різних рідин і газів. Їх герметичність і міцність забезпечують безпеку та надійність цих процесів.

Особливо широке застосування тонкі циліндричні оболонки отримали у створенні сучасної авіаційної та морської техніки. Вони використовуються в конструкції літальних апаратів, надводних і підводних суден, а також у ядерних енергетичних установках. Легкість, висока міцність і аеродинамічні властивості роблять їх ідеальними для цих вимогливих застосувань.

У будівництві циліндричні оболонки умовно класифікують за їх довжиною на короткі, довгі та середньої довжини. Класифікація впливає на методи розрахунку та особливості їх поведінки під навантаженням.

Розрахунок циліндричних оболонок є складним завданням, яке вимагає врахування багатьох факторів, таких як геометрія оболонки, матеріал, навантаження та умови спирання. Для вирішення цих завдань використовуються різноманітні методи, включаючи наближені аналітичні методи на основі безмоментної та моментної теорій оболонок, напівбезмоментну теорію В.З. Власова, а також сучасні чисельні методи, такі як метод скінченних елементів.

Важливим аспектом конструкції циліндричних оболонок є наявність бортових елементів, які розташовуються по краях оболонки. У цих елементах зазвичай розміщується основна арматура, що працює на розтяг, що дозволяє значно зменшити величину розтягуючих напружень в оболонці та зменшити вертикальні та горизонтальні переміщення країв. Вибір типу бортових елементів залежить від умов спирання країв оболонки та інших факторів. Незважаючи на

значний прогрес у цій галузі, методи розрахунку, які враховують спільну роботу тіла оболонки та бортових елементів, все ще потребують подальшої розробки та вдосконалення.

Сучасне будівництво постійно потребує нових, більш ефективних матеріалів, які дозволяють покращити характеристики конструкцій і знизити їх вартість. Одним з таких матеріалів є сталеві фібробетон – композиційний матеріал, який поєднує в собі властивості бетону та сталевих фібри. Додавання фібри значно покращує такі важливі характеристики бетону, як тріщиностійкість, морозостійкість, міцність на розтяг, вигин і кручення.

Ключовою перевагою сталеві фібробетону є зміна характеру процесу руйнування. На відміну від звичайного бетону, який руйнується практично миттєво, сталеві фібробетон демонструє більш в'язку поведінку. Після утворення тріщин у матриці бетону, сталеві волокна продовжують утримувати конструкцію, запобігаючи її крихкому руйнуванню. Це дозволяє конструкції продовжувати чинити опір навантаженню навіть після початку руйнування, що значно підвищує її надійність і безпеку. Таким чином, застосування сталеві фібробетону дозволяє перетворити крихкий характер руйнування на в'язкий, що є важливим фактором при проектуванні відповідальних конструкцій.

Отже, дослідження та розробка циліндричних оболонок із застосуванням нових матеріалів, таких як сталеві фібробетон, є надзвичайно актуальним науково-практичним завданням. Подальші дослідження в цій області дозволять створювати більш ефективні, надійні та безпечні конструкції, які відповідають вимогам сучасного будівництва та інженерії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема та дисертаційне дослідження безпосередньо корелюються з ключовими напрямками науково-технічного розвитку в Україні. Зокрема, воно узгоджується з загальнодержавною міжгалузєвою програмою «Ресурс» та її складовою, що стосується будівельної галузі.

Дослідження проводилось в рамках держбюджетної теми Міністерства освіти і науки України «Аналітичні, експериментальні та комп'ютерні дослідження стрижневих систем, плит і оболонок з сталеві фібробетону» (номер

державної реєстрації: 0121U111757), що виконується на кафедрі будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Також варто відзначити, що результати експериментально-теоретичних досліджень використовуються в навчальному процесі в Одеській державній академії будівництва та архітектури при читанні лекцій і проведенні практичних занять на кафедрах будівельної механіки, опору матеріалів, залізобетонних конструкцій та транспортних споруд для бакалаврів, магістрів та аспірантів, що навчаються за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Коротка характеристика змісту дисертації. Дисертаційна робота має класичну структуру та містить наступні елементи: анотація, вступ, чотири розділи, висновки до розділів, загальні висновки до дисертаційної роботи, список використаних літературних джерел та трьох додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 196 сторінок друкованого тексту, основний її зміст викладено на 108 сторінках, які містять 8 таблиць, 60 рисунків, 59 формул і перелік із 145 найменувань використаних літературних джерел на 15 сторінках і трьох додатків на 56 сторінках.

Дисертація написана якісною технічною українською мовою, її структура та оформлення відповідають чинним вимогам. Вона характеризується послідовністю та логічністю викладеного матеріалу, що відповідає змісту.

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, визначено зв'язок зі стратегічними науковими програмами, сформульовані мета, об'єкт, предмет і задачі досліджень, наукова новизна та практичне значення роботи, представлена її загальна характеристика, а також апробація та впровадження дисертаційного дослідження.

У **першому розділі** представлено розгорнутий огляд та ретельний аналіз ключових наукових праць, присвячених основним методам дослідження поведінки довгих циліндричних оболонок в умовах різноманітного навантаження. Особливий акцент зроблено на питаннях міцності та здатності протистояти утворенню та розповсюдженню тріщин у залізобетонних та фібробетонних циліндричних оболонках. Цей розділ покликаний систематизувати існуючі знання та визначити прогалини в дослідженнях.

Результати експериментальних та теоретичних досліджень конструкцій, виконаних на основі сталефібробетону, ґрунтуються на фундаментальних роботах відомих вчених, таких як І.М. Ахвердов, Ю.М. Баженов, Н.І. Карпенко, а також численних інших дослідників, які внесли значний вклад у вивчення властивостей цього матеріалу та його застосування в будівельних конструкціях.

Проведений ретельний літературний аналіз показав, що в сучасних наукових дослідженнях все більша увага приділяється вдосконаленню характеристик бетону шляхом використання дисперсного армування. Однак, дослідження сталефібробетонних конструкцій, зокрема оболонок, мають переважно частковий, а не всеосяжний характер, на відміну від системних досліджень, які проводяться стосовно залізобетонних або металевих конструкцій. Крім того, було проаналізовано нормативну базу України, Європи та США, що регламентує проектування і будівництво з використанням бетону та залізобетону. Важливо зазначити, що у чинних нормативних документах відсутні чіткі та однозначні вказівки щодо вибору оптимальних матеріалів і технологій, а також щодо їх узгодження з конкретними вимогами, які висуваються до окремої конструкції в залежності від її функціонального призначення та умов експлуатації. Ця невизначеність є однією з головних причин обмеженого застосування сталефібробетонних конструкцій, особливо циліндричних оболонок, у сучасній будівельній практиці України.

Здійснений аналіз наукової літератури свідчить про те, що питанням дослідження несучої здатності та тріщиностійкості довгих циліндричних оболонок, виготовлених з фібробетону, приділяється недостатньо уваги. Враховуючи важливість цих характеристик для забезпечення надійності та довговічності будівельних конструкцій, цей напрямок досліджень є надзвичайно актуальним та перспективним.

Другий розділ дисертації описує метод розрахунку довгої циліндричної оболонки, посиленої двома однаковими бортовими елементами та навантаженої вертикально. Експерименти показали, що для оболонок покриттів виробничих будівель, які спираються по кутах і мають рівномірне навантаження, жорсткі ребра та контур, впливом поперечних сил можна знехтувати. У такому випадку

розрахунок проводять окремо в поздовжньому (як балки коритоподібного перерізу) та поперечному (як арки) напрямках.

Запропоновано аналітичний метод для оболонки з бортовими елементами прямокутного перерізу, шарнірно опертої по краях, з рекомендаціями щодо інших умов. Обмежень на форму бортового елемента не накладається. Алгоритм дозволяє розрахунок за загальною напівбезмоментною теорією або зі спрощеннями для пологих оболонок.

В дисертації застосовано перший підхід. Математично задача зводиться до системи чотирьох лінійних рівнянь. Їх вирішення дає зусилля та переміщення від крайових зусиль, які, в сумі з безмоментним станом, дають повні значення.

Розглянуто пологі оболонки середньої довжини (методи сил та переміщень) та багатохвильові оболонки з бортовими елементами, навантаженими з обох боків (метод сил, симетричне та кососиметричне навантаження)

Третій розділ дисертації присвячений експериментальним та чисельним дослідженням несучої здатності довгих циліндричних оболонок. Описано розроблений стенд, процес виготовлення зразків (залізобетонних та фібробетонних) та методику досліджень. Було виготовлено по 4 моделі кожного типу, що відрізнялися товщиною та розмірами бортових елементів, при постійній довжині та радіусі. Вертикальне навантаження розподілялося по чотирьох смугах безпосередньо на тіло оболонки (13 см шириною кожна), бортові елементи не навантажувались. Шарнірне спирання здійснювалось по кутах.

Для фіксації деформацій поверхні, у трьох зонах між смугами навантаження, встановлено по чотири індикатори годинникового типу (0,01 мм). Три індикатори з кожної групи закріплені на бортовому елементі, а четвертий – на гребені оболонки. Два середні індикатори розташовані на рівнях $1/3$ та $2/3$ стріли підйому. Додатково, на оболонку наклеєні тензодатчики для моніторингу деформацій на поверхнях. Несуча здатність визначалася як величина навантаження, при якому оболонка втрачала опір.

Для всіх восьми оболонок наведено значення несучої здатності та навантаження початку тріщиноутворення. Графіки зміни деформацій та

прогинів побудовано на основі показників вимірювальних приладів.

Також проведено чисельні дослідження несучої здатності з використанням програмного комплексу Autodesk Robot Structural Analysis для моделювання та визначення напружено-деформованого стану. Визначено напруження, прогини та погонні внутрішні зусилля.

В *четвертому розділ* дисертаційної роботи представлено результати експериментального дослідження тріщиностійкості циліндричних оболонок та їх порівняння з чисельними розрахунками. Експериментальний стенд з блоковою системою навантаження дозволяє вимірювати деформації, відстежувати утворення та розвиток тріщин, а також їх розкриття. На кожному етапі випробувань фіксувалися параметри тріщин (довжина, ширина) та здійснювалася фотофіксація для подальшого схематичного зображення.

Зафіксовано появу тріщин, їх кількість та характер розкриття. Для залізобетонних і фібробетонних оболонок визначено: несучу здатність, навантаження при появі першої тріщини, початкову та кінцеву ширину розкриття тріщин. Експериментально встановлено, що найбільші напруження та прогини спостерігаються в зоні тензодатчика 21, що підтверджено скінченно-елементним аналізом у Robot Structural Analysis.

Порівняння експериментальних даних з результатами скінченно-елементного аналізу показало максимальну розбіжність у прогинах 7,4%, а в напруженнях – 13,8%. Виявлено, що дисперсне армування майже не впливає на прогини оболонок.

Результати дослідження використовуються у проектуванні, експлуатації будівель та в навчальному процесі.

За результатами дослідження процесу деформування залізобетонних і сталеві фібробетонних довгих циліндричних оболонок при рівномірно розподіленому навантаженні сформульовано **загальні висновки** до роботи.

В кінці дисертації подано список використаних літературних джерел і додатки (Додатки А-В).

Наукова новизна отриманих результатів дисертації повністю обґрунтована результатами експериментальних і теоретичних досліджень, що

представлені автором у роботі. За результатами виконаної роботи:

- запропоновано методику експериментальних досліджень несучої здатності, деформативності та тріщиностійкості залізобетонних і сталевібробетонних довгих циліндричних оболонок при рівномірно розподіленому навантаженні;

- експериментально досліджено несучу здатність, деформативність та тріщиноутворення залізобетонних і сталевібробетонних довгих циліндричних оболонок при рівномірно розподіленому навантаженні;

- запропоновано аналітичний метод розрахунку довгої циліндричної оболонки, підкріпленої двома однаковими бортовими елементами та навантаженої вертикальним навантаженням;

- доповнено методику комп'ютерного моделювання довгих циліндричних оболонок та визначення їх напружено-деформованого стану методом скінченних елементів;

- удосконалено методику експериментальних досліджень механічних властивостей сталевібробетону.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи є незаперечною. Результати експериментальних і теоретичних досліджень дали можливість розробити нескладну та ефективну методику визначення несучої здатності, деформативності та тріщиноутворення залізобетонних і сталевібробетонних довгих циліндричних оболонок, підкріплених двома однаковими бортовими елементами, при вертикальному навантаженні.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, в вигляді аналітичних, експериментальних та чисельних методів оцінки несучої здатності, тріщиностійкості та деформативності залізобетонних і сталевібробетонних довгих циліндричних оболонок, підкріплених двома однаковими бортовими елементами, впроваджені в конструкторську практику ТОВ НВЦ «Екострой», м. Одеса.

Апробація наведених у дисертаційній роботі результатів є достатньою. Основні положення дисертації викладені у 12 друкованих наукових працях, 5 із яких - в фахових збірниках наукових праць, 2 - закордоном, 1 - індексується

наукометричною базою Scopus.

Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях:

- 80-й науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (Одеса, 2024 р.);
- Міжнародній науково-технічній конференції «Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі» (Харків, ХНАДУ, 2022 р.);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій» (Харків, 19 травня 2023 р.);
- X Міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Одеса, 5-7 червня 2024 р.);
- Міжнародній науково-технічній конференції «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (Одеса, ОДАБА, 2024 р.);

Достовірність результатів наукових досліджень одержаних у дисертації підтверджується застосуванням нормативної бази України, Європи та США щодо методів оцінки несучої здатності, тріщиностійкості та деформативності залізобетонних і сталевібробетонних довгих циліндричних оболонок; обґрунтованих передумов розрахунку та порівнянням отриманих результатів експериментальних досліджень та чисельного аналізу.

За змістом дисертаційної роботи можна зробити наступні зауваження:

1. Із тексту дисертації не зрозуміло чим зумовлена потреба у використанні понад 50 російськомовних літературних джерел, зокрема російської нормативної літератури [84, 104-106] та сучасних посібників [47, 57-59, 122, 129, 130], застарілих радянських видань [7-10, 12, 13, 49, 54, 60, 66, 68, 70, 73, 74, 78, 116, 118]. Натомість не вивчені праці щодо тонкостінних оболонок сучасних представників київської вищої школи Я.М. Григоренка, Л.В. Мольченка, А.Є. Бабенка, О.О. Боронка та ін., а підвалини теоретичної бази можна знайти в англomовних роботах нідерландського вченого В.Т. Койтера та американців Д.Г. Сіммондса, Стефена Тимошенка, С. Войновського-Крігера та ін.

2. У формулі 2.3 наведено емпіричний коефіцієнт умов роботи 0.8, який «визначений експериментально», однак автором не вказано посилання ні на власні вишукування, ні на дослідження попередників, які б аргументували саме обране значення.

3. Не всі формули наведені в дисертації мають нумерацію, зокрема на с. 64-68.

4. Розділ 2 містить методику аналітичного розрахунку довгих тонкостінних оболонок з рядом частинних випадків, проте в роботі не наведені результати апробації методики на запроєктованих та випробуваних елементах.

5. У дисертації відсутні відомості про математичне планування багатофакторного експерименту, а, отже, не зрозуміле обґрунтування обраної кількості дослідних зразків оболонок, кубиків і призм.

6. У роботі не наведено склад бетонної суміші, її походження (заводське чи власне лабораторне виготовлення), детальні відомості про випробування бетонних кубів і призм, а також їх маркування на фото, що підтвердило б задекларований клас бетону на рівні C20/25.

7. У п. 3.1 на с. 70 зазначено, що до бетонної маси додається фібра в обсязі «1% від самого виробу», однак не зрозуміло чи мається на увазі відсоток від маси, чи об'єму виробу. Також відсутня інформація про фізико-механічні властивості фібри та про попередні дослідження, які зумовили вибір саме 1%.

8. Для ефективнішого сприйняття графіків залежності відносних деформацій від навантаження отриманих за допомогою електротензометрії варто на кожному рисунку зображувати положення датчика, показники якого аналізуються, тим паче, якщо спрощена схема розташування вимірювального обладнання на рис. 3.3 не відображає усі прилади та тензорезистори.

9. У роботі неодноразово вказано, що до оболонки прикладене рівномірно розподілене навантаження в межах 4 поперечних контактних поясів шириною 13 см, яке, як відомо, характеризується власною інтенсивністю (Н/м або Н/м²), проте в таблицях 3.1 та 4.1-4.5 аналізується незрозуміла зосереджена сила (кН). Варто було б вказати походження зосередженого зусилля: чи воно створюється одним, чи обома гідравлічними домкратами, чи це рівнодійна від

прикладання навантаження 1, 2 чи всіма 4 поясами, чи це консолідоване внутрішнє зусилля в гідравлічній системі.

Наведені зауваження не знижують теоретичного та практичного значення дисертаційної роботи і можуть бути враховані в подальшій науковій діяльності. Вони не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Дисертація **Метлицького Віталія Вікторовича** є завершеною працею, в якій експериментально вивчено процес деформування залізобетонних і сталевібробетонних довгих циліндричних оболонок при рівномірному розподіленому навантаженні.

Вважаю, що за актуальністю, науковою новизною, обсягом проведених експериментальних досліджень, їхньою науковою та практичною значимістю дисертаційна робота **Метлицького Віталія Вікторовича** на тему «Несуча здатність та тріщиностійкість вібробетонних циліндричних оболонок» відповідає вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів №261 від 23 березня 2016 року (зі змінами і доповненнями згідно з Постановою Кабінету Міністрів №283 від 03 квітня 2019 року), Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12 січня 2022 року №44 (зі змінами і доповненнями згідно з Постановою КМУ №341 від 21 березня 2022 року), а її автор заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Офіційний опонент

Кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри комп'ютерних технологій

будівництва Державного університету

«Київський авіаційний інститут»

Підпис Олександра Горба за секретаря
Віце-секретар КАН



Олександр Горб

Ірина Лабак