

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ОСАДЧУК ТАРАС ЮРІЙОВИЧ

УДК 624.012.6+691.615.5

**МІЦНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ
СКЛЯНИХ БАГАТОШАРОВИХ ПЛИТ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Демчина Богдан Григорович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри «Будівельні конструкції та мости».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Клімов Юлій Анатолійович,
Київський національний університет
будівництва і архітектури,
професор кафедри залізобетонних
та кам'яних конструкцій;

кандидат технічних наук, доцент
Фамуляк Юрій Євгенович,
Львівський національний аграрний університет,
завідувач кафедри технології та організації
будівництва.

Захист відбудеться «28» квітня 2020 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, буд. 6 (II-й навчальний корпус), ауд. 212.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, буд. 1.

Автореферат розісланий «27» березня 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17
кандидат технічних наук, доцент



П.Ф. Холод

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Використання скла відповідає сучасним архітектурним вимогам, таким як: прозорість, легкість та естетика. При цьому, у порівнянні з іншими матеріалами, завдяки прозорості існує можливість більш широкого використання сонячного світла, тепла та енергії, що робить скло енергоефективним та біологічно стійким матеріалом. Так, оптичні властивості скляних багатошарових плит забезпечують збільшення візуального простору на оглядових майданчиках і перекриттях, а також сприяють раціональнішому використанню природнього освітлення через панорамні покриття. Серед інших переваг скляних конструкцій: екологічність та добрі звукоізоляційні властивості.

Багатошарове скло, яке спочатку було винайдене як захисне скло в автомобільній галузі, останнім часом все частіше використовується у сучасному проектуванні мостів, будівель і споруд, причому не тільки в елементах фасадного скління, але й у несучих конструкціях через його високі фізико-механічні властивості. Як приклад – скляні мости у Китаї, оглядові майданчики в США, покриття та перекриття в готелях, торгово-розважальних комплексах та інших сучасних об'єктах інфраструктури у всьому світі.

На сьогодні в Україні відсутні комплексні наукові дослідження таких конструкцій. Тому, дослідження скляних багатошарових плит на згин допоможе вирішити актуальну проблему з впровадження нових багатофункціональних конструкцій в будівництві.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку «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» кафедри «Будівельні конструкції та мости» (17.06.2014, протокол № 10).

Тема дисертаційної роботи є складовою частиною наукових досліджень в лабораторії НДЛ-23 у 2015-2019 роках за госпдоговірними темами згідно з договорами №264 (Замовник – ТзОВ «Торгово-виробнича компанія «Радо», м. Львів) та №849 (Замовник – ТОВ «Глас Трьош Львів», м. Львів).

Мета роботи та завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи – встановити міцність і деформативність скляних багатошарових плит, опертих по чотирьох кутах, що працюють на згин під дією короткочасного статичного навантаження, прикладеного через штамп посередині дослідних зразків, та розробити рекомендації з їх проектування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- обґрунтувати доцільність використання скляних багатошарових плит для конструктивних цілей у будівництві;
- розробити методика та провести експериментальні дослідження скляних багатошарових плит, опертих по чотирьох кутах, що працюють на згин під дією

короткочасного статичного навантаження, прикладеного через штамп посередині дослідних зразків;

- застосувати метод кореляції цифрових зображень (КЦЗ) для вимірювання деформацій поверхонь скляних багатошарових плит;
- розробити методику дослідження, відповідно до якої визначити фізико-механічні характеристики скла;
- розробити методику дослідження, відповідно до якої визначити критерії тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі;
- проаналізувати отримані результати експериментальних досліджень скляних багатошарових плит на згин;
- розробити методики розрахунку та запропонувати рекомендації з проектування скляних багатошарових плит, що працюють на згин, а також впровадити результати досліджень.

Об'єкт дослідження – скляні багатошарові плити різних серій в залежності від кількості, типу та товщини шарів скла, кількості полімерних плівок для міжшарового ламінування, наявності армування.

Предмет дослідження – міцність та деформативність скляних багатошарових плит, що працюють на згин.

Методи дослідження: *експериментальні дослідження* міцності та деформативності скляних багатошарових плит, що працюють на згин, фізико-механічних характеристик скла, а також критеріїв тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі, відповідно до спеціально розроблених методик, при використанні механічних та оптичних приладів контролю; *статистичний аналіз* отриманих експериментальних даних з випробувань скляних багатошарових плит; *статистично-ймовірнісний аналіз* даних експериментальних досліджень за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла при визначенні характеристичних значень міцності та модуля пружності скла, а також критеріїв тріщиностійкості і розгалуження тріщин у склі; корегування існуючих та розробка нових *методів розрахунку і проектування* скляних багатошарових плит, що працюють на згин під дією статичного навантаження, на основі: *бібліографічного опрацювання* існуючих вітчизняних та закордонних нормативних та рекомендаційних документів, а також методів будівельної механіки; *математичного (чисельного) моделювання* напружено-деформованого стану за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ); *порівняльного аналізу* отриманих теоретичних і експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів. Основні наукові результати, представлені на захист, полягають в тому, що:

вперше:

- розроблено методику дослідження роботи скляних багатошарових плит, опертих по чотирьох кутах, що працюють на згин під дією статичного навантаження, прикладеного через штамп посередині плит, та отримано експериментальні результати міцності та деформативності плит різних серій в залежності від кількості та товщини шарів скла, кількості полімерних плівок для міжшарового ламінування, наявності армування, різного типу та комбінації шарів скла, зокрема звичайного, термозміцненого та гартованого;

– розроблено методику дослідження, відповідно до якої з використанням ймовірно-статистичного методу оцінки даних на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла визначено фізико-механічні характеристики скла;

– розроблено нові методики розрахунку на згин скляних багатошарових плит, які показали задовільне співпадіння в межах до 15 % з експериментами та запропоновано відповідні рекомендації з проектування, які були впроваджені під час проектування реальних об'єктів будівництва;

удосконалено:

– методики проектування скляних багатошарових плит, які працюють на згин, для збільшення їх міцності та зменшення деформативності при різному розміщенні по висоті шарів звичайного, термозміцненого і гартованого скла;

набуло подальшого розвитку:

– використання методу кореляції цифрових зображень (КЦЗ) для вимірювання деформацій поверхонь скляних багатошарових плит, запропоновано оптимальні параметри для даного методу згідно з прийнятим способом підготовки досліджуваної поверхні, а також виведені перевідні коефіцієнти для отримання числових значень відносних деформацій, замірених оптичним методом;

– використання фрактографічного аналізу за допомогою цифрової оптичної мікроскопії для дослідження тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі на дослідних зразках після дослідження фізико-механічних характеристик скла. Відповідно до даної методики та ймовірно-статистичного методу оцінки даних на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла визначено критерії тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі;

– використання теорії пружності пластин, концепції ефективної товщини, методу скінченних елементів (МСЕ) та механіки руйнування для розрахунку несучої здатності та деформативності скляних багатошарових плит, що працюють на згин.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні методик дослідження та розрахунку міцності та деформативності скляних багатошарових плит. Отримані результати досліджень можуть бути застосовані в галузі будівництва, а також в програмах навчальних курсів будівельних конструкцій для студентів спеціальності 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Згідно з госпдоговарами №264 та №849 були випробувані дослідні зразки скляних багатошарових плит з різного типу скла, різної кількості та товщини шарів скла, різної кількості полімерних прошарків, з армуванням та без армування, для встановлення їх міцності і деформативності та передані замовникам рекомендації з практичного застосування скляних плит в реальному будівництві.

Отримано акти про впровадження результатів досліджень при проектуванні скляних багатошарових плит для влаштування конструкцій сходів офісного приміщення у м. Львові від ТзОВ «Торгово-виробнича компанія «Радо»; скляної багатошарової підлоги 1-го поверху виставкового залу адміністративно-побутового корпусу ТОВ «Швидкий світ» на вул. Конюшинній, 4 в м. Львові від ТзОВ «New Glass»; стінки консольного басейну в житловому комплексі готельного типу в урочищі Вишні, с. Поляниця Івано-Франківської області від ФОП Пелеха А.Б.

Отримано Висновок Державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент) про видачу деклараційного патенту на корисну модель за результатами формальної експертизи № 26825/ЗУ/19 від 13.11.2019.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі літературних джерел, проведенні експериментальних досліджень, обробленні одержаних даних, розробленні методик розрахунку та їх подальшій апробації.

Постановка завдання, планування програми досліджень, формулювання основних положень та висновків здійснювалося під керівництвом наукового керівника – д.т.н., проф. Демчини Б.Г.

Результати наукових досліджень, представлені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. В публікаціях у співавторстві автору належить: [1] – розробка методики експериментальних досліджень несучої здатності та деформативності багатошарових скляних плит, аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень 4-х плит із серії 1; [2] – експериментальні дослідження 2-х багатошарових скляних плит із серій 1 та 2, виготовлених із звичайного та гартованого скла; аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень; [3] – розробка методики експериментальних досліджень деформацій багатошарових скляних плит за допомогою методу кореляції цифрових зображень (КЦЗ); визначення оптимальних параметрів для даної методики в залежності від способу підготовки поверхні; встановлення перевідних коефіцієнтів для отримання числових значень відносних деформацій, заміряних оптичним методом, на основі результатів експериментальних досліджень 3-х плит із серій 1, 2 та 3; [4] – експериментальні дослідження 4-х багатошарових скляних плит із серій 1, 2 та 3, виготовлених із звичайного та гартованого скла, а також із застосуванням армування за допомогою вуглецевої сітки SikaWrap-230C; аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень; [5] – застосування положень лінійно-пружної механіки руйнування (ЛПМР) для розрахунку міцності та довговічності скла під дією статичного навантаження; [6] – експериментальні дослідження міцності скла на згин; застосування ймовірно-статистичного підходу для визначення характеристичної міцності скла за допомогою двопараметричної функції розподілу Вейбулла.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи були оприлюднені та обговорені на: II міжнародній конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (м. Одеса, 16-17 листопада 2017 р., ОДАБА); Міжнародній науково-технічній конференції «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села» (м. Дубляни, 26-28 квітня 2018 р., ЛНАУ); Міжнародній науково-практичній конференції «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села. Розробка інноваційних моделей екопоселень Прикарпаття та Карпат» (м. Дубляни, 15-17 травня 2019 р., ЛНАУ); наукових семінарах кафедри «Будівельні конструкції та мости» Національного університету «Львівська політехніка» (2016-2019 рр.).

Публікації. Основний зміст роботи викладений у 7 наукових публікаціях, серед них: 3 статті у наукових фахових виданнях України; 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави, що включене до міжнародної наукометричної бази даних Scopus; 2 статті у виданнях України, що включені до міжнародних

наукометричних баз даних, з них 1 стаття – у виданні, що включене до міжнародної наукометричної бази даних Web of Science, 1 стаття – Index Copernicus; 1 тези доповідей міжнародних конференцій. Отримано Висновок Державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент) про видачу деклараційного патенту на корисну модель за результатами формальної експертизи № 26825/ЗУ/19 від 13.11.2019.

Структура роботи. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 153 найменувань, 3 додатків. Робота викладена на 203 сторінках, в тому числі 133 сторінки основного тексту, 31 таблиця, 91 рисунок, 18 сторінок списку використаних джерел та 27 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, сформульовано мету та завдання дослідження, описано методи дослідження, представлено отримані автором основні положення, що мають наукову новизну та практичне значення, наведено дані про апробацію результатів дисертації.

У **першому розділі** проведено огляд наукової та нормативної літератури за тематикою досліджень, а саме: представлено існуючі випадки використання скляних багатошарових плит у якості несучих конструкцій у будівництві, розглянуто сучасні види скла та технологію виготовлення скляних багатошарових плит, проаналізовано наявні методи аналітичного та чисельного розрахунку таких конструкцій.

У природі скло в залежності від походження представлене: вулканічним (обсидіани), блискавковим (фульгурити), метеоритним (тектити, Лівійське пустельне скло), кремністими (кремнеземними) скелетами морських губок та мікроскопічних організмів. Найпоширеніша технологія виробництва листового скла на сьогодні – це флоат-метод, запатентований англійською компанією «Пілкінгтон» у 1959 році. У несучих будівельних конструкціях використовують звичайне, термічно зміцнене та гартоване одношарове або багатошарове натрієво-кальцієве силікатне флоат-скло. У даній роботі досліджувалися скляні багатошарові плити, виготовлені за технологією «триплексації» з використанням полімерної плівки типу Bridgestone EVASAFE®. На сьогодні, використання багатошарового скла у несучих конструкціях представлене стіновими панелями, плитами перекриття та покриття в сучасних будівлях та мостах. Основними методиками розрахунку скляних багатошарових плит є аналітичний розрахунок за допомогою методу «ефективної товщини» (норми ASTM E 1300-16, prEN 16612:2013, дослідження Л. Галуппі, Дж. Ройєра Карфаньї та С. Дж. Беннісона) та чисельне моделювання за допомогою MCE (дослідження І. Іванова, Г. Молнар, Л. Шабле, А. Земанової, М. Фрілінг, С. Дж. Беннісона).

Однак, наявні проекти будівельних норм, а також експериментальні та теоретичні дослідження, вказують на недостатню кількість експериментальних даних для створення єдиних підходів з проектування багатошарових скляних конструкцій.

На основі аналізу наявних джерел можна стверджувати, що дослідження міцності та деформативності скляних багатошарових плит є актуальною проблемою

з широким колом недостатньо вивчених питань та відсутністю загальноприйнятої методики розрахунку скляних багатошарових плит.

В підсумку, було окреслено напрямки наукових досліджень та сформульовано основні задачі дисертаційної роботи.

У **другому розділі** представлено обсяг та методики експериментальних досліджень. За технологією триплексації були виготовлені скляні багатошарові плити 6-ти різних серій розмірами в плані 500×500 мм з різними типами скла (табл. 1). Для міжшарового ламінування плит використали плівку типу EVASAFE (Bridgestone, Японія).

Таблиця 1

Характеристики дослідних зразків

Серія	Марка	Розміри, мм		К-сть	Конструкція плит
		в плані	товщина	шт.	
1	2	3	4	5	6
1	ПСБ-1.1	500×500	26	1	
	ПСБ-1.2	500×500	28	1	
1	ПСБ-1.3 ... ПСБ-1.8	500×500	31,6	6	
2	ПСБ-2.1 ... ПСБ-2.3	500×500	31,6	3	
3	ПСБ-3.1	500×500	31,6	1	

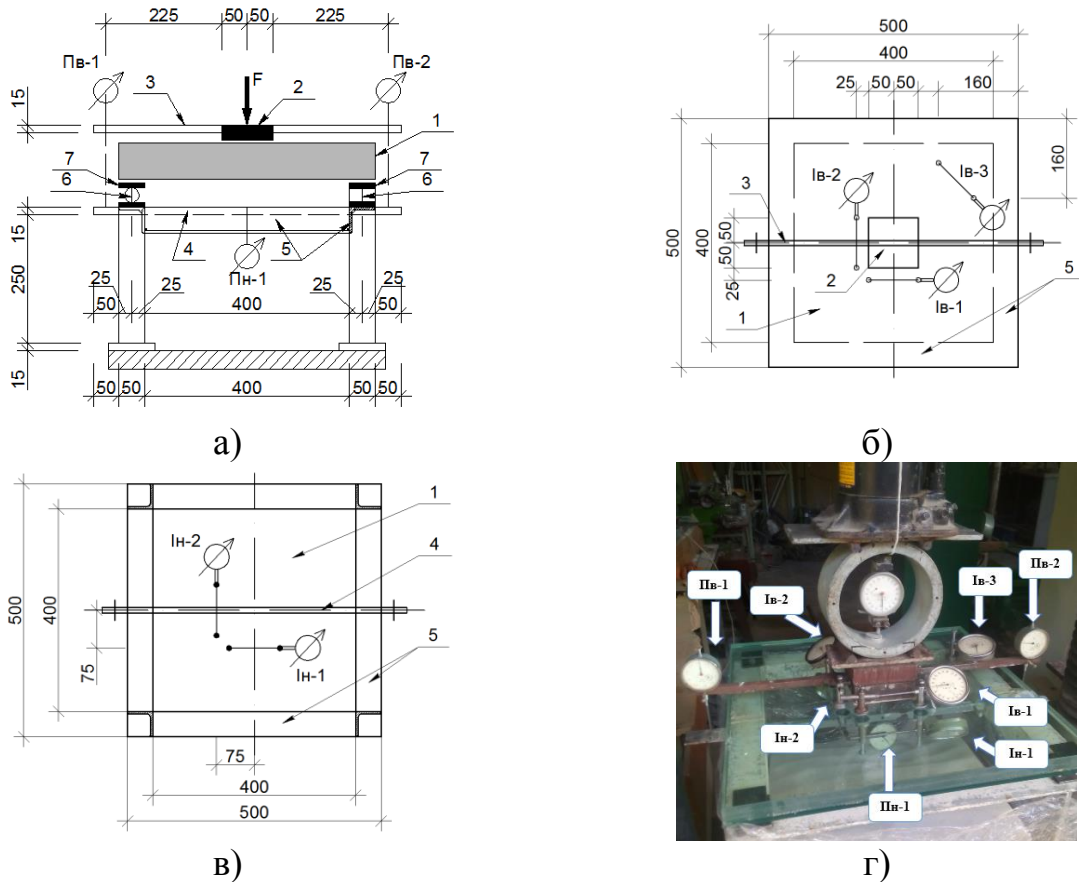
Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6
3	ПСБ-3.2	500×500	31,6	1	
4	ПСБ-4.1 ... ПСБ-4.3	500×500	31,6	3	
5	ПСБ-5.1, ПСБ-5.2	500×500	31,6	2	
6	ПСБ-6.1, ПСБ-6.2	500×500	31,6	2	
$\Sigma =$				20	

Дослідні зразки для дослідження фізико-механічних характеристик скла виготовили з врахуванням рекомендацій EN 1288-3:2000 та ASTM C158-02 (2012) розмірами 40×200×10 мм.

Для дослідження зчеплення шарів скла між собою були виготовлені дослідні зразки 6-ти серій, що склалися із трьох скляних пластин, з'єднаних між собою внапуск за допомогою різних типів клейових з'єднань. На запропоновану конструкцію дослідних зразків 6-ої серії отримано Висновок ДП «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент) про видачу деклараційного патенту на корисну модель за результатами формальної експертизи № 26825/ЗУ/19 від 13.11.2019.

Було розроблено методику дослідження роботи скляних багатошарових плит, опертих по чотирьох кутах, що працювали на згин під дією статичного навантаження, прикладеного через штамп посередині плит (рис. 1).

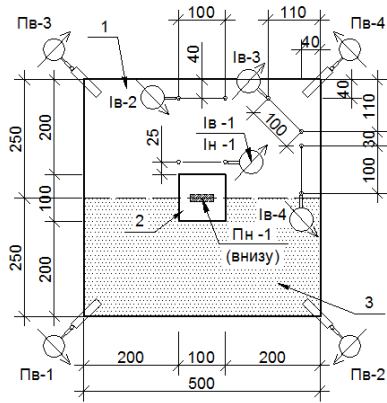


1 – дослідний зразок плити (шари умовно не показані); 2 – металевий штамп;
3 – верхня планка; 4 – нижня планка; 5 – опорний металевий столик (виготовлений з L50x5);
6 – шарнірні опори; 7 – гумові прокладки

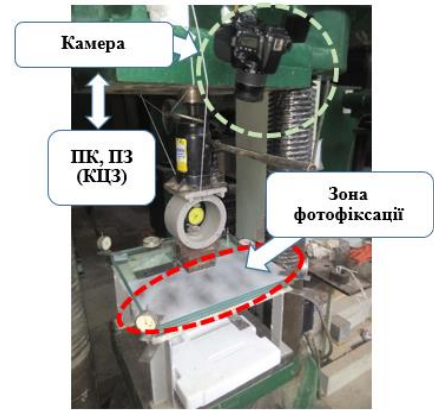
Рис. 1. Установка для випробувань на згин скляних багатошарових плит:
а) схема розміщення мікроіндикаторів / індикаторів (загальний вигляд схеми);
б) схема розміщення мікроіндикаторів у верхній зоні (вигляд зверху);
в) схема розміщення мікроіндикаторів у нижній зоні (вигляд знизу);
г) вигляд установки в робочому стані

Дослідні зразки плит працювали в двох напрямках і опиралися по чотирьох кутах на шарнірні опори: в двох протилежних кутах по діагоналі – на кульові опори (одна рухома опора, друга – нерухома), а в двох інших кутах – на циліндричні рухомі опори.

Вперше було застосовано метод кореляції цифрових зображень (КЦЗ) для вимірювання деформацій скляних багатошарових плит (рис. 2). Безконтактний оптичний метод вимірювання деформацій дозволив вирішити низку проблем, пов'язаних із швидким зняттям показів та заміною механічних приладів безпосередньо перед руйнуванням, а також отримання повної картини деформування плит.



а)

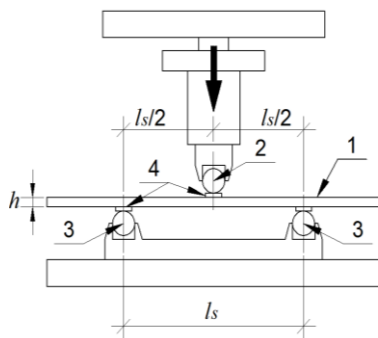


б)

1 – дослідний зразок; 2 – металевий штамп; 3 – зона фотофіксації

Рис. 2. Установка для вимірювання деформацій верхньої зони скляних багатошарових плит: а) схема розміщення зони фотофіксації (КЦЗ) та мікроіндикаторів; б) вигляд установки в робочому стані

Для визначення фізико-механічних характеристик скла було прийнято схему випробувань на трьохточковий згин згідно з ASTM C1161-13 (рис. 3).



а)

1 – дослідний зразок;
2 – згинаючий ролик;
3 – опорні ролики;
4 – гумові прокладки;
 $l_s = 100 \text{ мм}$ –
відстань між
центрами опорних
роликів

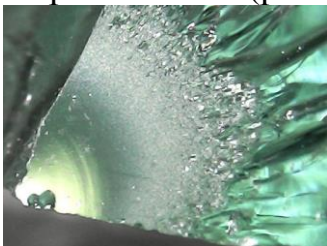


б)

Рис. 3. Випробувальна установка для дослідження скла на розтяг при згині:
а) принципова схема; б) загальний вигляд

Відповідно до прийнятої методики, дослідження зчеплення шарів скла між собою виконували на зріз по швах з'єднання під дією статичного навантаження.

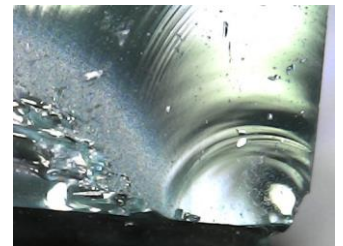
Було розроблено методику дослідження критеріїв тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі на основі фрактографічного аналізу за допомогою цифрової оптичної мікроскопії на зразках після дослідження фізико-механічних характеристик скла (рис. 4).



а)



б)



в)

Рис. 4. Поверхні руйнування (поверхні зламу) скляних зразків:
а) марки GP-1; б) марки GP-3; в) марки GP-6

Для аналізу отриманих експериментальних даних міцності та модуля пружності скла, а також критеріїв тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі прийняли ймовірно-статистичний метод оцінки даних на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла. Характеристичні значення наведених властивостей скла визначалися за допомогою квантильної функції розподілу Вейбулла при 5%-ій ймовірності руйнування з нижньою межею довірчого інтервалу на рівні 95%.

У третьому розділі: досліджено роботу на згин скляних багатошарових плит 6-ти серій та отримано результати їх міцності та деформативності; запропоновано оптимальні параметри для методу КЦЗ згідно з прийнятим способом підготовки поверхні, виведені перевідні коефіцієнти для отримання числових значень відносних деформацій, зміряних оптичним методом; визначено фізико-механічні характеристики скла, критерії тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі з використанням ймовірно-статистичного методу оцінки даних на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла, а також міцність різних типів склеювання скла між собою.

За критерій руйнування скляних багатошарових плит рекомендовано приймати перше руйнування одного із шарів. Наступні руйнування усіх інших шарів скла забезпечували запас міцності, необхідний для дотримання вимог безпеки та можливості заміни скляних плит в процесі їх експлуатації.

Характер руйнування шарів скла дослідних зразків відповідав трьом видам: перехресні тріщини з гострими уламками та шматками – для звичайного та термозміцненого скла (рис.5, а); тріщини у вигляді павутини з численними дрібними частинками з тупими гранями – для гартованого скла у нижньому шарі (рис.5, б); тріщини у вигляді павутини з вторинними перехресними тріщинами – для гартованого скла у верхньому шарі (рис.5, в).

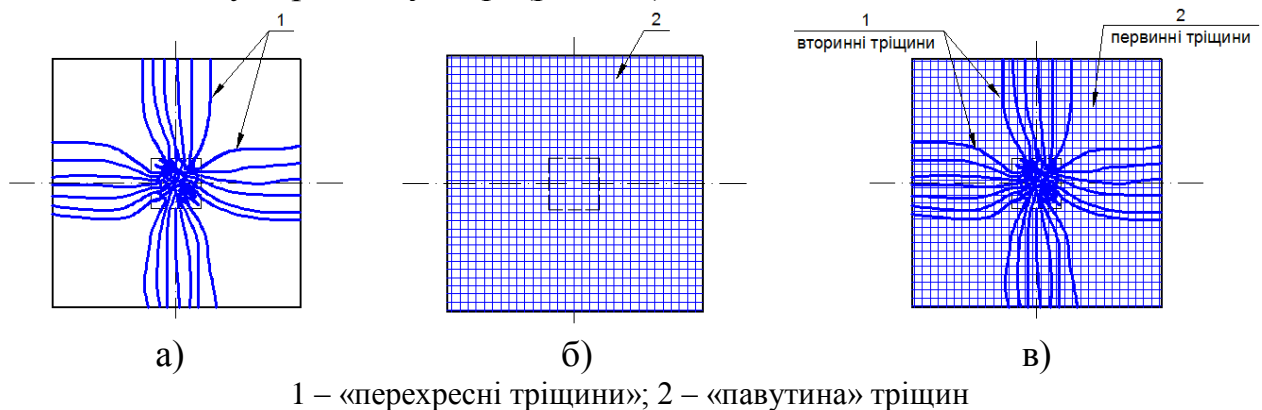


Рис.5. Характер руйнування шарів скла дослідних зразків плит:
а) звичайне та термозміцнене скло; б) гартоване скло (нижній шар);
в) гартоване скло (верхній шар)

За результатами експериментальних досліджень були побудовані графіки наростання прогинів посередині плит під навантаженням (рис. 6, а) та розподілу деформацій на верхній та нижній гранях плит (рис. 6, б).

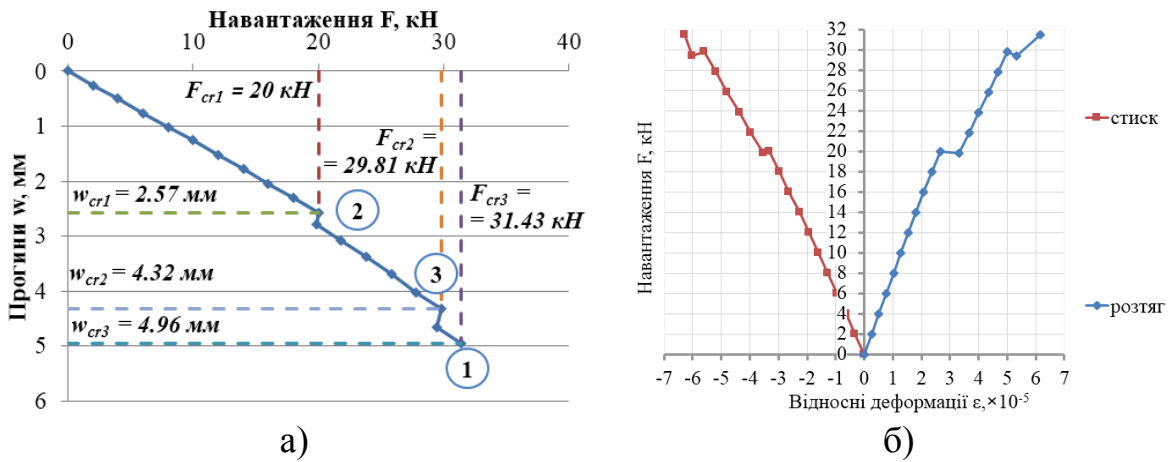


Рис.6. Графік залежності прогинів від навантаження (а) та графік розподілу відносних деформацій на верхній та нижній гранях плити (б) (на прикладі плити марки ПСБ-2.2)

За послідовністю руйнування шарів скла встановлено наступні схеми руйнування (табл.2): «нижній – середній – верхній» шари – в плитах з трьома шарами із звичайного скла (марки ПСБ-1.4 ... ПСБ-1.8 та ПСБ-3.1), а також в плитах з нижнім і середнім шарами звичайного скла та верхнім шаром гартованого скла (серія 4); «середній – верхній – нижній» шари – в плитах з нижнім шаром гартованого скла і середнім та верхнім шарами звичайного скла (серія 2 та ПСБ-3.2); «середній – нижній – верхній» шари – в плитах з верхнім і нижнім шарами гартованого скла та середнім шаром звичайного скла (серія 5), а також в плитах з верхнім і нижнім шарами гартованого скла та середнім шаром термозміцненого скла (серія 6).

Таблиця 2

Середні експериментальні значення критичних навантажень та прогинів дослідних зразків скляних багатошарових плит

Руйнування шарів скла	Параметр	Серія 1	Серія 2	Серія 3		Серія 4	Серія 5	Серія 6
				ПСБ-3.1	ПСБ-3.2			
перше	№ шару	①	②	①	②	①	②	②
	F_{cr1}^{exp} , кН	14,50	29,67	12,00	14,00	17,33	24,00	51,00
	w_{cr1}^{exp} , мм	1,82	3,55	1,61	2,02	1,92	2,11	4,77
друге	№ шару	②	③	②	③	②	①	①
	F_{cr2}^{exp} , кН	14,41	38,86	12,57	17,05	17,37	51,16	51,00
	w_{cr2}^{exp} , мм	2,23	5,28	2,77	3,44	2,21	5,53	4,77
третє	№ шару	③	①	③	①	③	③	③
	F_{cr3}^{exp} , кН	10,55	39,06	12,57	25,81	19,17	53,35	49,64
	w_{cr3}^{exp} , мм	2,47	5,58	2,77	7,58	8,14	-	5,88

① - нижній шар, ② - середній шар, ③ - верхній шар

У порівнянні з плитами 1-ої серії з трьома шарами звичайного скла, використання гартованого скла у нижньому шарі плит серії 2, у верхньому шарі плит серії 4, у нижньому та верхньому шарах плит серії 5, а також використання

гартованого скла у нижньому та верхньому шарах і термозміцненого скла у середньому шарі плит серії 6 забезпечило більші середні значення несучої здатності у момент першого руйнування – в 2,05, 1,20, 1,66 та 3,52 рази, відповідно (див. табл. 2). При цьому, прогини плит серій 2, 4 та 5 склали 1,95, 1,05 та 1,16 від прогину плит серії 1, прогини плит 6-ої серії – 2.62. У порівнянні з плитами марок ПСБ-1.3 ... ПСБ-1.8 без армування, в плиті марки ПСБ-3.1 з додатковим армуванням сіткою SikaWrap-230C при руйнуванні зменшення несучої здатності складо 0,83, прогину – 0,88 рази. У порівнянні з плитами серії 2 без армування, в плиті марки ПСБ-3.2 з додатковим армуванням сіткою SikaWrap-230C зменшення несучої здатності становило 0,47 рази, прогину – 0,57 рази. Це пояснюється погіршенням якості з'єднання окремих шарів скла між собою під час триплексації при використанні армуючої сітки SikaWrap-230C, яка втрачала прямолінійність волокон та збільшувала товщину з'єднувального шару.

Під час використання методу КЦЗ (рис. 7) було встановлено, що тип нанесення стохастичної текстури впливає на точність вимірюних деформацій. Були рекомендовані наступні параметри КЦЗ: при ручному нанесенні стохастичного рисунку: розмір фасетів – $a_f = 120$ пікселів, розмір крок між ними – $k_f = 66$ пікселів; при нанесенні стохастичного рисунку розпиленням аерозольної фарби: розмір фасетів – $a_f = 30$ пікселів, розмір крок між ними – $k_f = 17$ пікселів. Для визначення реальних відносних деформацій поверхні скла відносні деформації, отримані за допомогою методу КЦЗ, рекомендовано перемножувати на перевідний коефіцієнт $k_c = 6,20 \times 10^{-3}$.

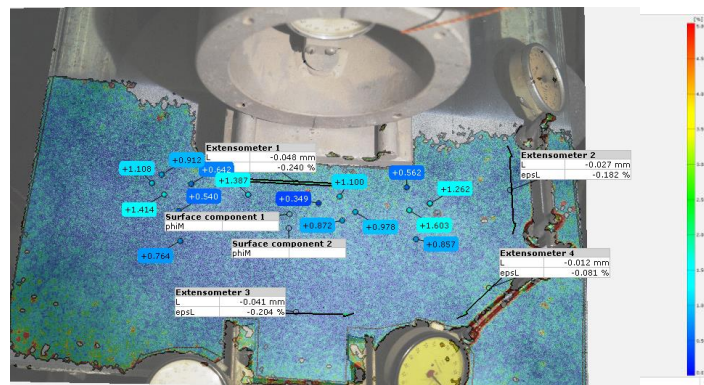


Рис. 7. Відносні деформації у центральній зоні плити марки ПСБ-4.1, виміряні в програмі GOM Correlate за допомогою «Міток відхилення» та «Екстензометрів»

В результаті статистично-ймовірнісного аналізу даних експериментальних досліджень за допомогою розподілу Вейбулла при 5%-му рівню ненадійності з нижньою межею довірчого інтервалу на рівні 95% визначено рекомендовані до використання у розрахунках величини фізико-механічних характеристик звичайного скла: значення характеристичної міцності скла на розтяг при згині – $f_{gk, 5\%} = 42,57$ МПа, модуль пружності скла – $E_{gk, 5\%} = 40396,08$ МПа, значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень – $K_{IC, 5\%} = 0.63 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, коефіцієнт інтенсивності напружень розгалуження тріщини – $K_{B, 5\%} = 1.905 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

За результатами досліджень встановлено, що найбільш оптимальним типом з'єднання шарів скла є триплексація за допомогою плівки EVASAFE.

У четвертому розділі представлено три методики розрахунку скляних багатошарових плит: аналітичний розрахунок (*I-ша методика*) – на основі концепції ефективної товщини (prEN 16612:2013) та теорії пружності пластин (модель С. Войновського-Кригера та С.П. Тимошенка); чисельно-аналітичний розрахунок (*II-га методика*) – на основі концепції ефективної товщини (prEN 16612:2013) та нелінійного розрахунку за допомогою МСЕ (ПК ЛІРА-САПР); чисельно-аналітичний розрахунок (*III-тя методика*) – на основі механіки руйнування, МСЕ (Ansys Workbench) та концепції ефективної товщини (prEN 16612:2013).

Блок-схема методики аналітичного розрахунку несучої здатності скляної багатошарової плити, представлена на рис. 8.

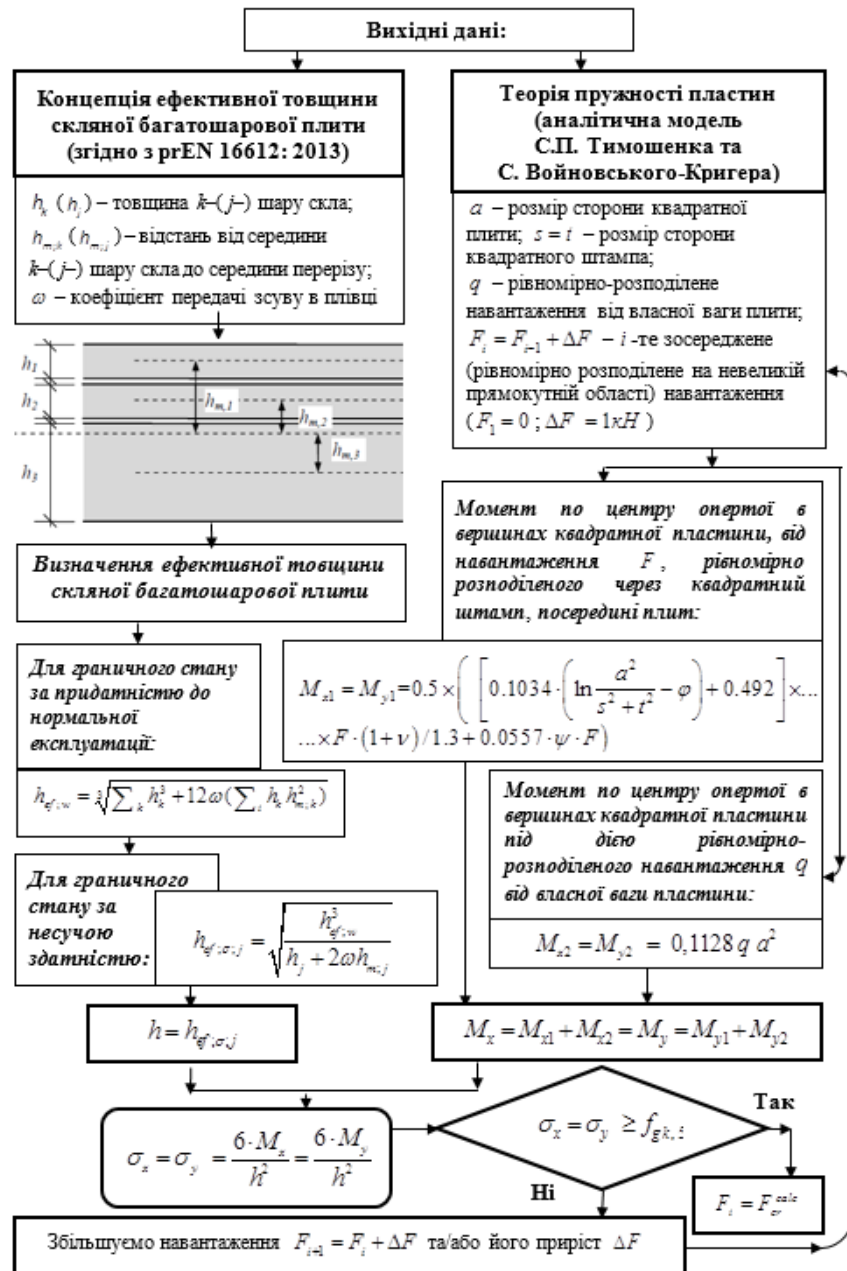


Рис. 8. Блок-схема методики аналітичного розрахунку несучої здатності скляної багатошарової плити (*I-ої методика*)

На основі представленої методики згідно з prEN 16612:2013 вираховують ефективну товщину скляної багатошарової плити при коефіцієнті передачі зсуву ω , а згідно з С.П. Тимошенком та С. Войновським-Кригером для квадратної пластини із стороною a при коефіцієнті Пуассона ν визначають згинальні моменти M_{x1} і M_{y1} , що виникають в центрі завантаженої області із розмірами $s \times t$, на яку діє навантаження F .

Були розроблені СЕ-моделі скляної багатошарової плити, виготовленої з трьох шарів звичайного скла, ламінованих між собою подвійною полімерною плівкою, з врахуванням деформацій поперечного зсуву в прошарках: в ПК ЛІРА-САПР – за допомогою фізично нелінійних скінченних елементів типу СЕ-241 (рис. 9, а); в Ansys Workbench – за допомогою елементів тіла SOLID186 і SOLID187 (рис. 9, б), при цьому деформацію зсуву врахували при визначенні ефективної товщини згідно з prEN 16612: 2013.

Завантаження 1

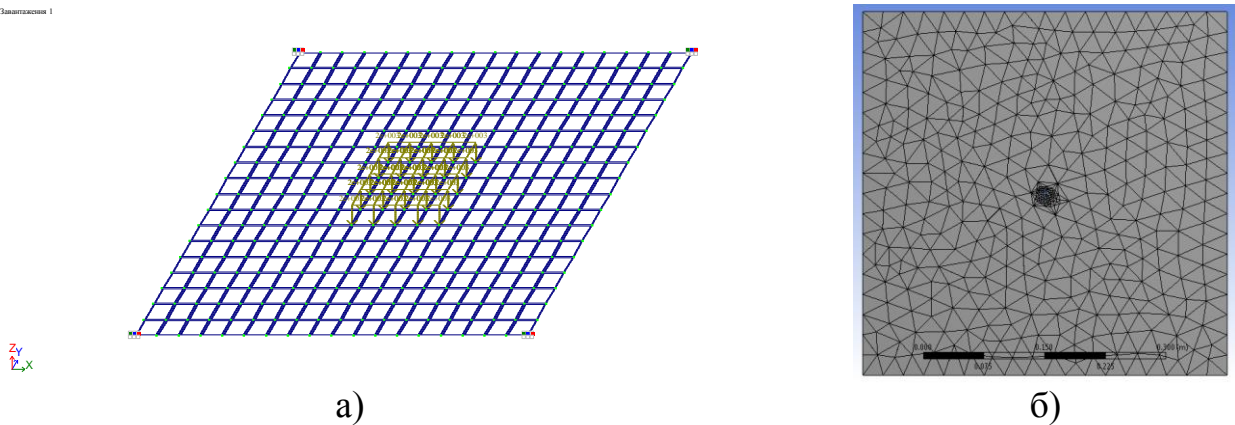


Рис. 9. Розрахункові схеми плити в: а) ПК ЛІРА-САПР; б) Ansys Workbench

Завдяки використанню нелінійності у ПК ЛІРА-САПР додатково до величин несучої здатності і прогинів (рис. 10) отримали картину руйнування (появи тріщин), аналогічну як у натурних експериментах (рис. 11).

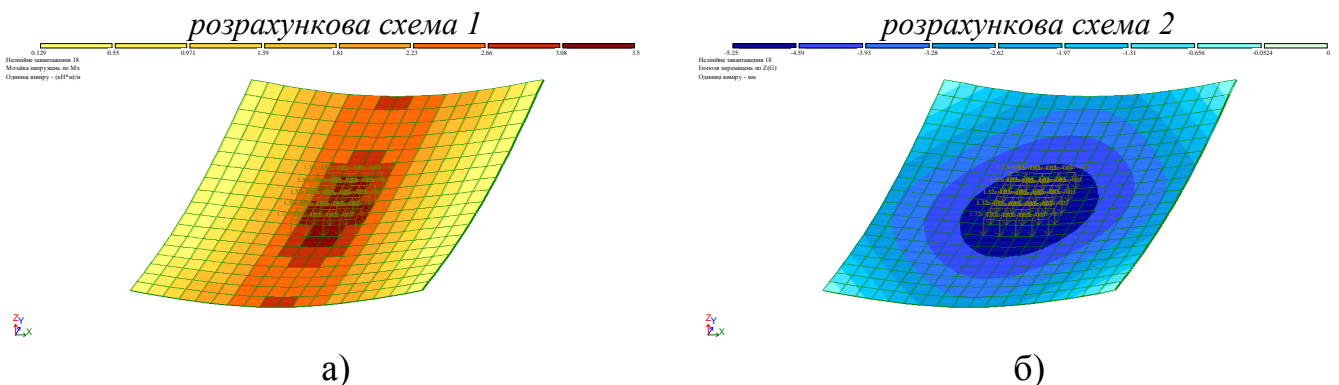
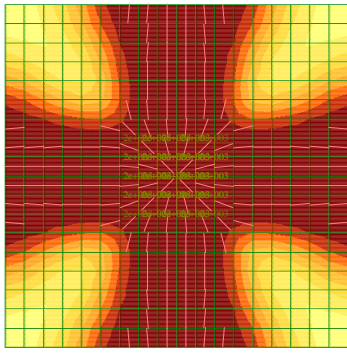


Рис. 10. Результати розрахунку в ПК ЛІРА-САПР:
а) мозаїка напружень по M_x ; б) ізополя переміщень по Z (G)



а)



б)

Рис. 11. Картина руйнування звичайного скла:

а) згідно з розрахунком в ПК ЛІРА-САПР; б) отримана експериментально

Порівняння результатів експериментальних і теоретичних досліджень показали їх високу збіжність (табл. 3).

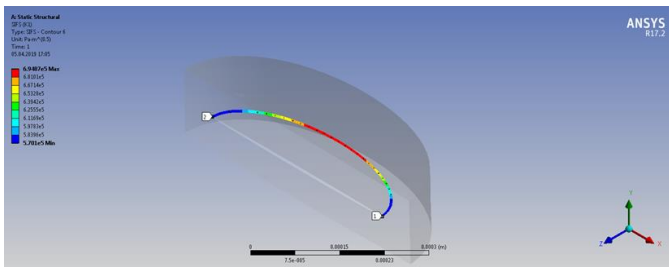
Таблиця 3

Порівняння результатів експериментальних досліджень з результатами моделювання і розрахунку трьохшарових скляних плит із звичайного скла

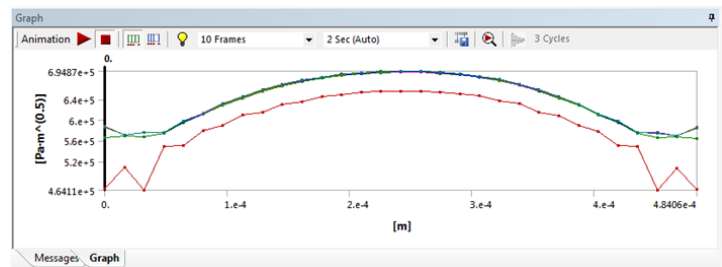
Найменування методики розрахунку	Експериментальні значення		Розрахункові значення		Порівняння значень	
	F_{cr}^{ex} , кН	W_{cr}^{ex} , мм	F_{cr}^{calc} , кН	W_{cr}^{calc} , мм	$\frac{F_{cr}^{ex}}{F_{cr}^{calc}}$	$\frac{W_{cr}^{calc}}{W_{cr}^{ex}}$
I-ша методика	14,5	1,82	12,85	—	1,13	—
II-га методика			13,20	5,25	1,10	2,88
III-тя методика			14,00	—	1,036	—

II-га методика розрахунку (див. табл. 3) дає запас у 2,88 раза, тому для більш точнішого розрахунку прогину необхідні подальші дослідження.

Внаслідок розрахунку в Ansys Workbench (III-тя методика) при досягненні несучої здатності плити було отримано значення параметра тріщиностійкості K_{IC} згідно з механікою руйнування (рис. 12).



а)



б)

Рис. 12. Результати розрахунку SIFS (K1): а) графічне представлення зміни значень SIFS (K1) по довжині контуру інтегрування (на прикладі контуру №6); б) графік зміни значення SIFS (K1) по довжині контурів інтегрування

У якості критерію руйнування обрали найближче до експериментально визначеної в'язкості руйнування $K_{IC,5\%} = 0,63 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ усереднене значення із коефіцієнтів інтенсивності напружень SIFS (K1) по останньому контуру інтегрування, що склало $K_{IC} = 0,632 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Це значення було зафіксоване при зосередженому навантаженні $F_{cr} = 14 \text{ кН}$. Відхилення від експериментального критичного навантаження 14,5 кН (див. табл. 3) на рівні 3,6 % підтвердило, що обрана методика розрахунку дозволяє з достатньою точністю визначити несучу здатність скляних багатошарових плит.

За результатами виконаних експериментальних та теоретичних досліджень скляних багатошарових плит подано рекомендації з проектування.

Отримані результати використані на практиці. Це підтверджують акти про впровадження результатів досліджень при розрахунку та проектуванні: скляних багатошарових плит для влаштування конструкцій сходів офісного приміщення у м. Львові; скляної багатошарової підлоги 1-го поверху виставкового залу адміністративно-побутового корпусу ТОВ «Швидкий світ» на вул. Конюшинній, 4 в м. Львові; стінки консольного басейну в житловому комплексі готельного типу в урочищі Вишні, с. Поляниця Івано-Франківської області.

Підтвердженням технічної новизни та практичної значимості даної роботи є отриманий Висновок ДП «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент) про видачу деклараційного патенту на корисну модель за результатами формальної експертизи № 26825/ЗУ/19 від 13.11.2019.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз наукової та нормативної літератури за тематикою досліджень та обґрунтовано можливість і доцільність застосування скляних багатошарових плит у якості несучих конструкцій у будівництві.

2. Виготовлено за технологією триплексації скляні багатошарові плити, які відрізнялися товщиною, кількістю, типом та порядком розміщення шарів скла по висоті поперечного перерізу, кількістю полімерних плівок для міжшарового ламінування, наявністю армування та розроблено методику їх досліджень як опертих по чотирьох кутах, що працюють на згин під дією зосередженого статичного навантаження.

3. В процесі виконання досліджень застосовані додаткові методики, а саме:

– вперше використано метод кореляції цифрових зображень (КЦЗ) для вимірювання деформацій скляних багатошарових плит та проведено його адаптацію через використання наступних параметрів, а саме: розміру фасетів $a_f = 30$ пікселів і їх кроку $k_f = 17$ пікселів, перевідного коефіцієнта $k_c = 6,20 \times 10^{-3}$ при використанні найбільш ефективного способу нанесення спекл-поверхні – розпиленням аерозольної фарби;

– виготовлено дослідні зразки та розроблено методику дослідження фізико-механічних характеристик скла та міцності різних типів склеювання скла між собою;

– розроблено методику дослідження критеріїв тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі за допомогою цифрової оптичної мікроскопії на основі фрактографічного аналізу зразків після дослідження фізико-механічних характеристик скла.

4. Отримано результати досліджень скляних багатошарових плит, опертих по чотирьох кутах, що працювали на згин під дією зосередженого статичного навантаження, прикладеного через штамп посередині дослідних зразків та проведено детальний аналіз несучої здатності, деформативності, характеру утворення тріщин, черговості руйнування шарів скла та інших особливостей роботи плит різних серій. За критерій руйнування скляної багатошарової плити прийнято перше руйнування одного із шарів скла.

5. Отримано результати досліджень фізико-механічних характеристик скла. В результаті ймовірно-статистичного методу оцінки даних на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла визначено такі рекомендовані до використання у розрахунках величини: значення характеристичної міцності скла на згин $f_{gk, 5\%} = 42,57$ МПа, модуль пружності скла $E_{gk, 5\%} = 40396,08$ МПа.

6. За допомогою цифрової оптичної мікроскопії проведено фрактографічний аналіз зразків після дослідження фізико-механічних характеристик скла. На основі вимірних елементів поверхонь руйнування та відповідних руйнуючих зусиль за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла розраховано такі рекомендовані до використання у розрахунках величини: критичний коефіцієнт інтенсивності напружень $K_{IC, 5\%} = 0,63$ МПа $\sqrt{м}$, коефіцієнт інтенсивності напружень розгалуження тріщини $K_{B, 5\%} = 1,905$ МПа $\sqrt{м}$.

7. Представлені та проаналізовані результати за трьома методиками моделювання та розрахунку скляних багатошарових плит та рекомендовано до застосування для розрахунку:

– несучої здатності: аналітичний розрахунок (*I-ша методика*) на основі концепції ефективної товщини (prEN 16612: 2013) та теорії пружності пластин (модель С. Войновського-Кригера та С.П. Тимошенка); чисельно-аналітичний розрахунок (*II-га методика*) на основі концепції ефективної товщини (prEN 16612: 2013) та нелінійного розрахунку за допомогою МСЕ в ПК ЛПА-САПР; чисельно-аналітичний розрахунок (*III-тя методика*) – на основі механіки руйнування, МСЕ (Ansys Workbench) та концепції ефективної товщини (prEN 16612: 2013);

– деформацій (прогинів): чисельно-аналітичний розрахунок (*II-га методика*).

8. Розроблені рекомендації з проектування скляних багатошарових плит, виготовлених за технологією триплексації, що працюють на згин, які були впроваджені під час проектування реальних об'єктів будівництва.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Осадчук Т., Демчина Б. Дослідження міцності багатошарових скляних плит, які працюють на згин від зосередженого навантаження штампом. *Будівельне*

виробництво: міжвідомчий науково–технічний збірник. К.: НДІБВ, 2016. № 60. С.58–63.

2. Осадчук Т., Демчина Б. Результати експериментальних досліджень опертих по чотирьох кутах скляних плит з різними типами скла, які працюють на згин. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія: Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. Львів: ЛНАУ, 2018. № 19. С. 57–60. DOI: 10.31734/architecture2018.19.057.

3. Осадчук Т., Демчина Б. Дослідження деформацій багатошарових скляних плит за допомогою кореляції цифрових зображень. *Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст»*. Серія: Технічні науки та архітектура. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. № 134. С.153–163.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз даних (НМБД):

4. Осадчук Т., Демчина Б., Демчина Х. Міцність та деформативність багатошарових скляних плит з різних типів скла, які працюють на згин. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса: ОДАБА, 2017. № 69. С. 30 – 37. (НМБД: Index Copernicus).

5. Осадчук Т., Демчина Б. Визначення міцності та довговічності скла на основі лінійно-пружної механіки руйнування. *Науково-технічний збірник «Опір матеріалів і теорія споруд»*. Київ: КНУБА, 2018. № 100. С. 40–58. (НМБД: Web of Science, DOAJ, Index Copernicus та ін.).

6. Osadchuk T., Demchyna B. Flexural strength of glass using Weibull statistic analysis. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering (JAMME)*. International OCSCO World Press, 2018. Vol. 2, No. 87. P. 49-61. DOI: 10.5604/01.3001.0012.2827. (НМБД: Scopus, DOAJ, Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory та ін.).

Тези доповідей міжнародних наукових конференцій:

7. Осадчук Т., Демчина Б., Піндак К. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану скляних багатошарових плит в програмі RFEM. *Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села. Розробка інноваційних моделей екопоселень Прикарпаття та Карпат: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції (м. Дубляни, 15-17 травня 2019 р.)*. Львів: СПОЛОМ, 2019. С. 83-84.

Публікації, що додатково відображають результати дисертаційного дослідження:

Зразок для випробування зчеплення пластин між собою: пат. С-2005 Україна: МПК G01N 3/08 (2006.01) / Б.Г. Демчина, М.І. Сурмай, Р.О. Ткач, Т.Ю. Осадчук; заявник Національний університет «Львівська політехніка». № u201905744; заявл. 27.05.2019 (Висновок Державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент) про видачу деклараційного патенту на корисну модель за результатами формальної експертизи № 26825/ЗУ/19 від 13.11.2019).

АНОТАЦІЯ

Осадчук Т.Ю. Міцність та деформативність скляних багатошарових плит. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2020.

Дисертація присвячена експериментальним та теоретичним дослідженням несучої здатності та деформативності скляних багатошарових плит. Дослідні зразки відрізнялися кількістю, типом та товщиною шарів скла, кількістю полімерних плівок для міжшарового ламінування, наявністю армування, і, відповідно до розробленої методики експериментальних досліджень, опирались по чотирьох кутах та працювали на згин під дією зосередженого статичного навантаження через штамп. Застосовано сучасні методи вимірювання параметрів напружено-деформованого стану: оптичний метод вимірювання деформацій за допомогою кореляції цифрових зображень (КЦЗ), фрактографічний аналіз за допомогою оптичної мікроскопії. Отримано результати дисертаційного дослідження, які були застосовані під час проектування несучих плитних конструкцій із багатошарового скла на реальних об'єктах. Розроблено методики розрахунку скляних багатошарових плит, що працюють на згин. На основі отриманих результатів експериментальних та теоретичних досліджень розроблені відповідні рекомендації з проектування.

Ключові слова: скляні багатошарові плити, напружено-деформований стан, кореляція цифрових зображень, фрактографічний аналіз, характеристичні властивості скла, методики розрахунку.

АННОТАЦИЯ

Осадчук Т.Ю. Прочность и деформативность стеклянных многослойных плит. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Национальный университет «Львовська політехніка» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2020.

Диссертация посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям несущей способности и деформативности стеклянных многослойных плит. Опытные образцы отличались количеством, типом и толщиной слоев стекла, количеством полимерных пленок для межслойного ламинирования, наличием армирования, и, согласно разработанной методики экспериментальных исследований, опирались по четырем углам и работали на изгиб под действием сосредоточенной статической нагрузки через штамп. Применены современные методы измерения параметров напряженно-деформированного состояния: оптический метод измерения деформаций с помощью корреляции цифровых изображений (КЦЗ), фрактографический анализ с помощью оптической микроскопии. Получены результаты исследования, которые были применены при проектировании несущих плитных конструкций из многослойного стекла на реальных объектах.

Разработаны методики расчета стеклянных многослойных плит, работающих на изгиб. На основе полученных результатов экспериментальных и теоретических исследований разработаны соответствующие рекомендации по проектированию.

Ключевые слова: стеклянные многослойные плиты, напряженно-деформированное состояние, корреляция цифровых изображений, фрактографический анализ, характеристические свойства стекла, методики расчета.

ABSTRACT

Osadchuk T.Yu. Strength and deformability of glass multilayered plates. – Manuscript copyright.

The thesis for degree of Candidate of Engineering Sciences (Doctor of Philosophy (Ph.D) in Engineering Sciences) in speciality 05.23.01 – building constructions, buildings and structures. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2020.

The thesis is concerned with experimental and theoretical investigation of load bearing capacity and deformability of multilayered glass plates. The specimens were different in the number, type and thickness of the glass layers, the number of polymer films for lamination of layers, the presence of reinforcement and, according to the developed test technique, were corner supported and worked in bending under static loads by stamping. Modern methods of measuring the parameters of stress-strain state are applied, including optical method for measuring the strains by Digital Image Correlation (DIC) and fractographic analysis by optical microscopy. The obtained results were applied in the design of load bearing multilayered glass plates in existing buildings. Methods for calculating the bending structural behavior of multilayered glass plate were developed. Based on the results of experimental and theoretical studies, design recommendations were derived.

Key words: multilayered glass plates, stress-strain state, digital image correlation, fractographic analysis, characteristic properties of glass, calculation methods.