

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ОСАДЧУК ТАРАС ЮРІЙОВИЧ

УДК 624.012.6+691.615.5

ДИСЕРТАЦІЯ
МІЦНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ
СКЛЯНИХ БАГАТОШАРОВИХ ПЛИТ

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
(доктора філософії)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Т.Ю. Осадчук

Науковий керівник Демчина Богдан Григорович, доктор технічних наук,
професор

Львів – 2020

АНОТАЦІЯ

Осадчук Т. Ю. Міцність та деформативність скляних багатошарових плит. – Кваліфікаційна наукова праця 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. На основі отриманих результатів експериментальних та теоретичних досліджень розроблені методики розрахунку скляних багатошарових плит, що працюють на згин, та відповідні рекомендації з проектування, які були застосовані під час проектування несучих плитних конструкцій із багатошарового скла на реальних об'єктах.

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 методики аналітичного та чисельного розрахунку таких конструкцій.

У природі скло в залежності від походження представлене: вулканічним (обсидіани), блискавковим (фульгурити), метеоритним (тектити, Лівійське пустельне скло), кремнистими (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 з 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. Для міжшарового ламінування плит використали плівку типу EVASAFE (Bridgestone, Японія). 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, а також методики дослідження фізико-механічних характеристик скла та міцності різних типів склеювання скла між собою. 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. Для визначення фізико-механічних характеристик скла було прийнято схему випробувань на трьохточковий згин згідно з ASTM C1161-13.

Вперше було застосовано метод кореляції цифрових зображень (КЦЗ) для вимірювання деформацій скляних багатошарових плит. Безконтактний оптичний метод вимірювання деформацій дозволив вирішити проблему швидкого зняття показів механічних приладів безпосередньо перед руйнуванням скла, а також дав можливість заміни механічних приладів у ході експерименту та отримання повної картини деформування плит до їх повного руйнування.

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.

Для аналізу отриманих експериментальних даних міцності та модуля пружності скла, а також критеріїв тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі прийняли ймовірісно-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 отримані 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, заміряних оптичним методом; визначені фізико-механічні характеристики скла, а також критерії тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі з використанням ймовірнісно-статистичного методу оцінки даних на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла; досліджено 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; тріщини у вигляді павутини з численними дрібними частинками з тупими гранями – для гартованого скла у нижньому шарі; тріщини у вигляді павутини з вторинними перехресними тріщинами – для гартованого скла у верхньому шарі.

За послідовністю руйнування шарів скла встановлено наступні схеми руйнування: «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).

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. 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 склало 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 було встановлено, що тип нанесення стохастичної текстури впливає на точність вимірювань деформацій. Були рекомендовані наступні параметри КЦЗ: при ручному нанесенні стохастичного рисунку: розмір фасету – $a_f = 120$ пікселів, розмір крок між ними – $k_f = 66$ пікселів; при нанесенні стохастичного рисунку розпиленням аерозольної фарби: розмір фасету – $a_f = 30$ 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 $k_c = 6,20 \times 10^{-3}$.

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 – $f_{gk, 5\%} = 42,57 \text{ МПа}$, модуль пружності скла – $E_{gk, 5\%} = 40396,08 \text{ МПа}$, значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень – $K_{IC, 5\%} = 0,63 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, коефіцієнт інтенсивності напружень розгалуження тріщини – $K_{B, 5\%} = 1,905 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

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

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 ЛІРА-САПР – за допомогою фізично нелінійних скінченних елементів типу СЕ-241; в Ansys Workbench – за допомогою елементів тіла SOLID186 і SOLID187, при цьому деформацію зсуву врахували при визначенні ефективної товщини згідно з prEN 16612: 2013.

Методика аналітичного розрахунку орієнтована виключно на розрахунок несучої здатності. Завдяки використанню нелінійності у ЛІРА-САПР додатково до величин несучої здатності і прогинів отримали картину руйнування (появи тріщин), аналогічну як у натурних експериментах. Внаслідок розрахунку в Ansys Workbench при досягненні несучої здатності плити було отримано значення параметра тріщиностійкості K_{IC} згідно з механікою руйнування.

Виконано порівняння результатів експериментальних і теоретичних досліджень, що показали високу збіжність. 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 є отриманий Висновок Державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент) про видачу деклараційного патенту на корисну модель за результатами формальної експертизи № 26825/3У/19 від 13.11.2019.

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

ABSTRACT

Osadchuk T.Yu. Strength and deformability of multilayered glass plates. – Qualifying scientific work manuscript.

The thesis for the scholarly 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. Based on the results of experimental and theoretical studies, methods for calculating the bending structural behavior of multilayered glass plates and design recommendations that were applied in the design of load bearing multilayered glass plates in existing buildings were developed.

The first chapter presents the overview of the scientific literature and standards on the research problem, in particular examples of the use of multilayered glass plates as load bearing structures in construction are provided, modern types of glass and technology of manufacturing of multilayered glass plates are considered, available methods of analytical and numerical calculations are analyzed.

In nature, glass, depending on its origin, can be volcanic (obsidian), lightning (fulgurites), meteoritic (tektites, Libyan Desert Glass), siliceous (silica) skeletons of sea sponges and microscopic organisms. Today, the float glass process, which was patented by Pilkington in 1959, is the most common process of making flat glass sheets. Annealed, heat strengthened and tempered single-layer or multilayered soda-lime silicate float glass is used in load bearing structures. This work investigates multilayered glass plates produced using «triplex» («laminated glass») technology with Bridgestone EVASAFE® polymer films. Today, multilayered glass in load bearing structures is used for wall panels, floor and roof slabs in modern buildings and bridges. The major calculation methods for the structural behavior of multilayered glass plates are analytical calculation using the method of «effective thickness» (standards ASTM E 1300, prEN 16612, studies by L. Galuppi, G. Royer Carfagni and S. J. Bennison) and numerical simulation using finite element method (FEM) (studies by I. Ivanov, G. Molnar, L. Sable, A. Zemanová, M. Fröling, S. J. Bennison).

However, existing building code designs, as well as experimental and theoretical studies, indicate that there are insufficient experimental data to create unified approaches for the design of multilayered glass structures.

Based on the analysis of previous research, it is claimed that the study of the strength and deformability of multilayered glass plates is a relevant issue with a number of insufficiently studied aspects and the absence of a common calculation method for multilayered glass plates.

As a result, the study areas were outlined and the objectives of the thesis were determined.

In chapter 2, the sample size and methods of experimental investigation are presented. Using the triplex technology multilayered glass plates of 6 different series of 500×500 mm with different types of glass were made. EVASAFE (Bridgestone, Japan) interlayer film was used for lamination of the plates. The method of studying the structural behavior of corner supported multilayered glass plates which worked in bending under static loading by stamping (on the local area) in the middle of plates and also the methods of studying the physico-mechanical properties of glass and the strength of different types of bonding between the glass layers were developed. The samples worked in two directions and were hinged supported at four corners: at two diagonally opposite corners – on ball supports (one – free support, other – fixed), and at the other two corners – on cylindrical free supports. Three-point bending test according to ASTM C1161-13 was adopted to determine the physico-mechanical properties of glass.

For the first time, the Digital Image Correlation (DIC) was used to measure the strains of multilayered glass plates. The non-contact optical technique to measure the strains made it possible to solve the problem of rapid recording the data of mechanical devices just before the glass fracture, and also allowed us to replace mechanical devices during the experiment and to obtain a full strain state of plates before its complete destruction.

The study presents a technique to determine the criteria of fracture toughness and branching of cracks in glass based on fractographic analysis using digital optical microscopy on samples after testing the physico-mechanical properties of glass.

To analyze the experimental data obtained on the strength and modulus of elasticity of glass and also the criteria of fracture toughness and branching of cracks in glass, a probabilistic statistical method for data analysis based on the two-parameter Weibull distribution was employed. The characteristic values of the above properties of glass were determined using the quantile function of the Weibull distribution at 5 % probability of breakage at the confidence interval lower limit of 95 %.

Chapter 3 investigates bending load bearing capacity and deformability of multilayered glass plates of 6 series; the optimal DIC parameters are proposed according to the accepted method of surface preparation; the physical and mechanical characteristics of glass and also the criteria of fracture toughness and branching of cracks in glass are determined using the probabilistic statistical method of data analysis based on the two-parameter Weibull distribution; the strength of different types of bonding between the glass layers is investigated.

The first fracture of one of the layers is considered to be a criterion of fracture of multilayered glass plates. Fracture of all other layers of glass provided the strength necessary for meeting safety requirements and replacement of glass plates while in service.

The fracture of the glass layers of samples can be of the following types: cross cracks with large sharp fragments and pieces – for annealed and heat strengthened glass; cracks look like a spider web of small square shaped pieces with blunt edges – for tempered glass in the bottom layer; cracks in the form of a web with secondary cross cracks – for the tempered glass in the top layer.

Based on the order of glass layers fracture the following fracture schemes were determined: «bottom – middle – top» layers – in plates with three layers of annealed glass (samples marked PGM-1.4... PGM-1.8 and PGM-3.1), and also in plates with bottom and middle layers of annealed glass and a top layer of tempered

glass (series 4); «middle – top – bottom» layers – in plates with the bottom layer of tempered glass and the middle and top layers of annealed glass (series 2 and PGM-3.2); «middle – bottom – top» layers – in plates with top and bottom layers of tempered glass and middle layer of annealed glass (series 5), and also in plates with top and bottom layers of tempered glass and middle layer of heat-strengthened glass (series 6).

Compared to the first series plates with three layers of annealed glass, the use of tempered glass in the bottom layer of the plates series 2, in the top layer of the plates series 4, in the bottom and top layers of the plates series 5, and also the use of tempered glass in the bottom and top layers and the heat-strengthened glass in the middle layer of the plates series 6 provided higher mean load bearing capacity at the time of the first layer fracture of 2,05, 1,20, 1,66 and 3,52 times, respectively. In this case, the deflections of plates of series 2, 4 and 5 were 1,95, 1,05 and 1,16 times the deflection of plates of series 1, the deflections of plates of the 6th series – 2,62. Compared to the plates marked PGM-1.3... PGM-1.8 without reinforcement, with the use of the additional reinforcement SikaWrap-230C in plate PGM-3.1 the reduction of load bearing capacity was 0,83 times and the deflection was 0,88 times. Compared to the plates of series 2 without reinforcement, with the use of the additional reinforcement by SikaWrap-230C in the PGM-3.2 plate the load bearing capacity reduced to 0,47 times and the deflection was 0,57 times. This is due to the deterioration of the bonding of individual glass layers during Triplex process using the SikaWrap-230C reinforcement, which lost the straightness of the fibers and increased the thickness of the bonding interlayer.

When using the DIC technique, it was revealed that the type of stochastic pattern application technique effects the accuracy of the measured strains. The following DIC parameters were recommended: for painting stochastic pattern by hand: the facet size is $a_f=120$ pixels, the step size is $k_f=66$ pixels; for spray painting of the stochastic pattern: the facet size is $a_f=30$ pixels, the step size is $k_f=17$ pixels. To determine the real engineering strains of the glass surface, the engineering strains

obtained by the DIC technique are to be multiplied by the conversion factor $k_c = 6,20 \times 10^{-3}$.

As a result of probabilistic statistical analysis of experimental data using the Weibull distribution at 5 % probability of breakage at the confidence interval lower limit of 95 %, we determined recommended values of physico-mechanical properties of glass, they are the value of characteristic bending strength of glass $f_{gk, 5\%} = 42,57 \text{ MPa}$, the modulus of elasticity of glass $E_{gk, 5\%} = 40396,08 \text{ MPa}$, the critical stress intensity factor $K_{IC, 5\%} = 0,63 \text{ MPa}\sqrt{m}$, the stress intensity factor of crack branching $K_{B, 5\%} = 1,905 \text{ MPa}\sqrt{m}$.

The fourth chapter presents three calculation methods for the structural behavior of multilayered glass plates: the analytical calculation (*method I*), based on the concept of «effective thickness» (prEN 16612: 2013) and the theory of elasticity of plates (S. Voynovskyy-Krieger and S.P. Tymoshenko's plate model); the numerical-analytic calculation (*method II*), based on the concept of «effective thickness» (prEN 16612: 2013) and nonlinear calculation using FEM (software package «LIRA-SAPR»); the numerical-analytic calculation (*method III*), based on fracture mechanics, FEM «Ansys Workbench» and the concept of «effective thickness» (prEN 16612: 2013).

FE models of multilayered glass plate with three layers of annealed glass laminated with a double polymer film, taking into account the transverse shear strains between layers, were developed: for «LIRA-SAPR» using physically nonlinear finite elements of type FE-241; for «Ansys Workbench» using solid body elements «SOLID186» and «SOLID187», the shear strain was determined by «effective thickness» method according to prEN 16612: 2013.

The method of analytical calculation is focused solely on load bearing capacity. In addition to the load bearing capacity and deflections, a fracture pattern (appearance of cracks) similar to natural experiments was obtained using non-linearity in «LIRA-SAPR». In «Ansys Workbench», when the load bearing capacity

of the plate was reached, the value of the fracture toughness K_{IC} was obtained according to the fracture mechanics.

The results of experimental and theoretical studies were compared. They showed high convergence. Based on the results of experimental and theoretical investigation of multilayered glass plates, design recommendations were given.

The obtained results were used in practice. This is confirmed by the implementation of the research results in the calculation and design of multilayered glass plates for stairs in office building in Lviv; multilayered glass floor of the 1st floor of the exhibition hall of the administrative and service building of «Shvydkyi svit» LLC at Koniushynna Str. 4, Lviv; console walls of swimming pool in the hotel type residential complex in Urochyshe Vyshna, v. Polianytsya, Ivano-Frankivsk region.

The technical novelty and practical value were confirmed by Decision of the State Enterprise «Ukrainian Intellectual Property Institute» (Ukrpatent) to grant a declarative patent for utility model based on the results of the formal examination No. 26825/3У/19 dated on November 13, 2019.

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

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів 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*. Київ: 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).

Відомості про апробацію 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.).

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. СТАН НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	28
1.1. Історія виникнення та впровадження скла	28
1.2. Види скла.....	31
1.3. Фізико-механічні характеристики скла.....	33
1.4. Багатошарове скло.....	34
1.4.1. Фізико – механічні характеристики полімерної плівки Bridgestone™ EVASAFE®	35
1.4.2. Характер руйнування шарів із різного типу скла	40
1.6. Існуючі методики розрахунку скляних багатошарових плит.....	47
1.7. Висновки до розділу 1	48
РОЗДІЛ 2. ОБСЯГ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	50
2.1. Обсяг експериментальних досліджень.....	50
2.1.1. Зразки скляних багатошарових плит для дослідження на згин.....	50
2.1.2. Зразки для дослідження фізико-механічних характеристик скла на розтяг при згині	53
2.1.3. Зразки для дослідження зчеплення шарів скла під дією статичного навантаження	55
2.2. Методики експериментальних досліджень	57
2.2.1. Визначення несучої здатності та деформативності скляних багатошарових плит	57
2.2.2. Вимірювання деформацій скляних багатошарових плит за допомогою методу кореляції цифрових зображень.....	61
2.2.3. Визначення фізико-механічних характеристик матеріалів, застосованих у скляних багатошарових плитах.....	68

2.2.3.1. Випробування міцності скла на розтяг при згині	68
2.2.3.2. Визначення модуля пружності скла з випробувань міцності скла на розтяг при згині.....	70
2.2.3.3. Використання ймовірісно-статистичного методу оцінки фізико-механічних характеристик скла на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла	71
2.2.3.4. Дослідження зчеплення шарів скла під дією статичного навантаження	75
2.2.4. Визначення критерію тріщиностійкості скла та критерію розгалуження тріщин у склі	76
2.2.4.1. Дослідження мікроструктури поверхні скла за допомогою цифрової оптичної мікроскопії	76
2.2.4.2. Фрактографічний аналіз дослідних зразків з випробувань міцності скла на розтяг при згині	78
2.3. Висновки до розділу 2	81
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	82
3.1. Несуча здатність та деформативність скляних багатошарових плит	82
3.1.1. Плити серії 1	82
3.1.2. Плити серії 2	91
3.1.3. Плити серії 3	96
3.1.4. Плити серії 4	99
3.1.5. Плити серії 5	104
3.1.6. Плити серії 6	107
3.2. Результати використання методу кореляції цифрових зображень для вимірювання деформацій скляних багатошарових плит	115

3.3. Фізико-механічні характеристики матеріалів скляних багатошарових плит	121
3.3.1. Міцність скла на розтяг при згині	121
3.3.1.1. Характер руйнування дослідних зразків під час визначення міцності скла на розтяг при згині	121
3.3.1.2. Результати експериментальних досліджень	122
3.3.1.3. Характеристична міцність скла на розтяг при згині.....	124
3.3.2. Модуль пружності скла з випробувань міцності скла на розтяг при згині.....	126
3.3.3. Зчеплення шарів скла під дією статичного навантаження.....	128
3.4. Критерії тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі	130
3.5. Висновки до розділу 3	132

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СКЛЯНИХ БАГАТОШАРОВИХ

ПЛИТ	134
4.1. Методика аналітичного моделювання та розрахунку скляних багатошарових плит на основі концепції ефективної товщини та теорії пружності пластин.....	134
4.2. Методика чисельно-аналітичного моделювання та розрахунку скляних багатошарових плит на основі концепції ефективної товщини та методу скінченних елементів	139
4.2.1. Побудова розрахункової схеми. Нелінійна постановка задачі	139
4.2.2. Аналіз результатів розрахунку.....	143
4.3. Порівняння результатів розрахунку	146
4.4. Запропонована методика чисельно-аналітичного моделювання та розрахунку скляних багатошарових плит на основі механіки руйнування, методу скінченних елементів та концепції ефективної товщини	147

4.4.1. Побудова розрахункової схеми.....	147
4.4.2. Аналіз результатів розрахунку.....	151
4.5. Рекомендації з проектування	153
4.7. Висновки до Розділу 4	154
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	156
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	159
Додаток А. Схема-алгоритм методики чисельно-аналітичного моделювання та розрахунку скляних багатошарових плит на основі механіки руйнування, методу скінченних елементів та концепції ефективної товщини	177
Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	197
Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	201

ВСТУП

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.

Мета і завдання дослідження відповідно до предмета та об'єкта дослідження:

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.

Відповідно до предмета та об'єкта дослідження було сформульовано мету та завдання дослідження.

Мета – 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 методику 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.

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 отриманих 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 ймовірнісно-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, заміряних 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 ймовірісно-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.

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. 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 ймовірнісно-статистичного підходу для визначення характеристичної міцності скла за допомогою двопараметричної функції розподілу Вейбулла.

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

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. 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» (дата затвердження на Вченій раді Інституту будівництва та інженерії довкілля - 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 «Радю», м. Львів) та №849 (Замовник – ТОВ «Глас Трьош Львів», м. Львів).

Практичне значення отриманих 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 госпдоговорами №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 (Додаток Б) при проектуванні: скляних багатошарових плит для влаштування конструкцій сходів офісного приміщення у м. Львові від ТзОВ «Торгово-виробнича компанія «Радю»; 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 № 26825/3У/19 від 13.11.2019.

РОЗДІЛ 1. СТАН НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Історія виникнення та впровадження скла

Природне скло. Уже за 75 тисяч років до н.е. задовго до того, як люди навчилися робити скло, вони використовували природне скло у ножах, наконечниках стріл та в інших корисних речах [86].

У природі скло зустрічається в багатьох формах. Скло утворювалося, коли пісок і каміння, найчастіше з високим вмістом кремнезему, нагрівалися до високих температур, а потім швидко охолоджувалися. Це відбувалось, коли вулкани розтоплювали розплавлений камінь (вулканічне скло або обсидіан – рис. 1.1, а), блискавки вражали пустелю і пляжні піски (фульгурити), метеорити падали на землю (тектити та Лівійське пустельне скло – рис. 1.1, б) [84].

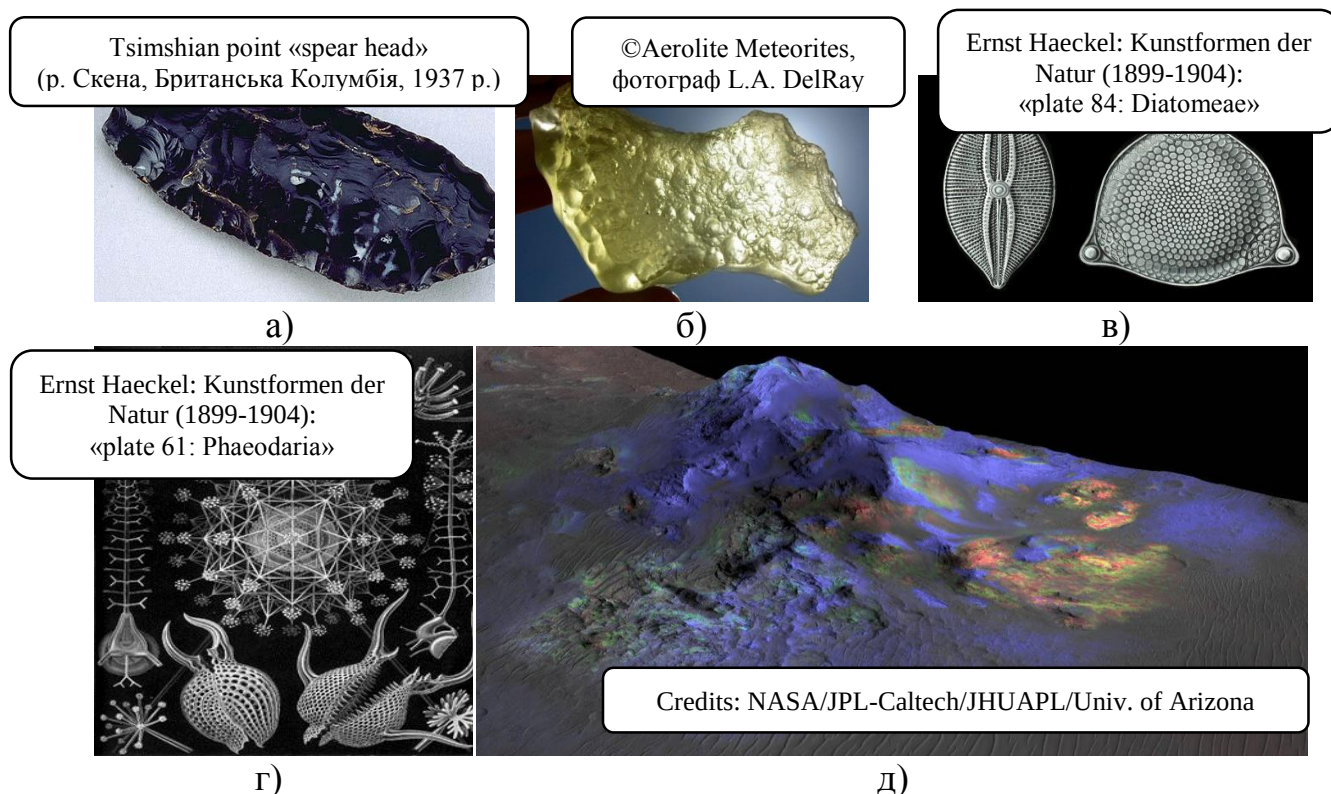


Рис. 1.1. Природне скло: а) обсидіан [113]; б) скло Лівійської пустелі [99]; в) мікроскопічні діатоми [84]; г) мікроскопічні феодарії [84]; д) марсіанське ударне скло (зелений колір) в Алга кратері (Alga crater) на Марсі [112]

Також, особливим видом природнього скла були кремністі (кремнеземні) скелети морських губок та мікроскопічних організмів (рис. 1.1, в, г), що жили у воді [84].

У 2015 р. марсовий розвідувальний орбітальний супутник NASA «Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)» виявив відкладення скла у кратерах на Марсі (рис. 1.1, д). Воно було створене, коли метеорити впали на поверхню Марсу з достатньою силою для розплавлення деяких порід, які потім досить швидко охолоджувались в атмосфері, перетворюючись у скло, відоме як ударне скло [112].

Неорганічне скло. Згідно з ДСТУ 3290-95 [4] скло (неорганічне скло) – це тверда аморфна речовина, прозора, в тій чи іншій частині оптичного діапазону (в залежності від складу), отримана під час застигання розплаву, що має склотвірні компоненти.

Час, місце і спосіб виготовлення першого скла невідомі. Хронологічно, скло можна класифікувати за історією свого розвитку на такі типи [96, 107]:

I. Скло традиційної технології виробництва (до XIX ст.):

- 1) широкополосне/широколистове скло (*broad sheet glass*), Англія (Сурей і Сассекс), 1226 р.;
- 2) кронскло (*crown glass*), Франція (Руана), 1330 р.;
- 3) видувне плитне скло (*blown plate glass*), Англія (Лондон), 1620 р.
- 4) поліроване плитне скло (*polished plate glass*), Франція, 1688 р.;
- 5) Удосконалене циліндричне листове скло (*improved cylinder blown sheet glass*), Англія, 1834 р.

II. Механічно вироблене (машинне) скло (поч. XX ст.):

- 6) циліндричне скло механічного виготовлення (*machine drawn cylinder sheet glass*), США, 1903 р.;
- 7) плоске листове скло механічного виготовлення (*machine flat drawn sheet glass*), Бельгія, 1913 р.;
- 8) Одно- та двосторонньо поліроване плитне скло (*single and twin ground polished plate*), Англія, 1923 р.;
- 9) Флоат-скло (*float glass*) Пілкінгтона, Англія, 1959 р.

Багатошарове скло було винайдено у 1903 р. французьким ученим Е. Бенедиктом: після падіння колби, що містила залишок нітроцелюлози, розбита посудина зберегла свою форму. Згодом, для створення безпечного скла в автомобільній галузі, у 1910 році Е. Бенедикт запатентував процес ламінування двох листів скла за допомогою целулоїдного прошарку між ними, який отримав назву «Триплекс» [85, 97] (рис.1.2). З метою виробництва триплексованого скла, у 1912 р. Е. Бенедикт заснував компанію «Société du Verre Triplex», яка в 1927 р. об'єдналася з «Saint-Gobain» [129].



а)



б)

Рис. 1.2. Реклама триплексованого скла для автомобілів:

а) фірми «Société du Verre Triplex» (журнал «L'Illustration», 8 червня 1912 р., ілюстрація Tournois-Doumenq) [7]; б) автомобіля Ford Model A, 1928 р. [30]

Запропоноване у 1959 р. А. Пілкінгтоном виробництво «флоат-скла», на сьогодні, є стандартним методом виготовлення скла. В загальному, технологічний процес виробництва «флоат-скла» представлений на рис. 1.3. З печі розплаву (melting furnace) розплавлене скло при температурі близько 1000°C наливається в неглибоку ванну з розплавленим оловом або «флоат-ванну» (float bath). Скло пливе по поверхні олова, розтягується і утворює рівну поверхню. Товщина скла регулюється швидкістю, з якою стрічка твердого скла виходить з ванни. Після відпалу (annealing) та контрольованого

охолодження (colling) у тунельній печі «лері» (lehr) скло стає полірованим за допомогою вогню з практично паралельними поверхнями. Після цього, відбувається огляд та різання скла [141].

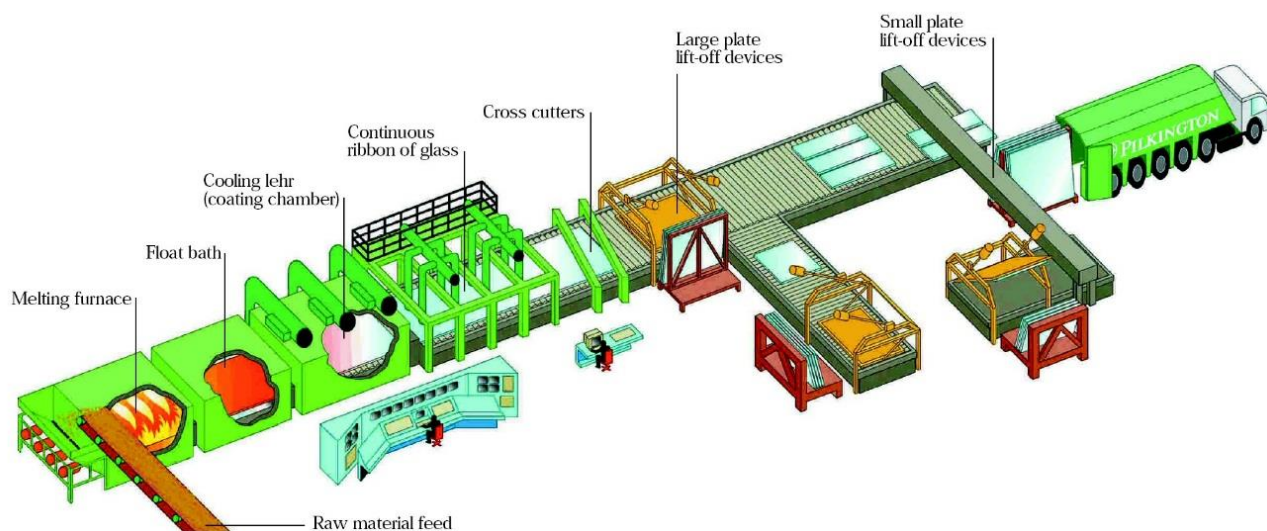


Рис. 1.3. Принципова технологічна схема процесу виробництва флоат-скла [141]

Оскільки, флоат-скло – це найпоширеніший вид листового скла у будівництві, тому саме даний матеріал було обрано для виготовлення скляних багатошарових плит, дослідження міцності та деформативності яких представлено у даній роботі.

1.2. Види скла

Вироби зі скла поділяються на такі основні види [50]:

1. *Базове скло*, виготовлене з натрієво-кальцієвого силікатного скла відповідно до EN 572-1 [63]; флоат-скло EN 572-2 [64]; поліроване армоване скло EN 572-3 [65]; витягнуте листове скло EN 572-4 [66]; візерункове скло EN 572-5 [67]; армоване візерункове скло EN 572-6 [68]; армоване і неармоване профільне скло EN 572-7 [69]; скляні блоки і плити EN 1051-1 [45].

2. *Спеціальне базове скло*, виготовлене зі скла різних хімічних складів: боросилікатне скло EN 1748-1-1 [60]; склокераміка EN 1748-2-1 [61]; лужноземельне силікатне скло EN 14178-1 [54]; алюмосилікатне скло EN 15681-1 [57].

3. *Оброблене скло*:

3.1. *Зміцнене скло*, отримане шляхом термічного або хімічного зміцнення натрієво-кальцієвого силікатного скла: термозміцнене скло EN 1863-1 [62]; хімічно зміцнене скло EN 12337-1 [48].

3.2. *Гартоване безпечне скло*, отримане шляхом термічної обробки: гартоване натрієво-кальцієве силікатне безпечне скло EN 12150-1 [47]; гартоване боросилікатне безпечне скло EN 13024-1 [53]; термовитримане гартоване натрієво-кальцієве силікатне безпечне скло EN 14179-1 [55]; гартоване лужноземельне силікатне безпечне скло EN 14321-1 [56]; термовитримане гартоване лужноземельне силікатне безпечне скло EN 15682-1 [58]; гартоване натрієво-кальцієве силікатне профільне безпечне скло EN 15683-1 [59].

3.3. *Багатошарове скло*, що відповідає EN ISO 12543-1 [71]; багатошарове скло EN ISO 12543-3 [73]; багатошарове безпечне скло EN ISO 12543-2 [72].

3.4. *Скло з покриттям* - скло, зазначене в п.1, 2, 3.1, 3.2, 3.3 з покриттям згідно з EN 1096-1 [46].

3.5 *Склопакети* - герметичні вироби, заповнені повітрям або іншим газом, що відповідають EN 1279-1 [51]. Склопакет може бути виготовлений з одного або різних видів листового скла, зазначених в п.1, 2, 3.1, 3.2, 3.3.

В будівництві для несучих конструкцій використовують звичайне, термічно зміцнене та гартоване одношарове або багатошарове натрієво-кальцієве силікатне флоат-скло [20, 36, 37, 83, 105, 119, 120, 131].

1.3. Фізико-механічні характеристики скла

Властивості скла залежать від складу та якості скла, способів і технології механічної обробки, характеру навантаження, умов зовнішнього середовища [17, 31, 133, 134, 145]. Типові загальноприйняті для розрахунків значення фізичних та механічних властивостей для звичайного натрієво-кальцієвого силікатного скла наведено в табл.1.1.

Табл.1.1

Фізико-механічні властивості звичайного натрієво-кальцієвого силікатного скла згідно з EN 572–1 [63]

Властивість	Позн.	Од. вим.	Значення
Густина (при $t=18\text{ }^{\circ}\text{C}$)	ρ	кг/м ³	2 500
Твердість (за Кнуппом) відповідно До ДСТУ ISO 9385	$HK_{0,1/20}$	ГПа	6
Модуль Юнга (модуль пружності)	E	МПа	70 000
Коефіцієнт Пуассона	μ	—	0,2
Середній температурний коефіцієнт лінійного розширення (в інтервалі температур від 20 °C до 300 °C)	α_T	$\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$	9
Стійкість до перепадів температури і різкої зміни температур		К	40
Питома теплоємність	c	Дж/(кг·К)	720
Теплопровідність	λ	Вт/(м·К)	1
Середній коефіцієнт заломлення світла у видимій області спектра (при 589,3 нм)	n	—	1,5
Випромінювальна здатність (поправочний коефіцієнт випромінювальної здатності)	ε	—	0,837

Значення характеристичної міцності на згин звичайного, термозміцненого та гартованого скла, що застосовуються при короткочасному

квазістатичному навантаженні і поширюються на ймовірність руйнування 5% при нижній межі довірчого інтервалу 95%, представлені у табл 1.2.

Табл.1.2

Характеристична міцність флоат-скла на згин згідно з prEN 16612 [121]

Звичайне скло (EN 572 [63])	Термозміцнене скло (EN 1863 [62])	Гартоване скло (EN 12150 [47]), термовитримане скло (EN 14179 [55])
45 МПа	70 МПа	120 МПа

1.4. Багатошарове скло

Згідно з ДСТУ Б В.2.7-123-2004 (ГОСТ 30826 - 2001) [6] багатошарове скло – це плоский виріб, який складається з одного або декількох листів неорганічного скла та плівкових або рідких полімерних і силікатних матеріалів, за допомогою яких склеюються і/або покриваються листи скла (рис. 1.4).

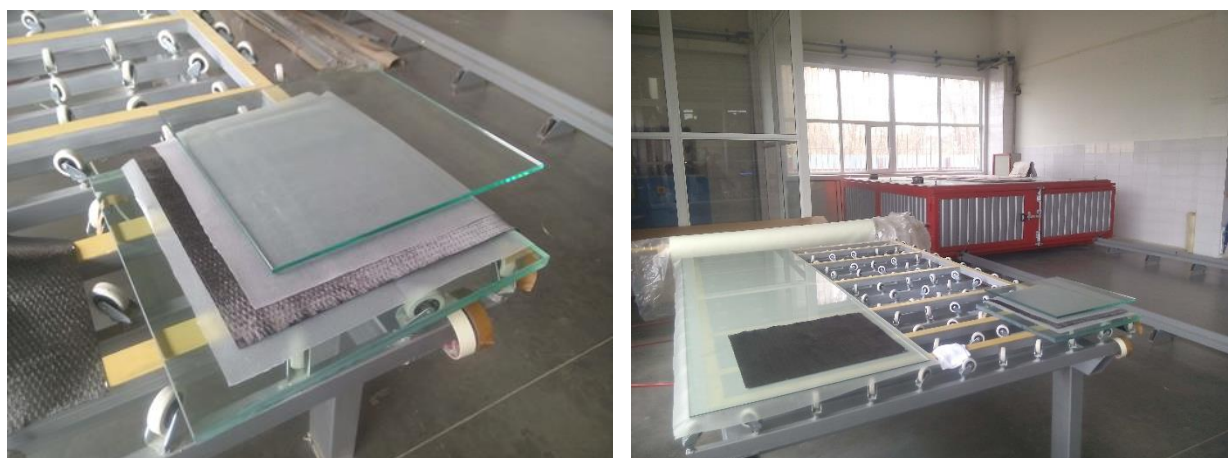


Рис. 1.4. Виробництво багатошарового скла (триплексу)

Для склеювання шарів скла використовуються наступні типи полімерних плівок: полівінілбутиральні PVB (наприклад, Trosifol® групи компаній Kuraray, раніше – виробників Trosifol® (Kuraray) та DuPont™ Butacite®), етиленвінілацетатні EVA (EVASAFE® компанії

Bridgestone™), іонопластичні плівки (SentryGlas™ групи компаній Kuraray), з термопластичного поліуретану TPU та ін.

Скляні багатошарові плити даного дослідження були виготовлені із полімерною плівкою типу Bridgestone™ EVASAFE®. Фізико-механічні характеристики плівки представлені нижче.

1.4.1. Фізико – механічні характеристики полімерної плівки Bridgestone™ EVASAFE®

EVASAFE являє собою термореактивну плівку типу етиленвінілацетат (EVA), здатну утворювати міцні трьохвимірні поперечні зв'язки в процесі ламінування. Переваги плівки EVASAFE серед інших продуктів для ламінування скла: безпечність (підвищений ступінь механічної міцності); унікальні оптичні властивості, що гарантують високу якість, стабільність і довговічність виробів з даного типу плівки; простота в застосуванні, зберіганні та обробці; вологовідштовхувальні властивості; відмінна сумісність з полімерами та іншими художніми вставками; відсутність пластифікаторів [18, с.2; 76, с.22-23].

Властивості полімерних плівок сімейства EVASAFE після тверднення в процесі ламінування згідно з даними компанії Bridgestone представлені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Властивості полімерних плівок Bridgestone EVASAFE
згідно з даними компанії Bridgestone [103, с.74]

Величина	Од.вим.	G71	G77	S11	S88
Густина ρ ¹	г/см ³	0,95	0,95	0,95	0,95
Коеф. темп. розширення α_T ²	1/К	$3,0 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-3}$	-	-
Міцність σ_B ²	МПа	>10	>10	>12	>16
Відносне подовження при розриві ε_B	%	>500	>500	>800	>950
Ступінь зчеплення	%	93-97	93-97	85-90	85-90
Температура склування T_g	°C	-28	-28	-28	-28
Температура плавлення T_m	°C	79	74	≈75	≈75
¹ ASTM D1505 [28]					
² DIN EN ISO 527-1 [74]					

У табл. 1.4 представлені допустимі значення модуля зсуву G для плівок EVASAFE в твердому стані з коефіцієнтом Пуассона $\nu=0.45$ в залежності від типу та умов навантаження.

Таблиця 1.4

Лінійні пружні властивості плівок Bridgestone EVASAFE
згідно з технічним свідоцтвом № Z-70.3-197 [146, с.9-11]

Випадки та умови навантажень	Модуль зсуву	Коефіцієнт Пуассона	Модуль Юнга
	G [Н/мм ²]	ν [-]	E [Н/мм ²]
60°C, тривалість 1 год	0,8	0,45	2,32
50°C, тривалість 1 год	1,4	0,45	4,06
40°C, тривалість 1 год	2,0	0,45	5,80
30°C, тривалість 1 год	2,5	0,45	7,25
25°C, застосування – фасадне та всередині, навантаження від вітру	3,6	0,45	10,44
50°C, застосування – фасадне, горизонтальне корисне навантаження від людей	1,4	0,45	4,06
50°C, застосування – фасадне, лінійне та вітрове навантаження	1,6	0,45	4,64
30°C, застосування – всередині, навантаження – лінійне, тривалість 1 год	2,5	0,45	7,25
30°C, застосування – всередині, навантаження – лінійне та вітрове	3,0	0,45	8,70
застосування у покритті, навантаження від снігу	2,5	0,45	7,25
під дією навантаження протягом довгого часу	0	0,45	0

Залежність між величинами G та E (див. табл. 1.4) відповідає рівнянню (1.1) для плівки з ізотропного матеріалу згідно з prEN 16613: 2013 [122, с.7]:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (1.1)$$

Кожен прошарок має свій коефіцієнт передачі зсуву ω , призначений для різних випадків навантаження (табл. 1.5), що визначається згідно з prEN 16613: 2013 [122, с.24].

Таблиця 1.5.

Випадки навантажень та діапазони температур
(згідно з п. 9.2.3, табл. 10 в prEN 16612: 2013 [121, с.25]
та п. 7.2, табл. 1 в prEN 16613: 2013 [122, с.11])

Випадок навантаження	Тривалість навантаження	Діапазон температур
Вітрове навантаження (середземноморські райони)	3 сек	$0^{\circ}\text{C} < \theta < 30^{\circ}\text{C}$
Вітрове навантаження (інші області)	3 сек	$0^{\circ}\text{C} < \theta < 20^{\circ}\text{C}$
Навантаження від людей на балюстраду - нормальний вплив	30 сек	$0^{\circ}\text{C} < \theta < 30^{\circ}\text{C}$
Навантаження від людей на балюстраду - натовпи	5 хв	$0^{\circ}\text{C} < \theta < 30^{\circ}\text{C}$
Скло під час ходьби при технічному обслуговуванні	30 хв	$0^{\circ}\text{C} < \theta < 40^{\circ}\text{C}$
Снігове навантаження – зовнішні навіси і дахи відкритих будівель	3 тижні	$-20^{\circ}\text{C} < \theta < 0^{\circ}\text{C}$
Снігове навантаження – дахи опалювальних будівель	5 днів	$-20^{\circ}\text{C} < \theta < 20^{\circ}\text{C}$
Постійне	50 років	$-20^{\circ}\text{C} < \theta < 60^{\circ}\text{C}$

Значення ω , яке використовують для конкретного прошарку і конкретного випадку навантаження, залежить від сімейства міжшарової жорсткості (табл. 1.6) [121, с.25].

Таблиця 1.6.

Значення ω для різних сімейств міжшарової жорсткості та випадків навантаження (згідно з п. 9.2.3, табл. 11 в prEN 16612: 2013 [121, с.25])

Випадок навантаження	Сімейство 0	Сімейство 1	Сімейство 2	Сімейство 3
Вітрове навантаження (середземноморські райони)	0	0	0,1	0,6
Вітрове навантаження (інші області)	0	0,1	0,3	0,7
Навантаження від людей на балюстраду - нормальний вплив	0	0	0,1	0,5
Навантаження від людей на балюстраду - натовпи	0	0	0	0,3
Снігове навантаження – зовнішні навіси	0	0	0,1	0,3
Снігове навантаження – дахи	0	0	0	0,1
Постійне навантаження	0	0	0	0

Будь-який прошарок, властивості якого не оцінювали відповідно до prEN 16613: 2013, слід розглядати як приналежний до сімейства жорсткості 0 [122, с.25].

Поняття міжшарової жорсткості описано в Додатку В prEN 16613: 2013 [122], метод для визначення представлено у Додатку D даних норм. Згідно з п. 7.3 prEN 16613: 2013 [122, с.11-13] сімейство міжшарової жорсткості, до якого належить прошарок, визначається значенням модуля E для найвищої температури в діапазоні та для конкретного випадку навантаження (табл. 1.7).

Таблиця 1.7.

Модуль E (Мпа) для різних випадків навантажень та сімейств міжшарової жорсткості (згідно з п.7.3, табл. 2...9 prEN 16613: 2013 [122, с.11-13])

Випадок навантаження	Сімейства міжшарової жорсткості			
	0	1	2	3
Вітрове навантаження (середземноморські райони)	<1		1...50	>50
Вітрове навантаження (інші області)	<1	1...10	10...100	>100
Навантаження від людей на балюстраду - нормальний вплив	<1		1...20	>20
Навантаження від людей на балюстраду - натовпи	<5			>5
Скло під час ходьби при технічному обслуговуванні	<1			>1
Снігове навантаження – зовнішні навіси	<1		1...10	>10
Снігове навантаження – дахи	<1			>1
Постійне	<1			

На основі розрахованих за формулою (1.1) значень модуля E плівки EVASAFE, нормативних значень E згідно з табл. 1.7 та ω – з табл. 1.6, виконано перевірку приналежності плівки EVASAFE до сімейств міжшарової жорсткості та визначено відповідні значення ω (табл. 1.8).

Таблиця 1.8.

Визначення сімейства міжшарової жорсткості та відповідного значення ω
для плівки типу EVASAFE

Випадок навантаження	Модуль E , МПа	Сімейство міжшарової жорсткості	Значення ω
Вітрове навантаження (середземноморські райони) ¹	8,70	2	0,1
Навантаження від людей на балюстраду - нормальний вплив ²	10,76	2	0,1
Навантаження від людей на балюстраду - натовпи ²	9,76	3	0,3
Скло під час ходьби при технічному обслуговуванні ²	8,00	3	0,1*
Снігове навантаження – зовнішні навіси ¹	7,25	2	0,1
Снігове навантаження – дахи ¹		3	0,1
Постійне навантаження ¹	0	0, 1, 2, 3	0
¹ На основі значень G згідно з № Z-70.3-197 [146, с.9-11] (див. табл.1.4) ² На основі значень G згідно з [87, с.23-25] *Значення ω прийнято згідно з [138, с.405]			

Як видно з табл. 1.8, прошарки із плівки типу EVASAFE відносяться до сімейств міжшарової жорсткості 2 та 3 для різних випадків навантажень з відповідними значеннями коефіцієнта передачі зсуву ω . Для розрахунків у даній роботі прийнято ω рівне 0,1.

1.4.2. Характер руйнування шарів із різного типу скла

На рис. 1.5. представлено порівняння характеру руйнування трьох типів скла – звичайного, термозміцненого та гартованого.

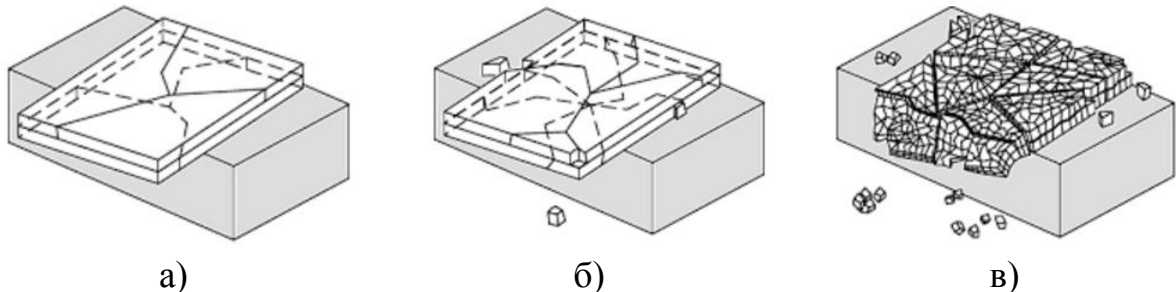


Рис. 1.5. Характер (картина) руйнування багатошарового скла [136]:

а) звичайного; б) термозміцненого; в) гартованого

Чим вище попереднє напруження, тим менші частинки скла після руйнування. Причиною цього є індукована енергія, яка при цьому вивільняється [77, с.21]. Згідно з п. 8.1.1 ASTM C1048-12e1 [22] встановлені наступні величини попередніх напружень стиску: для термозміцненого скла з товщиною 6 мм і менше необхідний стиск на поверхні – від 24 до 52 МПа; для гартованого скла мінімальний стиск поверхні – 69 МПа або стиск країв – не менше 67 МПа. У Європі для гартованого скла діапазон напружень стиску, як правило, знаходиться в межах 80 – 150 МПа [116, с. 8].

Згідно з п. 5 EN 1863-1:2011 [62] та п. 5.1 ASTM C1048-12e1 [22] фрагменти руйнування термозміцненого скла подібні за розміром і формою до фрагментів звичайного скла.

Згідно з п. 5 EN 12150-1:2015 [47] та п. 5.2 ASTM C1048-12e1 [22] гартоване скло руйнується з утворенням численних дрібних частинок з тупими гранями. Таке скло вважається набагато безпечнішим, ніж великі гострі шматки, які можуть виникнути внаслідок руйнування звичайного або термозміцненого скла. Форма та розмір частинок залежать від нанесеного навантаження, джерела руйнування, температури скла і т. д. [94].

Багатошарове скло є важливим для конструктивних цілей. Загартування зменшує залежність міцності скла від часу та покращує його несучу здатність, однак не вирішує питання крихкості матеріалу. Ламінування значно покращує роботу конструкції після руйнування: фрагменти скла прилягають до плівки, що дозволяє отримати певну структурну цілісність.

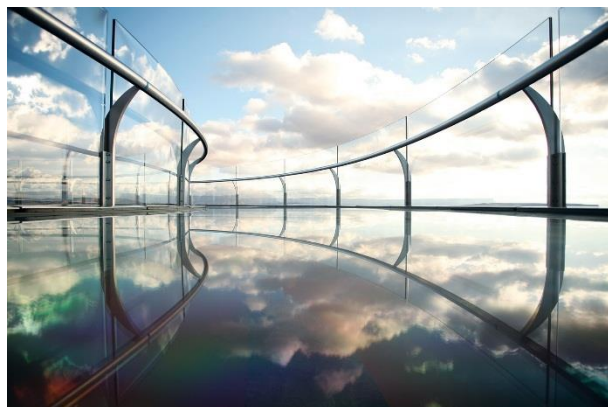
1.5. Приклади застосування скляних багатошарових плит у сучасному будівництві

На сьогодні, відомо багато будівель і споруд із використанням скляних несучих конструкцій. Деякі з них представлені нижче.

Оглядовий майданчик «Grand Canyon Skywalk» для огляду Великого каньйону над плато Колорадо в штаті Арізона, США. У-подібна платформа оглядового майданчика «Grand Canyon Skywalk» (рис. 1.6), що відкрився 28 березня 2007 року (розробники – MRJ Architects та Lochsa Engineering LLC), загальною довжиною 42,672 м (140 футів), розташована на віддалі 21,336 м (70 футів) від краю каньйону на висоті 1219,2 м (4 000 футів) над річкою Колорадо [32, 89, 135, 142].



а)



б)

Рис. 1.6. Оглядовий майданчик «Grand Canyon Skywalk»: а) [91]; б) [90]

Ламіновані скляні панелі підлоги (рис. 1.7) загальною товщиною 54,08 мм, шириною 3,048 м і довжиною 21,336 м (всього 46 шт), являються багатошаровими скляними конструкціями з чотирма проміжними шарами з ламінуючої плівки DuPont™ SentryGlas® і п'ятьма шарами із

ультрапрозорого скла з малим вмістом оксиду заліза «Saint-Gobain™ SGG Diamant®» [89, 135, 144]. До складу ламінату входять три шари із термозміцненого скла і нижній шар із гартованого скла товщиною по 10 мм кожен, а також додатковий верхній «зношувальний шар» із гартованого скла товщиною 8 мм, який при пошкодженні можна замінити [32, 89].

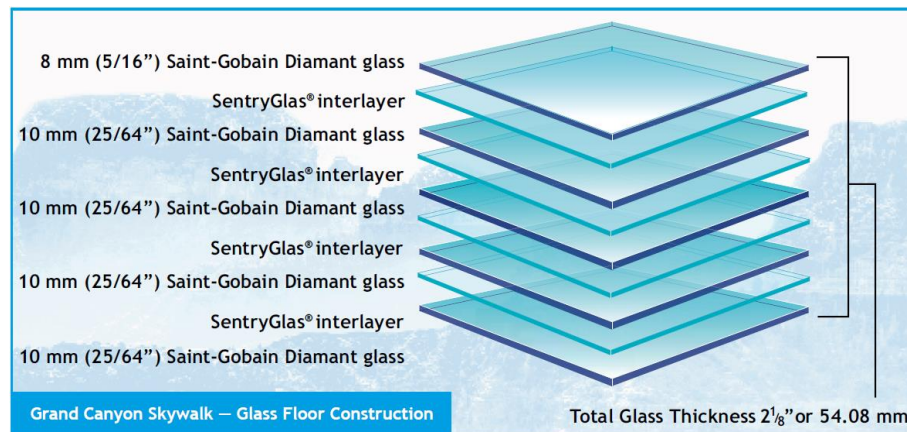


Рис. 1.7. Конструкція підлоги «Grand Canyon Skywalk» [135]

Аналіз, проведений Kuraray Glass Laminating Solutions (раніше DuPont), консультантами Saint-Gobain та будівельними конструкторами, показує, що така багат шарова скляна підлога може витримувати вагу до 120 чоловік і забезпечувати найвищий рівень безпеки при високих вітрах, що можуть сягати 160,93 км/год [135].

Оглядовий майданчик «Skydeck Chicago» в хмарочосі «Willis Tower» у м. Чикаго, штат Іллінойс, США. «Ledge» (проект компанії Halcrow Yolles, відкриття – 2 липня 2009 року) (рис.1.8) – це чотири п’ятигранні скляні балкони закритого типу (бокси), які простягаються на віддаль 1,2 м від фасаду оглядового майданчика «Skydeck Chicago» на 103-му поверсі «Willis Tower» на висоті 412 м [93, 104]. Вони виготовлені з багат шарових скляних панелей, що закріплені на сталевій рамі, яка переміщується по направляючих для зручності обслуговування [143].

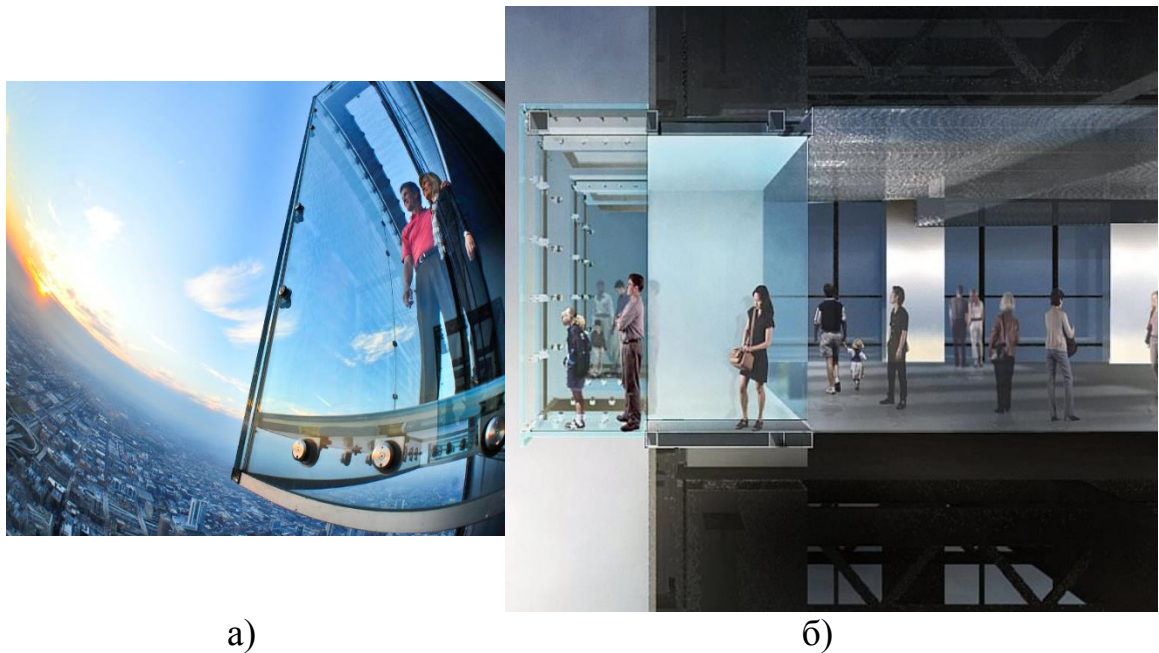


Рис. 1.8. Скляні балкони «Ledge» оглядового майданчика
«Skydeck Chicago»: а) [149]; б) [143]

Щоб уникнути випадкового руйнування, для всіх елементів було обрано три шари скла. Конструкція була розроблена таким чином, що для протидії навантаженням достатньо два скляні шари і один шар скла несе власну вагу конструкції [102].

Усі скляні елементи «Ledge» складалися з трьох шарів гартованого з малим вмістом заліза термічно витриманого скла «PPG™ Starphire® Ultra-Clear Glass» товщиною по 12 мм (0,5 дюйма) [93, 102].

Стіни та дах були ламіновані прозорою PVB-плівкою компанії Solutia™, а підлоги ламіновані DuPont™ SentryGlas®. Згідно з інформацією виробника скла Prelco™ скляні листи стін приблизно 1524 мм × 3200 мм, тоді як підлоги та даху – приблизно 1219 мм × 3048 мм; кожен ламінат – товщиною 41 мм [92]. Товщина плівок для ламінування підлоги склала 1,52 мм [104].

Додатково для запобігання пошкодженням та зносу на внутрішній стороні скляних панелей нанесена спеціальна плівка. Ламінована підлога мала шар гартованого скла, підданого термічній витримці, товщиною 6 мм, який

можна було видалити та замінити після пошкодження, розтріскування або руйнування [93].

Скляний бокс може витримати проектний тиск повітря на рівні 5,985 кН/м² і навантаження до 5 т – на 3 т більше, ніж передбачено вимогами Чикаго. Натурні випробування проводили в компанії MTH Industries на двічі меншому за фактичне склі навантаженням у 2,5 рази більшим від проектного протягом 24 год [93]. До сьогодні, балкони успішно експлуатуються та приймають відвідувачів.

Міст «Zhangjiajie Glass Bridge» над Великим каньйоном Чжанцзяцзе в провінції Хунань, Китай. Найвищий у світі скляний підвісний пішохідний міст «Zhangjiajie Glass Bridge» (рис.1.9) довжиною 385 м та шириною 6 м, що простягається на висоті 300 м над Великим каньйоном Чжанцзяцзе в провінції Хунань (Китай), був відкритий 20 серпня 2016 року [95, 153].

Міст включав прозорі скляні панелі підлоги і бокові підвісні кабелі та був призначений для розміщення до 800 відвідувачів. Архітектурний проект розробив Х. Дотан з компанії «Haim Dotan Ltd. Architects and Urban Designers», проектні роботи – фірма «BRDI – China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co. Ltd» [43, 153].

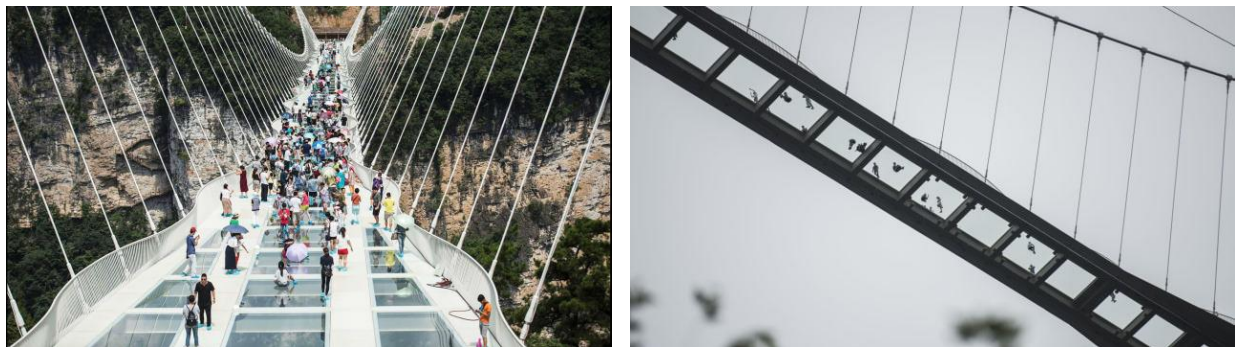


Рис. 1.9. Міст «Zhangjiajie Glass Bridge» над Великим каньйоном Чжанцзяцзе в провінції Хунань (Китай) [95]

Великогабаритні ламіновані скляні панелі підлоги товщиною 50 мм були виконані з трьох 3 × 4 м шарів ультра-прозорого скла з низьким вмістом заліза товщиною по 16 мм та двома проміжними шарами DuPont™ SentryGlas® між

ними. Міст був введений в експлуатацію після шестимісячних випробувань на вітрове навантаження в лабораторії «Wind Testing Laboratory» в університеті Хунань (Hunan University) у Чанші, при цьому, експериментальна швидкість вітру досягала 56 м/с або 201,6 км/год. Також, скло було випробуване на екстремальні навантаження до 40 т, при цьому панелі 3×4 м показали прогин лише 2,16 см під навантаженням 20 т [43, 153].

Міст «East Taihang Glasswalk» на території «East Taihang Scenic Area» в провінції Хебей, Кунтай. Міст «East Taihang Glasswalk» (рис.1.10) довжиною 266 м та шириною 2 м, що простягається вздовж скелі на висоті 1180 м над рівнем моря, відомий своїми спецефектами з руйнування скла. Імітація розтріскування скла досягалася за допомогою інфрачервоних датчиків, які відстежували рух людей, що йдуть по мосту, викликаючи подвійний візуальний і звуковий ефект [44, 140].



Рис. 1.10. Міст «East Taihang Glasswalk» в провінції Хебей (Китай) [44]

Міст «Hongyagu Glass Bridge» на території «Hongyagu Scenic Area» в провінції Хебей, Кунтай. Міст «Hongyagu Glass Bridge» (рис.1.11), відкритий для публіки 24 грудня 2017 року, довжиною 488 м, шириною 4 м, який простягнувся на висоті 218 м над дном долини між двома скелями, є найдовшим у світі скляним мостом. Покриття мосту складалося із 1077 скляних панелей товщиною 4 см. Загальна вага мосту – 70 т. Пропускна

здатність складала 2000 людей, хоча рекомендована кількість людей для одночасного перебування на мосту – 500 [98, 151].

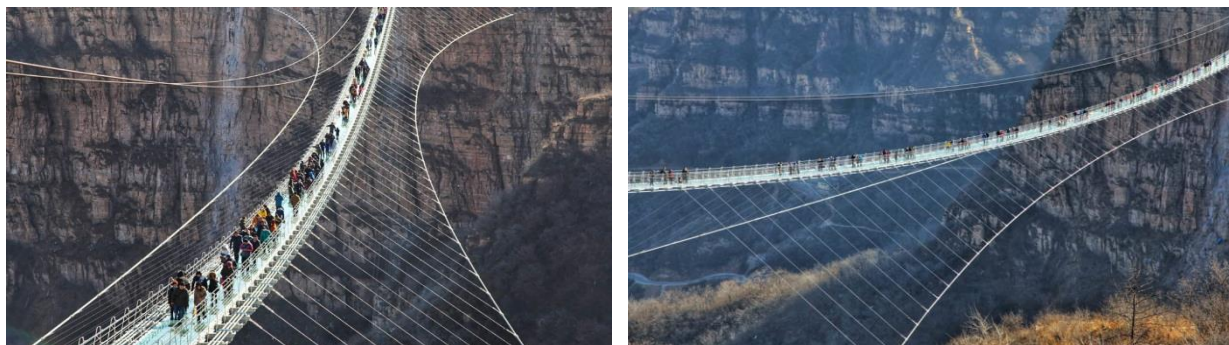
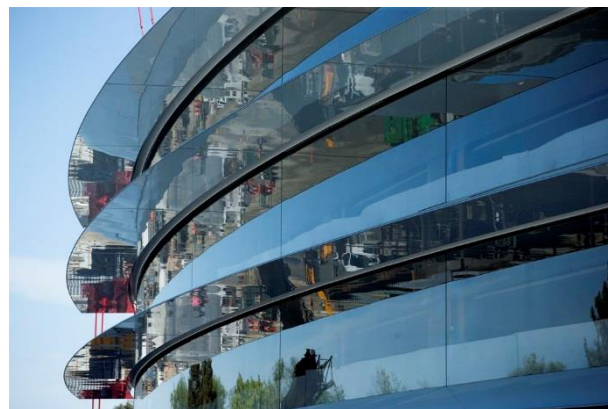


Рис. 1.11. Міст «Hongyagu Glass Bridge» в провінції Хебей (Китай) [98]

У 2017 році була відкрита *штаб-квартира компанії Apple «Apple Park» в м. Купертіно, Каліфорнія, США*. Великий скляний фасад головної будівлі (рис. 1.12) площею майже 31 000 м² складався із 872 зігнутих скляних панелей розмірами до 3,2 × 14 м [21]. Кожна панель являла собою конструкцію з двох скляних листів товщиною по 12 мм. Через кругову конструкцію скляні панелі для зовнішнього фасаду були зігнуті в холодному стані під час ламінування радіусом 232 м, а панелі для внутрішнього фасаду – радіусом 177 м. Такі двошарові панелі зовнішньої оболонки будівлі – це найбільше холодно гнуте скло із тих, що використовувались в будівництві. Один скляний елемент важить до 2,7 т. На даний час в світі немає іншої будівлі з такою кількістю скляних панелей такого розміру.



а)



б)

Рис. 1.12. Будівля «Apple Park» в м. Купертіно, Каліфорнія: а) [147]; б) [137]

1.6. Існуючі методики розрахунку скляних багатошарових плит

Основні методики розрахунку скляних багатошарових плит:

– аналітичний розрахунок за допомогою методу «ефективної товщини».

Даний метод розрахунку представлений в американських нормах ASTM E 1300 [29] та проекті європейських норм prEN 16612: 2013 [122].

– чисельне моделювання за допомогою методу скінченних елементів.

Включає побудову 2D або 3D моделей багатошарових плит. При 2D-розрахунку одношарове і багатошарове скло моделюється як поверхня, а скінченні елементи засновані на теоріях пластин (наприклад, теорія Міндліна–Рейснера). Розрахунок 3D виконують за допомогою побудови моделей тіл для кожного шару в перерізі.

Для розрахунку несучої здатності та прогинів скляної багатошарової плити можна використати методику розрахунку на основі концепції ефективної товщини згідно з п. 9.2.2 prEN 16612: 2013 [122, с.23-25].

Даний метод пропонує два окремих рівняння для граничного стану за несучою здатністю (Ultimate Limit State - ULS) (1.2) і граничного стану за придатністю до нормальної експлуатації (Serviceability Limit State - SLS) (1.3).

Ефективна товщина багатошарового скла для напружень j - шару скла [122, с.23]:

$$h_{ef;\sigma;j[ULS]} = \sqrt{\frac{h_{ef;w}^3}{h_j + 2\omega h_{m;j}}}; \quad (1.2)$$

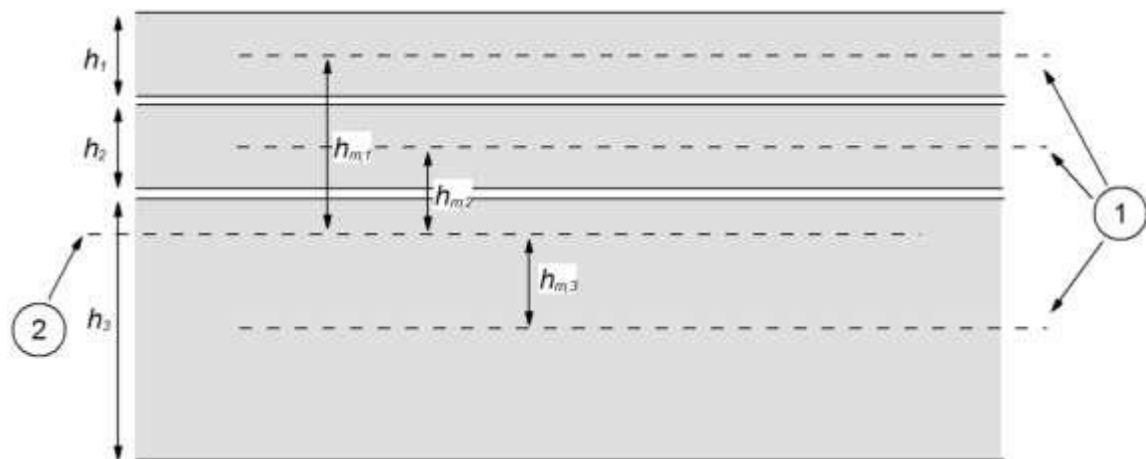
Для розрахунку прогину (будь-якого шару скла) при згині [122, с.23]:

$$h_{ef;w[SLS]} = \sqrt[3]{\sum_k h_k^3 + 12\omega(\sum_i h_k h_{m;k}^2)}, \quad (1.3)$$

де ω – коефіцієнт передачі зсуву від 0 до 1, що відповідає відсутності (0) і «повному» зсуву (1) [122, с.23];

h_k, h_j – товщина шарів скла (рис. 1.13) [122, с.23];

$h_{m;k}, h_{m;j}$ – відстань від середини k -, j - шарів скла до середини багатошарового скла (рис. 1.13) [122, с.24].



1 – середина кожного шару скла

2 – середина багатошарового скла

Рис. 1.13. Представлення розмірів багатошарового скла

згідно з prEN 16612: 2013 [122, с.24]

Інші моделі «ефективної товщини» представлені у дослідженнях Л. Галуппі, Дж. Ройєра Карфаньї [80-82] та С. Дж. Беннісона [32-34], а також у ряді робіт з проектування скляних конструкцій [35, 77, 92, 116].

Чисельне моделювання напружено-деформованого стану багатошарових скляних конструкцій за допомогою методу скінченних елементів представлено у роботах І. Іванова [100], Г. Молнар [111], Л. Шабле [127, 128], А. Земанової [152], М. Фрілінг [79], С. Дж. Беннісона [32-34].

1.7. Висновки до розділу 1

В результаті огляду літератури та існуючих практик будівництва, наявних експериментальних даних та методик розрахунку скляних багатошарових плит можна зробити наступні висновки:

1. Використання скляних багатошарових плит перекриття, покриття та інших несучих елементів відповідає сучасним архітектурним рішенням, водночас, забезпечуючи енергоефективність, екологічність, достатню міцність та ряд переваг у порівнянні із традиційними матеріалами.

2. Необхідно розробити методику досліджень скляних багатошарових плит на згин і провести випробування з метою розробки рекомендацій з

проектування.

3. Враховуючи крихке руйнування скла, необхідно застосувати сучасні методи вимірювання деформацій та процесу формування тріщин до моменту повного руйнування скла.

4. Враховуючи вплив на фізико-механічні характеристики скла різних факторів, таких як хімічний склад, технологія виготовлення, температурно-вологісний режим, геометричні розміри, методи зміцнення скла, необхідно провести дослідження фізико-механічних характеристик скла дослідних зразків.

5. Відсутня загальноприйнята методика розрахунку скляних багатошарових плит, через що виникає потреба у дороговартісних випробуваннях моделей конструкцій. Наявні експериментальні та теоретичні дослідження носять несистемний характер.

РОЗДІЛ 2. ОБСЯГ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обсяг експериментальних досліджень

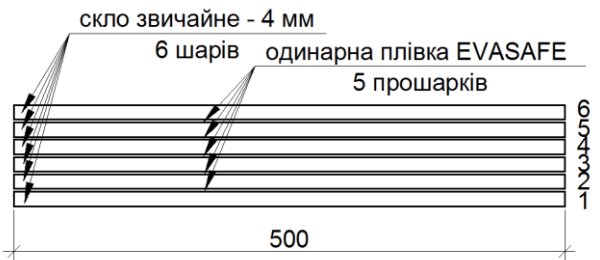
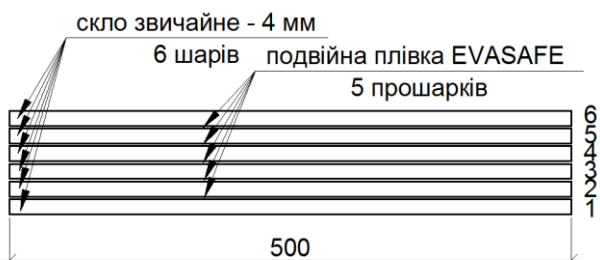
Для вирішення задач відповідно до поставленої мети, необхідно було провести натурні експериментальні дослідження скляних багатошарових плит, опертих по чотирьох кутах, що працюють на згин під дією короткочасного статичного навантаження, прикладеного через штамп посередині дослідних зразків та визначити фізико-механічні характеристики матеріалів, які використовувались для виготовлення цих плит.

2.1.1. Зразки скляних багатошарових плит для дослідження на згин

Для проведення експериментів за технологією триплексації були виготовлені дослідні зразки-близнюки скляних багатошарових плит з розмірами в плані 500×500 мм різних серій в залежності від типу шарів скла, товщини плит, наявності армування (табл.2.1). Для міжшарового ламінування плит використовувалася плівка типу EVASAFE (Bridgestone, Японія).

Таблиця 2.1

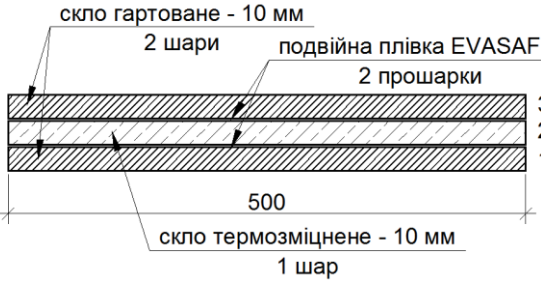
Характеристики дослідних зразків

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

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5	6
1	ПСБ-1.3 ... ПСБ-1.8	500×500	31,6	6	скло звичайне - 10 мм 3 шари подвійна плівка EVASAFE 2 прошарки 500 3 2 1
2	ПСБ-2.1 ... ПСБ-2.3	500×500	31,6	3	скло звичайне - 10 мм 2 шари подвійна плівка EVASAFE 2 прошарки 500 3 2 1 скло гартоване - 10 мм 1 шар
3	ПСБ-3.1	500×500	31,6	1	скло звичайне - 10 мм 3 шари подвійна плівка EVASAFE 2 прошарки 500 3 2 1 тканина з вуглецевих волокон SikaWrap - 230 C
	ПСБ-3.2	500×500	31,6	1	скло звичайне - 10 мм 2 шари подвійна плівка EVASAFE 2 прошарки 500 3 2 1 скло гартоване - 10 мм 1 шар тканина з вуглецевих волокон SikaWrap - 230 C
4	ПСБ-4.1 ... ПСБ-4.3	500×500	31,6	3	скло гартоване - 10 мм 1 шар подвійна плівка EVASAFE 2 прошарки 500 3 2 1 скло звичайне - 10 мм 2 шари
5	ПСБ-5.1 ... ПСБ-5.2	500×500	31,6	2	скло гартоване - 10 мм 2 шари подвійна плівка EVASAFE 2 прошарки 500 3 2 1 скло звичайне - 10 мм 1 шар

Продовження табл. 2.1

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

Плита марки ПСБ-1.1 була виготовлена із 6 шарів звичайного скла, товщиною по 4 мм кожен, та одинарної плівки між ними, без армування.

Плита марки ПСБ-1.2 була виготовлена аналогічно плиті марки ПСБ-1.1 за винятком розміщення між шарами скла подвійної плівки.

Плити марок ПСБ -1.3 ... ПСБ-1.8 складались із 3 шарів звичайного скла, товщиною по 10 мм кожен, ламінованих між собою подвійною плівкою, без армування.

У плитах марок ПСБ-2.1 ... ПСБ-2.3 у нижньому шарі використовувалось гартоване скло, у середньому та верхньому шарах – звичайне, усі шари скла були товщиною по 10 мм кожен та ламінувались між собою подвійною плівкою.

Плита марки ПСБ-3.1 була виготовлена аналогічно плитам марок ПСБ-1.3 ... ПСБ-1.8 з додатковим використанням підсилюючої тканини із однонаправлених вуглецевих волокон SikaWrap – 230 С між нижнім та середнім шарами звичайного скла.

Плита марки ПСБ-3.2 була виготовлена аналогічно плитам марок ПСБ-2.1 ... ПСБ-2.3 з додатковим використанням підсилюючої вуглецевої тканини SikaWrap – 230 С між нижнім шаром із гартованого скла та середнім шаром із звичайного скла.

Плити марок ПСБ-4.1 ... ПСБ-4.3 складалась із звичайного скла у нижньому і середньому шарах та гартованого скла – у верхньому шарі, усі шари – товщиною по 10 мм, ламіновані між собою подвійною плівкою.

У плитах марок ПСБ-5.1, ПСБ-5.2 у нижньому та верхньому шарах розміщувалось гартоване скло, у середньому – звичайне, товщиною по 10 мм кожне, ламіновані між собою подвійною плівкою.

Плити марок ПСБ-6.1 ... ПСБ-6.3 були виготовлені по аналогії із плитами марок ПСБ-5.1, ПСБ-5.2 за виключенням того, що у середньому шарі було використане термозмінене скло.

Скляні багатошарові плити виготовлялися у м. Львові на потужностях виробників скляних конструкцій ТзОВ ТВК «Радю» (госпдоговір №264) та ТОВ «Глас Трьох Львів» (госпдоговір №849).

2.1.2. Зразки для дослідження фізико-механічних характеристик скла на розтяг при згині

Для визначення фізико-механічних характеристик скла на розтяг при згині було прийнято схему випробувань, аналогічну як для керамічної балки на трьохточковий згин (ЗТЗ) згідно з ASTM C1161-13 [23] (рис. 2.1).

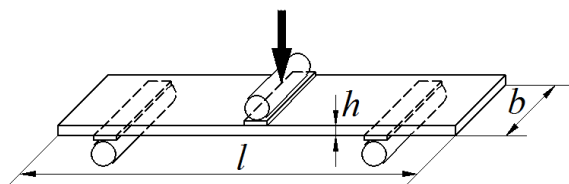


Рис. 2.1. Схема розміщення зразків скляних балок під час випробувань на розтяг при згині

Перед проведенням експериментів усі зразки обмірювали з врахуванням рекомендацій з п. 7.1 EN 1288-3:2000 [52] та п. 13.1.1 ASTM C158-02 (2012) [26]. Ширину визначали як середнє арифметичне з 3 індивідуальних вимірювань. Товщину визначали як середнє арифметичне з

4 індивідуальних вимірювань з точністю до 0,05 мм. Геометричні розміри дослідних зразків подані у табл.2.2.

Таблиця 2.2

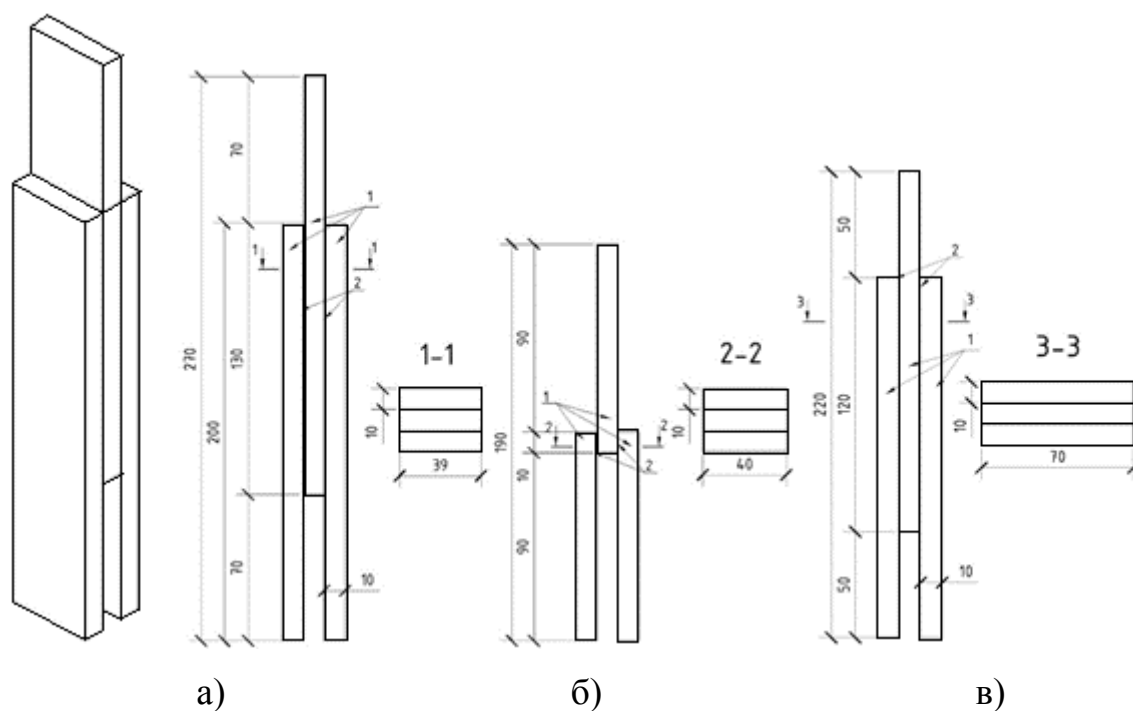
Маркування та геометричні розміри зразків звичайного скла
для дослідження фізико-механічних характеристик на розтяг при згині

Марка зразка	Розміри зразків		
	Ширина [b], мм	Довжина [l], мм	Товщина [h], мм
GP-1	40,50	197,60	10,00
GP-2	39,90	197,10	10,00
GP-3	40,15	196,80	10,00
GP-4	40,20	196,50	10,00
GP-5	40,00	196,50	10,00
GP-6	40,15	197,00	10,00

Згідно з п. 6.3 [52] зразки були виготовлені плоскими, їх бічні кромки – паралельними (див. рис. 2.1). Усі механічні операції для підготовки зразків згідно з вимогами з п. 6.3 [52] та п. 11.1.1 [26] виконувались не пізніше ніж за 24 години перед випробуванням. Розміри зразків відповідали вимогам з п. 11.1.1 [26], зокрема: загальна довжина зразків l (див. табл. 2.2) перевищувала відстань між опорами $l_s = 100 \text{ мм}$ (див. п. 2.2.3) на величину більшу ніж 12,7 мм; співвідношення ширини до товщини зразків b/h відповідало рекомендованому діапазону між 2:1 і 10:1; «номінальна» ширина зразків 40 мм перевищувала мінімальне значення 9,5 мм. Також, відповідно до п. 12.1 [26] дослідні зразки прямокутного перерізу виготовили з врахуванням відстані між опорою та точкою прикладення навантаження, що була не меншою ніж «номінальна» ширина зразків та перевищувала товщину зразків більш ніж вчетверо. Згідно з п. 6.4 [52] та п. 13.2 [26] для утримання фрагментів скла після його руйнування була використана прозора поліетиленова низькомодульна плівка товщиною 8 мкм.

2.1.3. Зразки для дослідження зчеплення шарів скла під дією статичного навантаження

Для виконання досліджень зчеплення шарів скла між собою за допомогою різних клеючих матеріалів було виготовлено 6-ть серій дослідних зразків (рис. 2.2).



1 – скляна пластина; 2 – матеріал для склеювання

Рис. 2.2. Дослідні зразки: а) серій 1 ... 4; б) серії 5; в) серії 6

Усі зразки складались із трьох скляних пластин, з'єднаних між собою внапуск за допомогою клейового з'єднання. Геометричні розміри скляних пластин, довжина клейового шва, а також застосований матеріал для склеювання представлені у табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Характеристики зразків для дослідження зчеплення шарів скла

Серія	Марка	Розміри скляних пластин			Довжина клеювого шва [l _ш], мм	Матеріал для склеювання
		Ширина [b], мм	Довжина [l], мм	Товщина [h], мм		
1	C3-1.1	39	200	10	130	Акваріумний клей «Den Braven Montagefix-AQ» (чорний)
	C3-1.2					
2	C3-2.1					Акваріумний клей «Den Braven Zwaluw Aqua-Silicone» (прозорий)
	C3-2.2					
3	C3-3.1					Термоклей «Торех 42E113»
	C3-3.2					
4	C3-4.1					Ультрафіолетовий клей «Loxcal Engineering Adhesives UV 30-23»
	C3-4.2					
5	C3-5.1	40	100	10	10	
	C3-5.2					
6	C3-6.1	70	170	10	120	Полімерна плівка «EVASAFE» (Bridgestone, Японія)
	C3-6.2					

На запропоновану конструкцію дослідних зразків 6-ої серії (див. рис. 2.2, в і табл. 2.3) 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.

2.2. Методики експериментальних досліджень

2.2.1. Визначення несучої здатності та деформативності скляних багатошарових плит

Випробування скляних багатошарових плит згідно з програмою експериментальних досліджень (див. табл. 2.1) проводили в приміщенні науково-дослідної лабораторії НДЛ-23 кафедри «Будівельні конструкції та мости» Національного університету «Львівська політехніка».

Схема та вигляд установки для випробування на згин скляних багатошарових плит під дією короткочасної статичної зосередженої сили через жорсткий штамп посередині дослідних зразків представлені на рис. 2.3. Дана установка була виготовлена по аналогії до застосованої раніше установки для випробувань пінобетонних плит, які працювали на продавлювання [14, 15], після чого в процесі виконаних робіт вона була апробована та удосконалена [8-13].

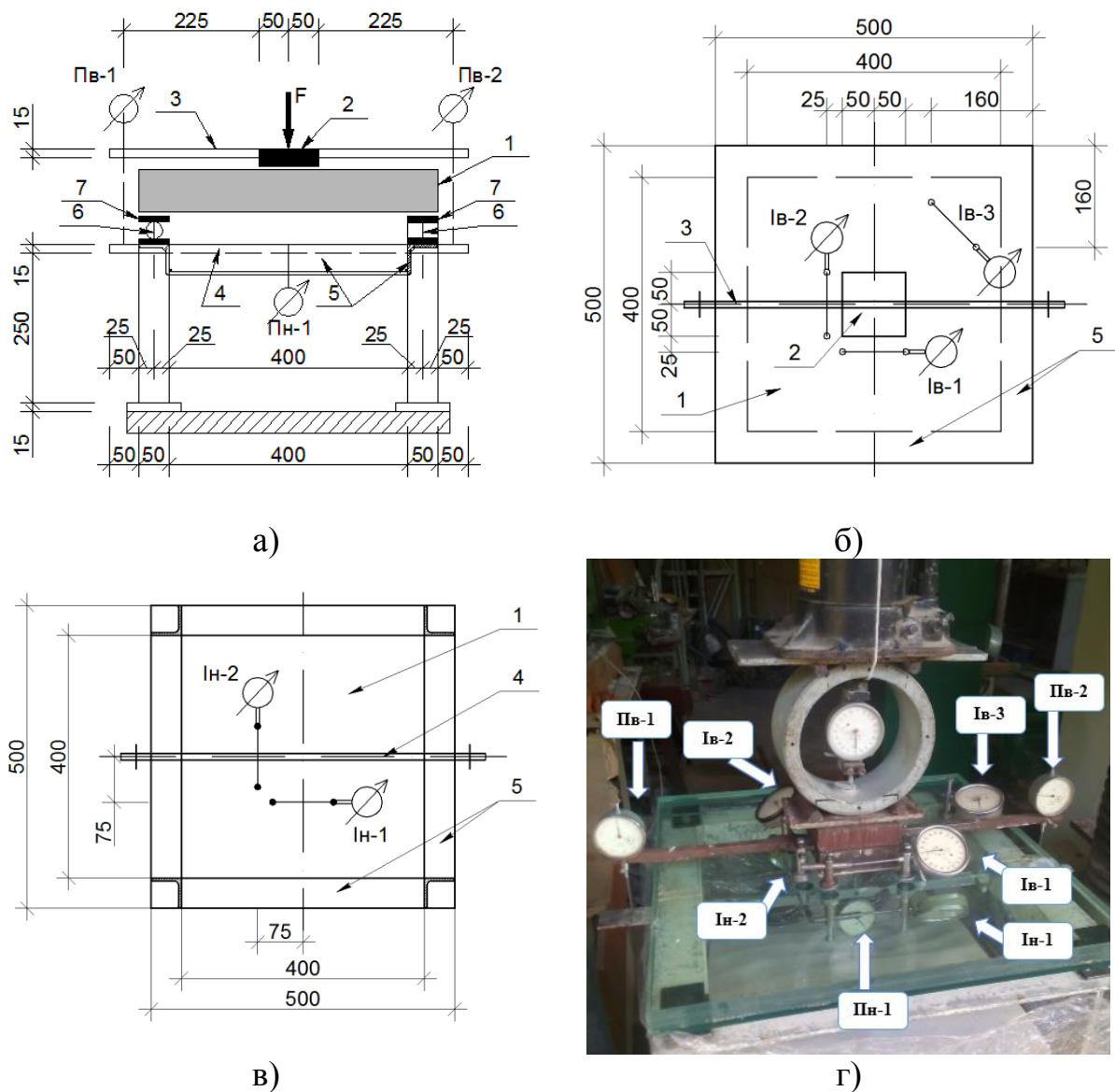
Вертикальні переміщення (прогини) верхньої та нижньої поверхонь плит заміряли мікроіндикаторами/індикаторами¹ (див. рис. 2.3, а) з ціною поділки 0,001 мм / 0,01 мм, встановленими на верхній планці 3 (Пв-1, Пв-2) та нижній планці 4 (Пн-1). Деформації скла у верхній зоні плит заміряли мікроіндикаторами з ціною поділки 0,001 мм у двох взаємно-перпендикулярних напрямках біля штампу (Ів-1, Ів-2)² та додатково по діагоналі (Ів-3) для окремих марок плит³ (див. рис. 2.3, б), а у нижній зоні –

¹ У плитах марок ПСБ-1.1 ... ПСБ-1.4, ПСБ-2.1 прогини заміряли мікроіндикаторами Пв-1, Пв-2, Пн-1, у плитах марок ПСБ-1.5 ... ПСБ-1.8, ПСБ-2.2, ПСБ-3.1, ПСБ-3.2 – індикаторами Пв-1, Пв-2, Пн-1 (див. рис. 2.3). Для плити марки ПСБ-2.3 використовували тільки мікроіндикатор Пн-1, для плит марок ПСБ-4.1 ... ПСБ-4.3, ПСБ-5.1, ПСБ-5.2, ПСБ-6.1, ПСБ-6.2 – індикатор Пн-1 (див. рис. 2.12, рис. 2.13), причому у плитах марок ПСБ-4.2, ПСБ-4.3, ПСБ-6.1, ПСБ-6.2 також використовували індикатори Пв-1 ... Пв-4 для заміру вертикальних переміщень (прогинів) над опорами (див. рис. 2.4, рис. 2.13).

² Для заміру деформацій біля штампу мікроіндикатори Ів-1, Ів-2 у верхній зоні та Ін-1, Ін-2 у нижній зоні використовували у плитах марок ПСБ-1.1 ... ПСБ-1.8, ПСБ-2.1, ПСБ-2.2, ПСБ-3.1, ПСБ-3.2 (див. рис. 2.3). У плитах марок ПСБ-2.3, ПСБ-4.1, ПСБ-5.1, ПСБ-5.2 у верхній зоні біля штампу використовували мікроіндикатор Ів'-1, у нижній – Ін-1 (див. рис. 2.12), а у плитах ПСБ-4.2, ПСБ-4.3, ПСБ-6.1, ПСБ-6.2 – Ів-1 та Ін-1, відповідно (див. рис. 2.13).

³ Мікроіндикатор Ів-3 (див. рис. 2.3) використовували для скляних багатошарових плит марок ПСБ-1.5 ... ПСБ-1.8, ПСБ-2.1, ПСБ-2.2, ПСБ-3.1, ПСБ-3.2. По аналогії, для плит марок ПСБ-2.3, ПСБ-4.1, ПСБ-5.1, ПСБ-5.2 у вказаній зоні (див. п. 2.2.2 даної роботи) використовували мікроіндикатор Ів-2 (див. рис. 2.12), а для плит марок ПСБ-4.2, ПСБ-4.3, ПСБ-6.1, ПСБ-6.2 – Ів-3 (див. рис. 2.13). У плитах марок ПСБ-1.1 ... ПСБ-1.4 деформації при такому розміщенні мікроіндикатора не заміряли.

мікроіндикаторами Ін-1, Ін-2 біля штампу¹ (див. рис. 2.3, в).



- а) схема розміщення мікроіндикаторів /індикаторів
Пв-1, Пв-2 та Пн-1 (загальний вигляд схеми);
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. 2.3. Установка для випробувань на згин скляних багатошарових плит:

а) схема розміщення мікроіндикаторів /індикаторів

Пв-1, Пв-2 та Пн-1 (загальний вигляд схеми);

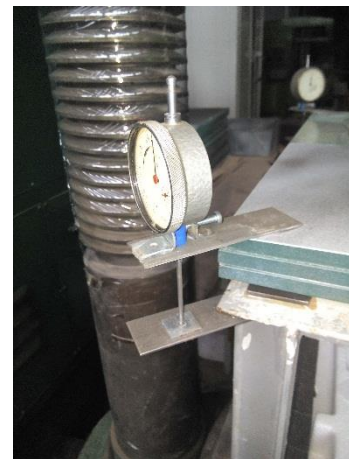
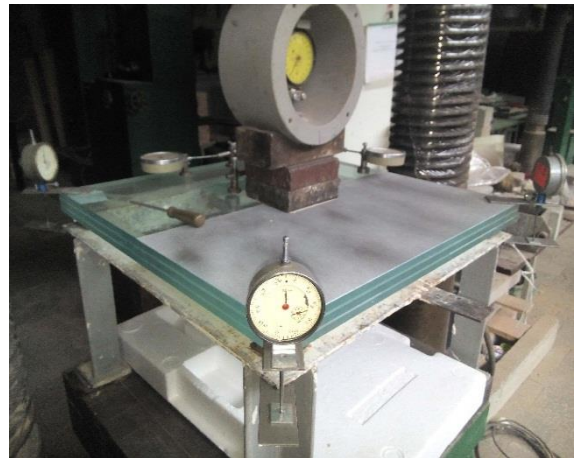
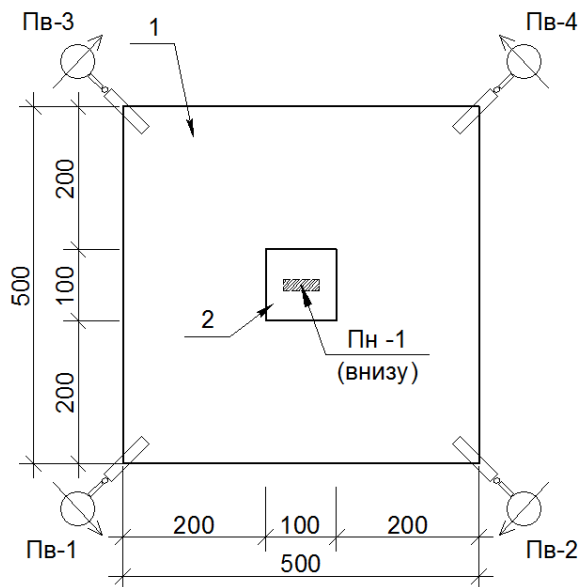
б) схема розміщення мікроіндикаторів Ів-1... Ів-3 (вигляд зверху);

в) схема розміщення мікроіндикаторів Ін-1... Ін-2 (вигляд знизу);

г) вигляд установки в робочому стані

¹ Для заміру деформацій біля штампу мікроіндикатори Ів-1, Ів-2 у верхній зоні та Ін-1, Ін-2 у нижній зоні використовували у плитах марок ПСБ-1.1 ... ПСБ-1.8, ПСБ-2.1, ПСБ-2.2, ПСБ-3.1, ПСБ-3.2 (див. рис. 2.3). У плитах марок ПСБ-2.3, ПСБ-4.1, ПСБ-5.1, ПСБ-5.2 у верхній зоні біля штампу використовували мікроіндикатор Ів'-1, у нижній – Ін-1 (див. рис. 2.12), а у плитах ПСБ-4.2, ПСБ-4.3, ПСБ-6.1, ПСБ-6.2 – Ів-1 та Ін-1, відповідно (див. рис. 2.13).

Для плит марок ПСБ-4.2, ПСБ-4.3, ПСБ-6.1, ПСБ-6.2 додатково до прогину посередині плит заміряли вертикальні переміщення (прогини) над опорами (рис. 2.4).



а)

б)

1 – дослідний зразок плити (шари умовно не показані); 2 – металевий штамп

Рис. 2.4. Схема заміру вертикальних переміщень (прогинів)

плит марок ПСБ-4.2, ПСБ-4.3, ПСБ-6.1, ПСБ-6.2:

- а) розміщення кутових (Пв-1 ... Пв-4) та середнього (Пн-1) індикаторів (вигляд зверху);
- б) вигляд установки в робочому стані

Зосереджене навантаження від гідравлічного домкрату прикладали через металевий штамп 2 розмірами 100×100 мм посередині плит (див. рис. 2.3 а, б, рис. 2.4, а) ступенями по 0,5 - 1 кН з витримкою 5 хв. Контроль за прикладеним навантаженням вели шляхом фіксації показів тарованого динамометра

(див. рис. 2.3 г, рис.2.4 б), встановленого між штампом та гідравлічним домкратом.

Умови середовища в лабораторії для проведення випробувань плит були прийняті аналогічні до вимог дослідження фізико-механічних характеристик скла (див. п. 2.2.3). Температура повітря в лабораторії знаходилась у межах 23 ± 5 °С, відносна вологість – між 40% та 70%. Зразки плит обробляли щонайменше за 24 год перед випробуванням та витримували в умовах проведення випробувань не менше, ніж 4 години. Між зразком та опорами установки встановлювали гумові прокладки 7 (див. рис. 2.3 а) товщиною 3 мм і твердістю (40 ± 10) IRHD згідно з ISO 48.

Схема опирання та навантаження (рис. 2.5) при випробуваннях дослідних зразків плит на згин від зосередженого навантаження відповідала роботі плит, вільно опертих, що працюють в двох напрямках і опираються по чотирьох кутах на шарнірні опори [5]. Для цього, в двох протилежних кутах по діагоналі плит встановлювали шарнірні кульові опори 3 (див. рис. 2.5), які допускали поворот у двох взаємно перпендикулярних напрямках (одна рухома опора, друга – нерухома), а в двох інших кутах зразків встановлювали шарнірні циліндричні рухомі опори 4, які допускали поворот в одному з взаємно перпендикулярних напрямків.

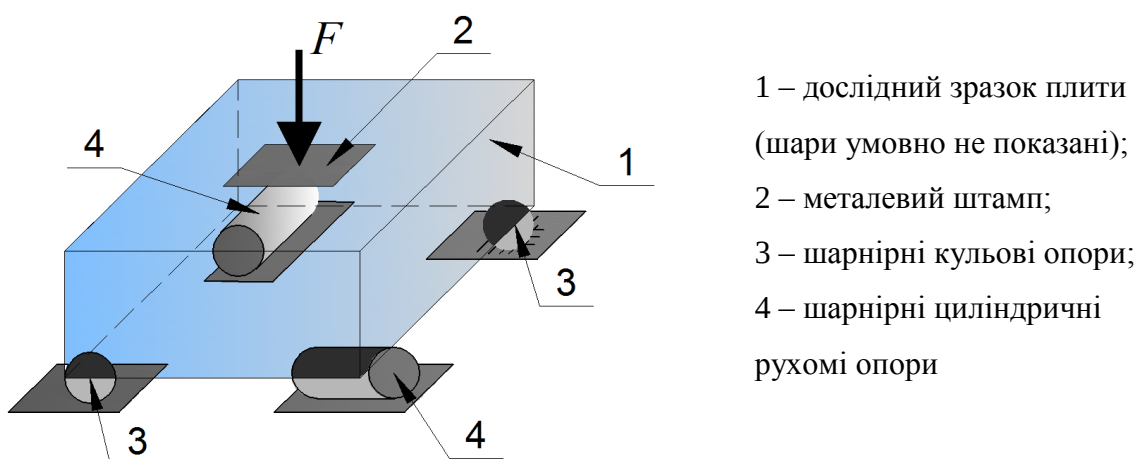


Рис. 2.5. Схема опирання та навантаження дослідних зразків

2.2.2. Вимірювання деформацій скляних багатошарових плит за допомогою методу кореляції цифрових зображень

У зв'язку з раптовим характером руйнування скла, як крихкого матеріалу, виникла проблема швидкого зняття показів із механічних приладів безпосередньо перед руйнуванням. Крім цього, механічні прилади могли виходити з ладу в проміжку між етапами навантаження, а їх заміна у ході експерименту не завжди була технічно можливою.

Для отримання повної картини деформування плит було використано безконтактний оптичний метод вимірювання деформацій за допомогою кореляції цифрових зображень (КЦЗ). Цифрове зображення – двовимірне зображення у вигляді матриці пікселів. Субзображення розмірами $m \times n$ пікселів з кількома відтінками сірого кольору називають фасетами [108, 118]. Алгоритм обробки цифрових зображень за допомогою методу КЦЗ полягає у відслідковуванні точок (фасетів) зображень поверхні плити, які отримані для різних навантажень [42].

У методі КЦЗ використовують такі основні параметри (поняття) (рис. 2.6): поверхня із стохастичною (плямистою або нерівномірно-забарвленою) текстурою або спекл-поверхня; розмір фасета або розмір обчислення a_f [75, 78]; розмір кроку фасетів або точкова відстань чи крок сітки k_f [118]; перекриття фасета a_o .

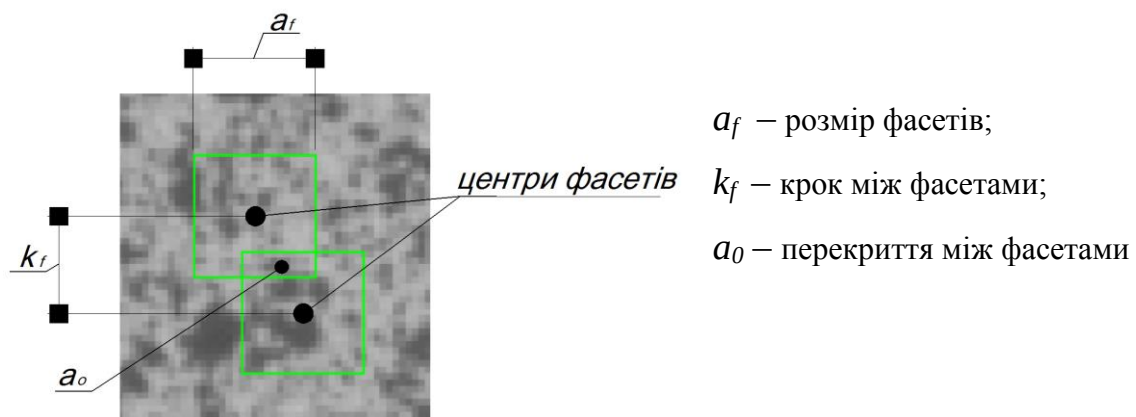


Рис. 2.6. Фрагмент спекл-поверхні

Для плит марок ПСБ-1.7, ПСБ-2.2 та ПСБ-3.2 необхідну для аналізу спекл-поверхню отримували за допомогою ручного нанесення точок чорного кольору на попередньо пофарбовану у білий колір частину верхньої грані плит (рис. 2.7).



а)

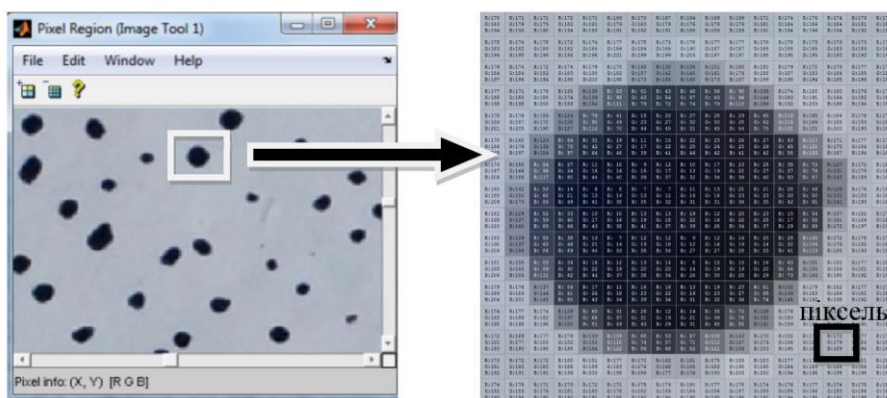


б)

Рис. 2.7. Підготовка поверхні типового експериментального зразка для методу КЦЗ при ручному нанесенні стохастичної текстури:

а) загальний вигляд плити; б) розподіл спеклів (плям) на поверхні плити

У зв'язку з ручною підготовкою зразків розмір отриманих спеклів був змінним (рис. 2.8).



а)

б)

Рис. 2.8. Фрагмент спекл-поверхні типового експериментального зразка¹ при ручному нанесенні стохастичної текстури: а) загальний вигляд;

б) зображення спекла чорного кольору

¹ Аналіз розміру спекла на зображенні виконано через перегляд значень пікселів за допомогою інструменту «Вибір області дослідження (Pixel Region Tool)» функції «imtool» з додатку «Image Processing Toolbox» програми MATLAB.

Схема випробування дослідних зразків марок ПСБ-1.7, ПСБ-2.2 та ПСБ-3.2 відповідала методиці дослідження на згин від дії зосередженого статичного навантаження скляних багатошарових плит, вільно опертих по чотирьох кутах (див. п. 2.2.1). Додатково до годинникових мікроіндикаторів (див. рис. 2.3), деформації скла у верхній зоні заміряли за допомогою методу КЦЗ (рис. 2.9). Для цього, на всіх етапах навантаження після витримки 5 хв за допомогою камери SONY SLT-A58 та ПК з відповідним програмним забезпеченням дистанційно виконували фотофіксацію частини поверхні зразків із стохастичною текстурою.

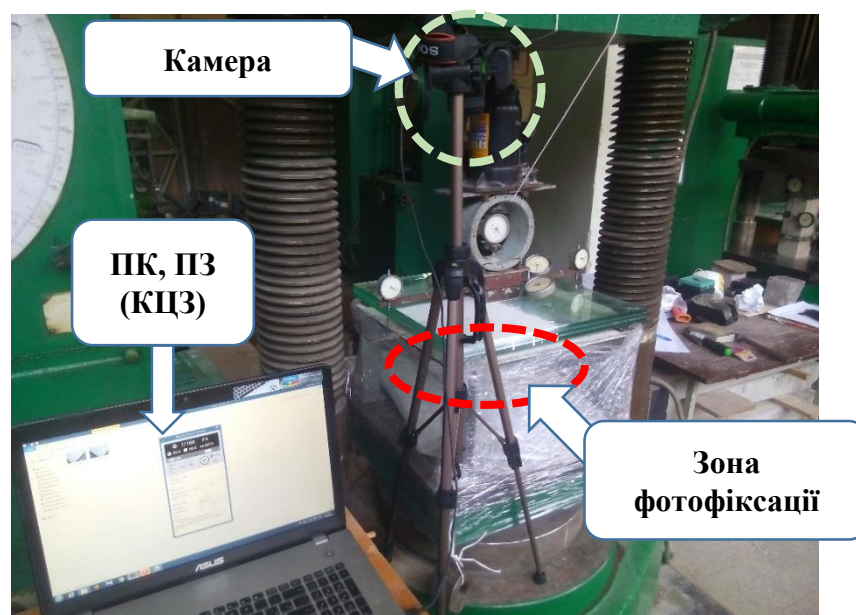


Рис. 2.9. Установка для вимірювання деформацій верхньої зони скляних багатошарових плит марок ПСБ-1.7, ПСБ-2.2 та ПСБ-3.2 за допомогою методу КЦЗ

Отримані зображення піддавали обробці за допомогою алгоритму кореляції цифрових зображень в програмному пакеті GOM Correlate (GOM GmbH, Німеччина). Візуальний вибір переважającego діапазону відносних деформацій для плит марок ПСБ-1.7, ПСБ-2.2 та ПСБ-3.2 здійснювали за допомогою графічного елемента інтерфейсу «Шкала легенд» («Legend») (рис. 2.10). Перевірку обраного діапазону проводили, використовуючи програмну команду «Мітки відхилення» («Deviation labels»)

(див. рис. 2.10). Виклик команди: меню «Inspection» → Deviation labels → Ctrl (попередній перегляд мітки у вказаному місці при наведенні курсора на моніторі) → Ctrl+LMB (створення мітки) → RMB (дезактивація команди). Інший шлях: панель інструментів «Pointwise Inspection» → розділ «labels» → Deviation labels.

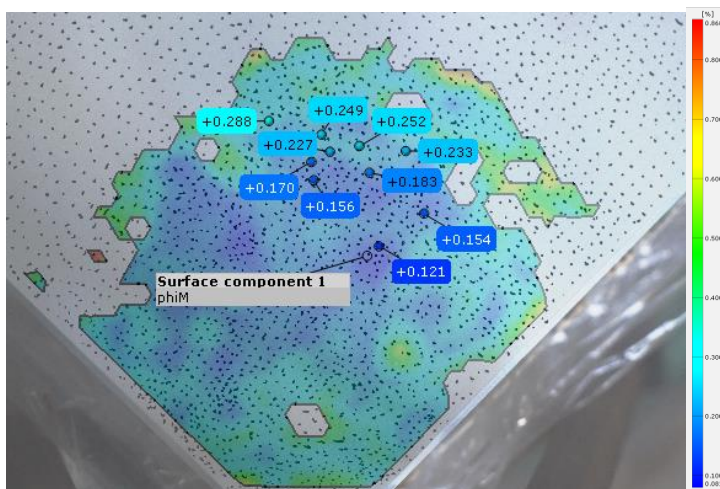


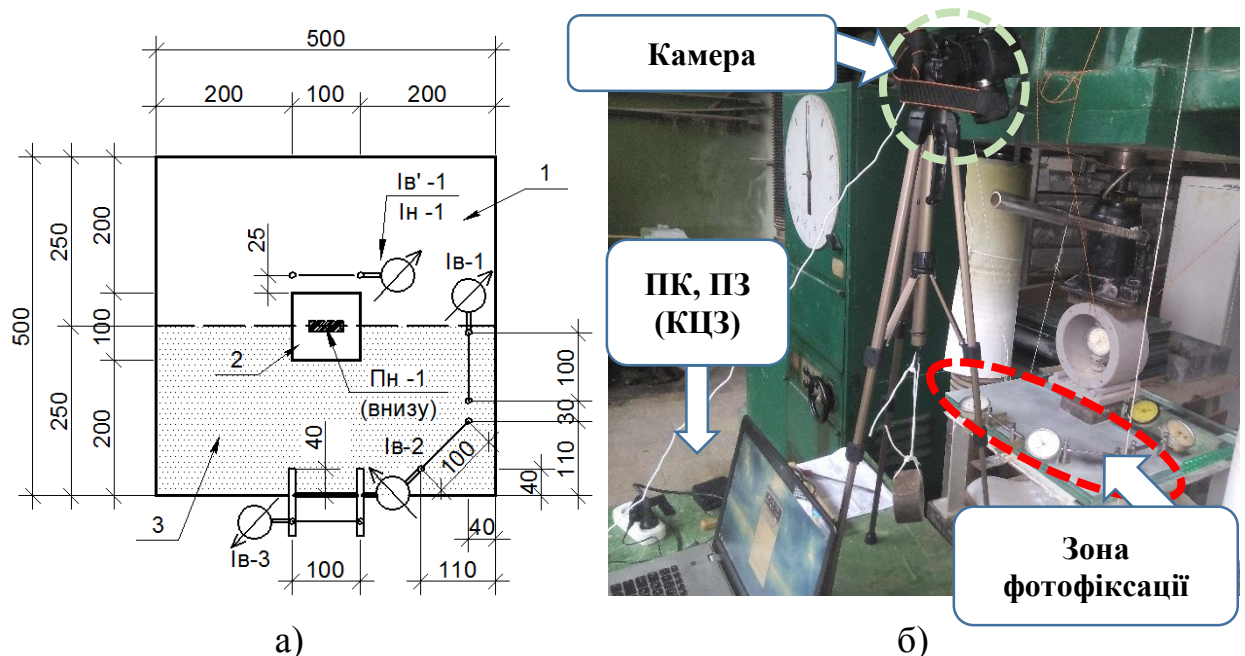
Рис. 2.10. Аналіз зображень полів деформацій в програмі GOM Correlate (на прикладі плити марки ПСБ-3.2)

Підготовку поверхні плит марок ПСБ-2.3, ПСБ-4.1 ... ПСБ-4.3, ПСБ-5.2, ПСБ-6.1, ПСБ-6.2 виконали нанесенням стохастичної текстури при розпиленні аерозольної фарби чорного кольору на попередньо пофарбовану у білий колір половину верхньої грані плит (рис. 2.11).



Рис. 2.11. Підготовка поверхні типового експериментального зразка для методу КІЗ при нанесенні стохастичної текстури аерозольною фарбою

Для плит марок ПСБ-2.3, ПСБ-4.1 та ПСБ-5.2 деформації заміряли двома способами: безконтактно – методом КЦЗ та за допомогою механічних мікроіндикаторів, розташованих у межах зони фотофіксації (рис. 2.12).

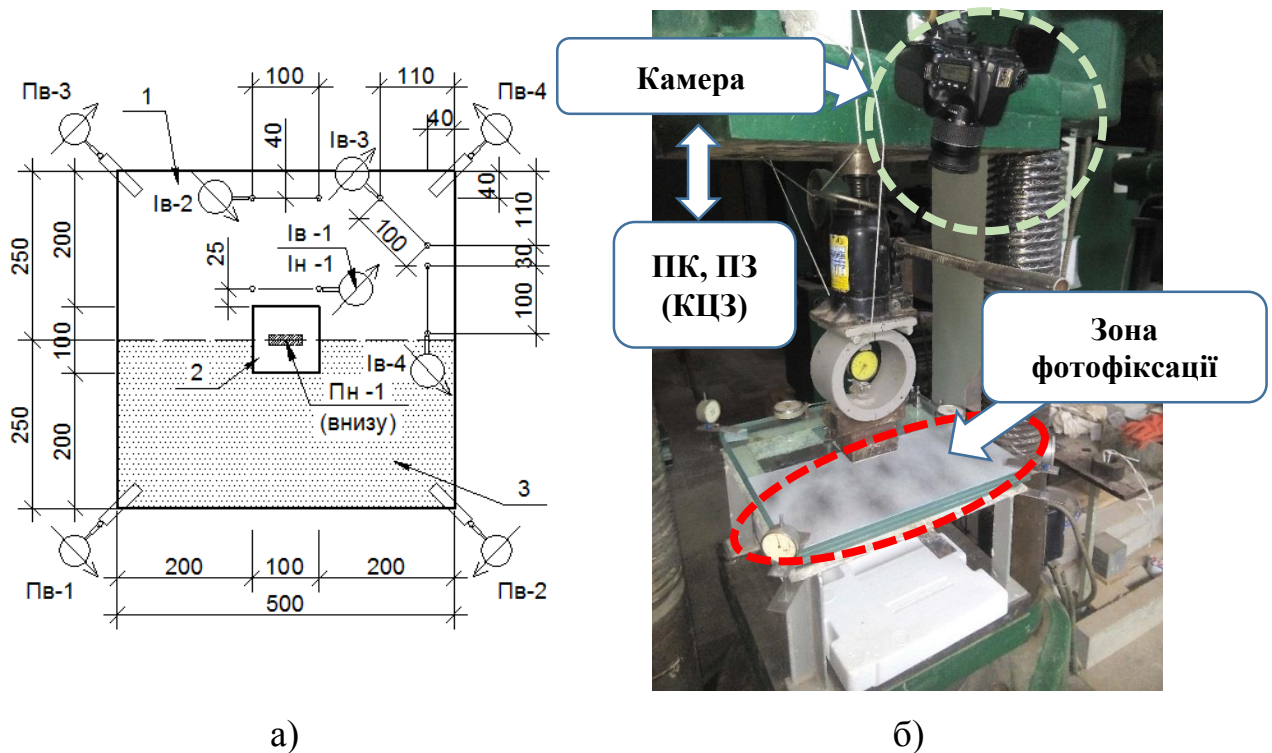


1 – дослідний зразок; 2 – металевий штамп; 3 – зона фотофіксації

Рис. 2.12. Установка для вимірювання деформацій верхньої зони скляних багатошарових плит марок ПСБ-2.3, ПСБ-4.1 та ПСБ-5.2:

а) схема розміщення зони фотофіксації (КЦЗ) та мікроіндикаторів Ів'-1, Ів-1 ... Ів-3; б) вигляд установки в робочому стані

Для плит марок ПСБ-4.2, ПСБ-4.3, ПСБ-6.1, ПСБ-6.2 установка мала вигляд, як показано на рис. 2.13. Для зручності виконання якісної фотофіксації зображень поверхні плит на етапах навантаження механічні мікроіндикатори Ів-1 ... Ів-4 (див. рис. 2.13) розташували на другій половині дослідного зразка, яку не використовували для фотографування та обробки за допомогою методу КЦЗ.



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

Рис. 2.13. Установка для вимірювання деформацій верхньої зони скляних багатошарових плит марок ПСБ-4.2, ПСБ-4.3, ПСБ-6.1, ПСБ-6.2:

- а) схема розміщення зони фотофіксації (КЦЗ) та мікроіндикаторів Ів-1 ... Ів-4;
 б) вигляд установки в робочому стані

В результаті, після кожного етапу навантаження для аналізованої зони плит отримували сфотографоване зображення деформованої поверхні та відповідні покази мікроіндикаторів.

Визначення відносних деформацій виконали в програмі GOM Correlate за допомогою програмного інструмента «Екстензометра» / «Extensometer» (меню «Construct» → Distance → Extensometer), застосованого на попередньо обраній ділянці паралельно до кожного із мікроіндикаторів Ів'-1, Ів-1 ... Ів-3. Необхідні параметри команди «Екстензометр», початкову точку та довжину L , задавали на першій фотографії (етап «нульового навантаження») (рис. 2.14). Положення початкової точки вказували безпосередньо на моніторі у місці розташування одного із тримачів мікроіндикатора, довжину L в напрямку іншого тримача приймали рівну базі механічного приладу. Результати

вимірювань згідно з методом КЦЗ відносних деформацій ($eps L$) відносно трьох мікроіндикаторів відображали на моніторі при активації команди «Length Change» (меню «Inspection» → Check Dimentions → Distances → Length Change) для кожного етапу навантаження. Перша фотографія відповідала відносним деформаціям $eps L = 0\%$, решта – поступовому приросту деформацій (зі знаком «+» – розтяг, «-» – стиск).

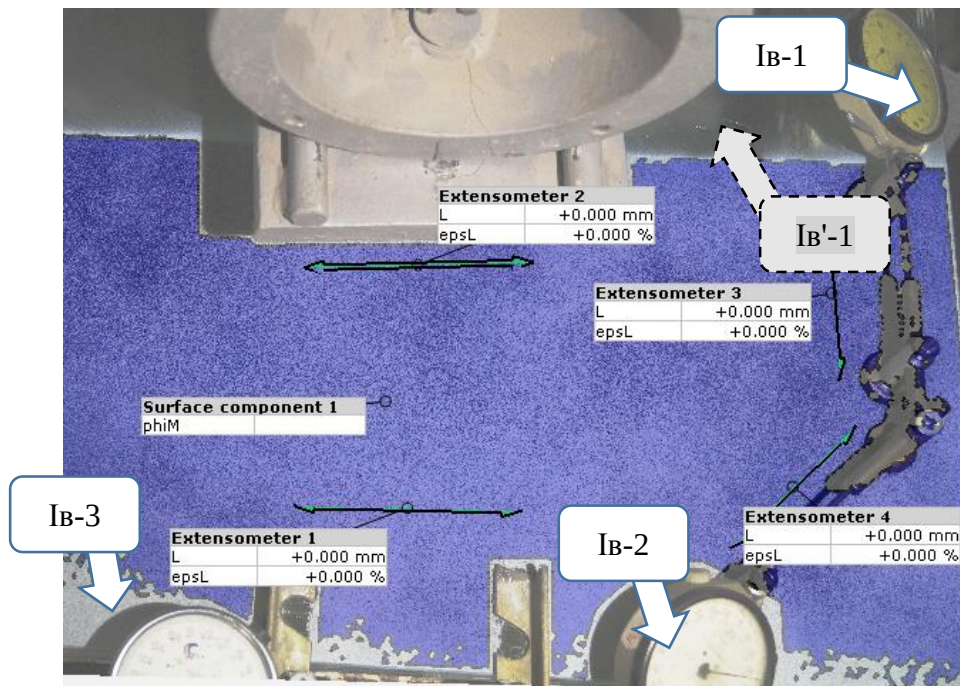


Рис. 2.14. Відображення абсолютних (L , мм) і відносних ($eps L$, %) деформацій згідно з методом КЦЗ за допомогою інструмента «Екстензометр» / «Extensometer» в програмі GOM Correlate (етап «нульового навантаження»)

Оцінку застосованому методу КЦЗ проводили порівнянням отриманих за допомогою методу КЦЗ значень відносних деформацій із відносними деформаціями, визначеними за показами мікроіндикаторів, через їх відношення між собою. Виміряні механічним способом абсолютні величини деформацій були прийняті як еталонні значення.

2.2.3. Визначення фізико-механічних характеристик матеріалів, застосованих у скляних багатошарових плитах

2.2.3.1. Випробування міцності скла на розтяг при згині

Випробувальні зразки встановлювали згідно з рис. 2.15, а. В рамках обмежень, передбачених нормами з випробувань скла (див. п.2.1.2.), геометрія зразків була підібрана таким чином, щоб відповідати також параметрам тестувальної установки (див. рис. 2.15, б). Для випробувань на згин була використана автоматична установка випробування, що складалась із випробувальної машини «LabTest®» (див. рис. 2.15, б) з програмним забезпеченням «Test & Motion®» для контрольної консолі.

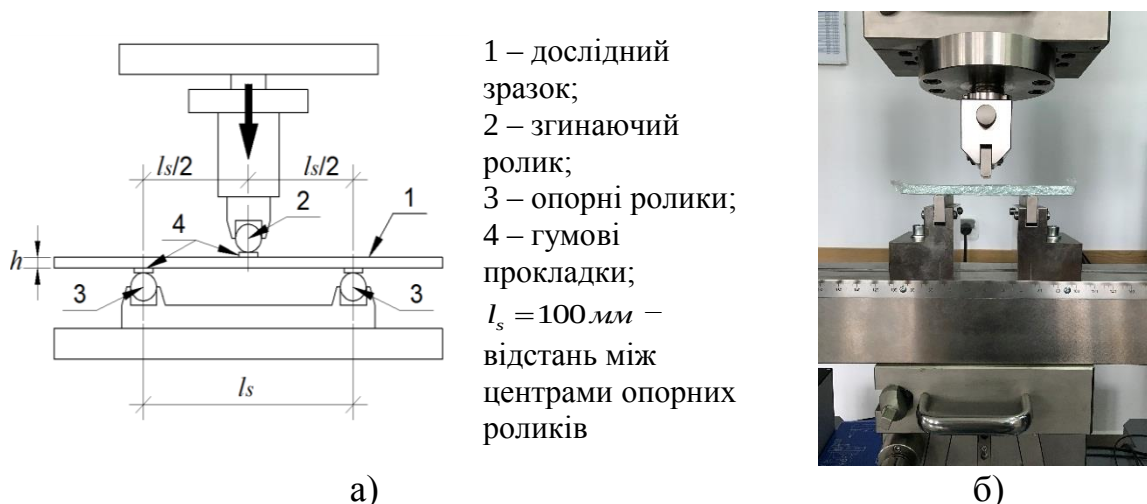


Рис. 2.15. Випробувальна установка для дослідження міцності скла на розтяг при згині: а) принципова схема; б) загальний вигляд

Зразки піддавали згину під рівномірно зростаючим згинальним навантаженням до моменту руйнування зі швидкістю, що не перевищувала нормативних значень для звичайного скла: $1,1 \pm 0,2$ МПа/с згідно з п. 13.2 ASTM C158-02 (2012) [26] та $2 \pm 0,4$ Н/(мм²×с) згідно з п. 7.2 EN 1288-3:2000 [52]. При цьому, початкове навантаження на зразки відповідно до п. 13.2 [26] було меншим за таке, що зумовлювало напруження більші, ніж 25% від середнього модуля розриву.

Відповідно до п. 7.2, а також п. 9 [52] та п.13.2, п.14, п. 15 [26], під час випробувань заміряли максимальне навантаження та фіксували час, необхідний для досягнення такого навантаження.

Також відповідно до п. 8, п. 9 [52] та п.13.2, п. 15 [26] для кожного зразка встановлювали початкове місце руйнування – на краю (по кромці) або посередині зразка.

За допомогою програмного забезпечення «Test & Motion®» (рис. 2.16) виконували моніторинг та відображення всіх даних тесту та параметрів у графічному та числовому форматі з можливістю зміни налаштувань в режимі реального часу.

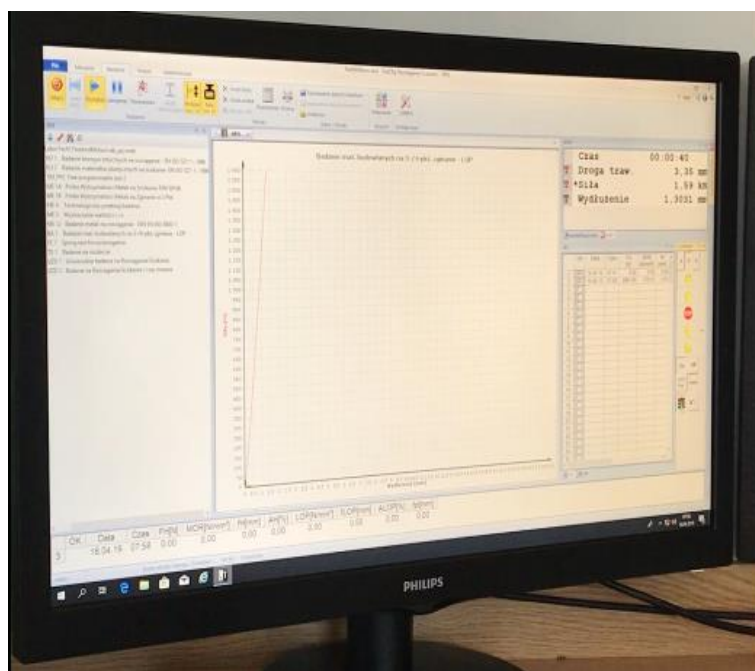


Рис. 2.16. Вигляд екрана контрольної консолі з програмним забезпеченням «Test & Motion®»

Границя міцності на згин (flexural strength) – σ_{flex} або модуль крихкого руйнування (flexural modulus, modulus of rupture) – MOR для кожного зразка знаходилися за формулою згідно з п. 9.2 ASTM C1161-13 [23] як для балки при трьохточковому згині:

$$\sigma_{flex} = MOR = \frac{3 F_{max} \cdot l_s}{2 b \cdot h^2}, \quad (2.1)$$

де $\sigma_{flex} = \sigma_{bB} = S$ – міцність на згин, Мпа (σ_{bB} – позначення згідно з п. 8, п. 9 EN 1288-3:2000 [52]; S – позначення згідно з п.3.1.2, п. 8.1.1, п. 8.1.2, п. 14.1.1, п. 14.1.2 ASTM C158-02 (2012) [26] і п. 9.1, п. 9.2 ASTM C1161-13 [23]); F_{max} – руйнуюче навантаження, Н; l_s – віддаль між центрами опорних роликів, мм; b – ширина зразка, мм; h – товщина зразка, мм.

Швидкість збільшення максимального напруження $R = \Delta\sigma / \Delta t$ (МПа/с) через швидкість прикладення навантаження $\Delta F / \Delta t$ (Н/с) для звичайного та гартованого скла знаходилась за формулою по аналогії з п. 8.1.3 ASTM C158-02 (2012) [26]:

$$R = \frac{\Delta\sigma}{\Delta t} = \frac{3}{2} \frac{l_s}{b \cdot h^2} \times \frac{\Delta F}{\Delta t}, \quad (2.2)$$

де l_s – при трьохточковому згині – відстань між центрами опор, мм; b – ширина зразка, мм; h – товщина зразка, мм.

2.2.3.2. Визначення модуля пружності скла з випробувань міцності скла на розтяг при згині

Методика розрахунку фізико-механічних характеристик скла для зразків, які випробовували на трьохточковий згин, відповідала інженерній або класичній теорії балки (теорії балки Ейлера-Бернуллі), що є спрощеною лінійною теорією пружності.

Прогин Δw посередині кожного зразка, що працює на трьохточковий згин, дорівнює [110, 139]:

$$\Delta w = \frac{\Delta F \cdot l_s^3}{48 \cdot I \cdot E}, \quad (2.3)$$

де ΔF – приріст навантаження; l_s – як і у формулі (2.1); $I = \frac{b \cdot h^3}{12}$ – момент інерції для прямокутного поперечного перерізу; E – Модуль Юнга (модуль пружності першого роду або модуль пружності під час розтягу), що

встановлює наступний зв'язок між деформацією розтягу ε та механічним напруженням згину σ :

$$E = \frac{\Delta\sigma_{bB}}{\Delta\varepsilon}, \quad (2.4)$$

де $\Delta\sigma_{bB}$ – приріст напруження – по аналогії з формулою (2.1); $\Delta\varepsilon$ – приріст деформації, яку у випадку трьохточкового згину знаходять згідно з п. 8.6.1 ASTM C1161-13 [23]:

$$\Delta\varepsilon = \frac{6 \cdot h \cdot \Delta w}{l_s^2}, \quad (2.5)$$

де h , l_s – те саме, що і у формулі (2.1); Δw – приріст переміщення (прогин) – див. формулу (2.3).

З рівняння (2.3) отримуємо вираз (2.6) для знаходження модуля пружності E скляного зразка, випробуваного на трьохточковий згин, за виміряним прогином Δw :

$$E = \frac{\Delta F \cdot l_s^3}{48 \cdot I \cdot \Delta w} = \frac{\Delta F \cdot l_s^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta w}. \quad (2.6)$$

2.2.3.3. Використання ймовірнісно-статистичного методу оцінки фізико-механічних характеристик скла на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла

Одним із найбільш широко використовуваних розподілів для аналізу параметрів міцності, таких як напруження, час до руйнування, цикли тощо, являється двопараметричний розподіл Вейбулла. Статистичний підхід Вейбулла використовується для опису варіації механічних властивостей багатьох матеріалів, зокрема кераміки та скла [38-41, 88, 101, 123, 130]. Аналіз даних випробувань за допомогою двопараметричної функції розподілу Вейбулла визначено, загалом, в стандарті EN 61649:2008 [70] та, зокрема, для скла – в EN 12603:2002 [49].

Для двопараметричного розподілу Вейбулла кумулятивна функція розподілу (cumulative distribution function – CDF) $F(t)$ згідно з п. 5.1

EN 61649:2008 [70], яку також називають функцією ненадійності (unreliability function) [106, с. 105] або ймовірності відмови (probability of failure) [125], має вигляд (2.7):

$$CDF = F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}, \quad (2.7)$$

де t – параметр змінної: напруження, час до руйнування, цикли і т. д.; β – параметр форми (shape parameter), який в різних джерелах також називають модулем Вейбулла (Weibull modulus); η – параметр масштабу (scale parameter) або характеристична тривалість роботи (characteristic life).

Характеристична тривалість роботи η – це значення змінної t , за якого ймовірність відмови становить 63,2% (зруйнується 63,2% від загальної кількості зразків), тому це значення ще називають «тривалістю роботи B63,2» («B63,2 Life») [70, с.12, 14].

Параметри розподілу β та η знаходять (оцінюють), використовуючи: ймовірнісний графік (Probability paper); метод найменших квадратів (Least Squares Method – LSM), відомий як метод рангової регресії (Rank Regression Method – RRM) або метод лінійної регресії (Linear-Regression Method – LRM), метод оцінки максимальної правдоподібності (Maximum Likelihood Estimation – MLE), метод моментів (Method of Moments – MOM) [106, с. 23-40, с.112-124].

Для оцінки даних фізико-механічних характеристик скла використали методику, представлену в п. 7.1, п. 7.2, додатках I, E EN 61649:2008 [70], п. 7 EN 12603:2002 [49] та [106, с. 23-40, с.112-124; 115], яка поєднує в собі графічний аналіз на основі ймовірнісного графіка та аналітичний аналіз на основі LSM / RRM / LRM.

Дана методика передбачає наступні кроки:

- 1) впорядкувати (ранжувати) значення даних (змінної) t_i в порядку зростання;
- 2) присвоїти порядкові номери (i – *ий* ранг) для кожного значення даних t_i ;
- 3) використати апроксимацію Бенарда для обчислення середніх рангів $F_i(t)$ для кожного значення даних t_i ;

4) побудувати діаграму Вейбулла з координатами по осі X , що враховують значення даних t_i , та y – координатами, що відповідають середнім рангам $F_i(t)$. Для побудови діаграми Вейбулла, яку ще називають ймовірнісним (вірогіднісним) графіком Вейбулла або, просто, графіком Вейбулла, знаходять подвійний натуральний логарифм по обидві сторони кумулятивної функції розподілу Вейбулла (2.7). В результаті, отримують лінійне рівняння розподілу Вейбулла (2.8):

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) = \beta \cdot \ln(t) - \beta \cdot \ln(\eta), \quad (2.8)$$

що відповідає формі рівняння регресії у вигляді прямої лінії (2.9):

$$y_i = m \cdot x_i + b, \quad (2.9)$$

де $y_i = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F_i(t)}\right)\right)$ – ордината графіка Вейбулла, яка залежить від значення ненадійності або ймовірності руйнування $F_i(t)$, обчисленої як середній ранг для i – *го* значення даних t_i ; $x_i = \ln(t_i)$ – абсциса графіка Вейбулла, яка залежить від i – *го* значення даних t_i ;

5) визначити параметр β . Модуль Вейбулла β рівний нахилу графіка Вейбулла, або так званому коефіцієнту прямолінійної регресії m , і обчислюється як тангенс кута між лінією графіка та віссю X (відношення Y -компоненти лінії до її X -компоненти);

б) визначити параметр η . Для цього, спочатку знаходиться b – значення, за якого графік перетинає вісь Y (тобто значення Y , коли $X = 0$). Характеристичне значення Вейбулла η обчислюється із формули $b = -\beta \cdot \ln(\eta)$ для відомих β та b .

Згідно з п. 7.2.5 EN 61649:2008 [70] для оцінки близькості даних до прямої лінії, що вказує на їх відповідність розподілу Вейбулла, у якості статистичного критерію згоди було прийнято квадрат коефіцієнта кореляції R або коефіцієнт детермінації R^2 .

Згідно з п. 6.2 EN 572-1:2012 [63], п. 5.2 EN 15681-1:2016 [57], п.9.4 EN 1863-1:2011 [62], п. 9.4 EN 12150-1:2015 [47], п. 9.4 EN 13024-1:2011 [53], п. 11.4 EN 14179-1:2016 [55], п. 9.4 EN 14321-1:2005 [56], п. 11.4 EN 15682-1:2013 [58], п. 9.4 EN 15683-1:2013 [59], п. 8 EN 12337-1:2000 [48] характеристичне значення механічної міцності скла на згин $f_{g, k, 5\%}$ визначається для квазістатичного навантаження протягом короткого часу при 5%-ій ймовірності руйнування з нижньою межею довірчого інтервалу на рівні 95%.

Для знаходження характеристичного значення властивостей скла було використано формулу квантильної функції розподілу Вейбулла $\hat{t}_\alpha = F^{-1}(t_\alpha)$ (2.10), яка також називається інверсною CDF або CDF⁻¹ [49, с. 4; 109, с. 476; 126, с. 278; 132, с. 1; 148]:

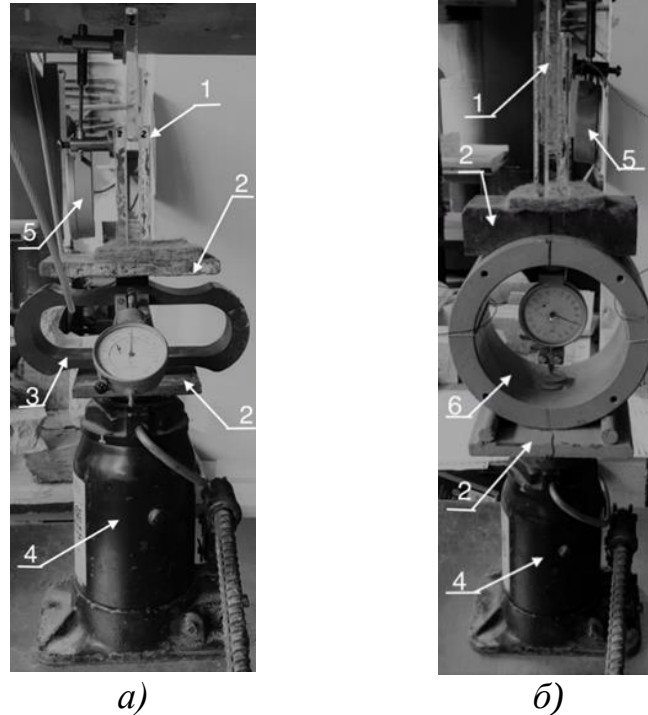
$$\hat{t}_\alpha = F^{-1}(t_\alpha) = CDF^{-1} = \eta [-\ln(1 - \alpha)]^{1/\beta}, \quad (2.10)$$

де α – значення ненадійності або ймовірності руйнування $F(t)$.

Вираз (2.10) є аналогічним до рівнянь, представлених у п. 10.4 EN 61649:2008 [70], що використовуються для визначення бета-біноміальних меж довірчого інтервалу.

2.2.3.4. Дослідження зчеплення шарів скла під дією статичного навантаження

Дослідні зразки 6-ти серій згідно з п. 2.1.3 випробовували на центральний стиск під дією статичного навантаження (рис. 2.17).



1 – дослідний зразок; 2 - металева пластина; 3 - динамометр DOSM-3-50U;
4 - гідравлічний домкрат; 5 - індикатор годинникового типу; 6 - кільцевий динамометр

Рис. 2.17. Випробувальна установка для зразків: а) серій 1 ... 5; б) серії 6

Зовнішнє навантаження F прикладали за допомогою гідравлічного домкрата (1) ступенями по 2,0 кН, а контроль та фіксацію за навантаженням виконували за допомогою динамометра DOSM-3-50U (3) для зразків серій 1 ... 5 та кільцевого динамометра (6) для зразків серії 6. Для вимірювання абсолютних деформацій Δl дослідних зразків були використані індикатори годинникового типу (5) з ціною поділки 0,01 мм для 1 - 3 серій та 0,001 мм – для серій 4 ... 6.

Величину напружень зсуву клейового з'єднання τ розраховували за формулою:

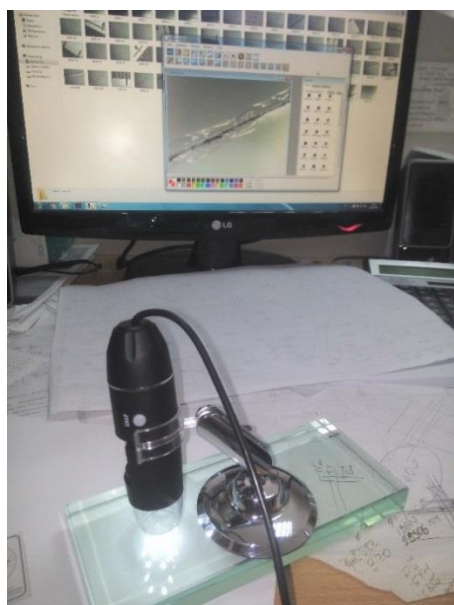
$$\tau = F / (b \cdot l_{\text{ш}}), \quad (2.11)$$

де F – руйнівне навантаження; b – ширина дослідного зразка;
 $l_{\text{ш}}$ – довжина клейового шва.

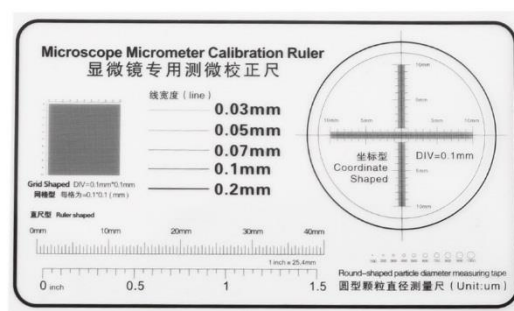
2.2.4. Визначення критерію тріщиностійкості скла та критерію розгалуження тріщин у склі

2.2.4.1. Дослідження мікроструктури поверхні скла за допомогою цифрової оптичної мікроскопії

Вивчення структури поверхні скла виконували за допомогою монокулярного цифрового USB мікроскопа. Загальний вигляд установки зображений на рис. 2.18.



а)



б)

Рис. 2.18. Установка для дослідження поверхні скла

(на прикладі зразка для дослідження міцності скла на згин):

а) цифровий USB мікроскоп Magnifier UltraZoom 1000X (MG576) та ПЗ;

б) об'єкт-мікрометр (калібрувальний слайд)

Застосований портативний цифровий USB мікроскоп (див. рис. 2.18, а) – це оптичний мікроскоп, оснащений вбудованими в об'єктив цифровою CMOS-камерою з розміром матриці 0,3 мегапікселя (інтерполяція до 2 мегапікселів), що дозволяла створювати фото з роздільною здатністю до 2560×1920 пікселів, і яскравими світлодіодами, що забезпечували підсвічування об'єкта дослідження. Необхідна для фокусування відстань між

поверхнею зразка та об'єктивом складала не менше 15 мм. Кратність збільшення отримували вручну за допомогою розташованих на корпусі мікроскопа регулятора оптичного збільшення та, за необхідності, кнопки «Zoom» для додаткового цифрового збільшення зображення. Для передачі даних на ПК, а також живлення мікроскопа використовували USB кабель. Максимальну якість зображення досягали регулюванням різкості зображення на корпусі мікроскопа і яскравості світлодіодного підсвічування на USB-кабелі.

Після з'єднання мікроскопа з ПК та запуску програмного забезпечення «Digital Microscope Measurement v.2.0» на екрані монітора в режимі реального часу фіксували збільшене зображення поверхні скла (див. рис. 2.19, а). Для визначення розмірів розглядуваних фрагментів поверхні скла використовували об'єкт-мікрометр (калібрувальний слайд) з комплектації мікроскопа (див. рис. 2.18, б та рис. 2.19, б).

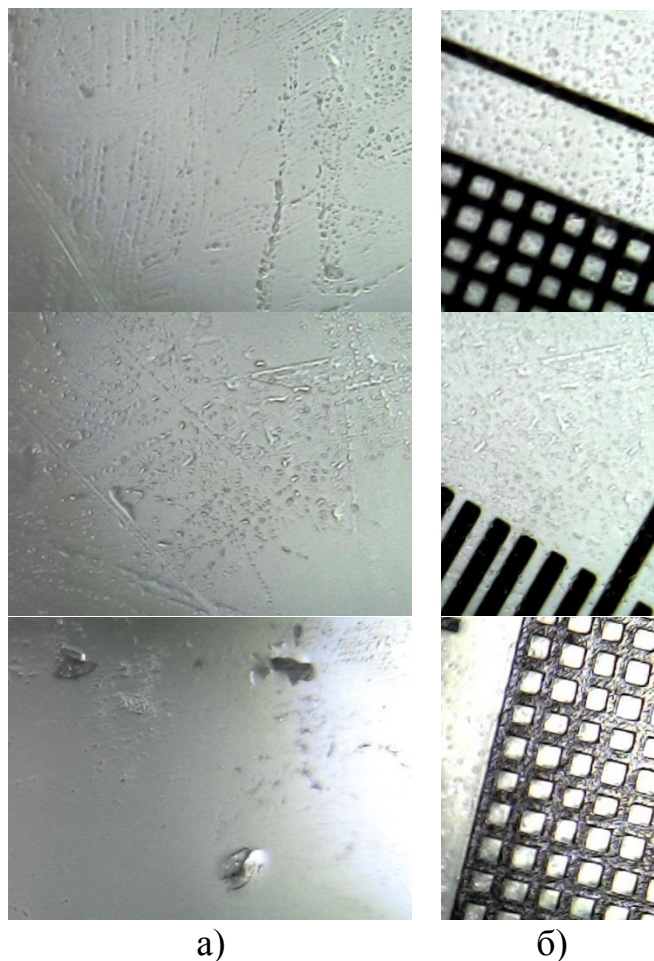


Рис. 2.19. Збільшене зображення поверхні скла:

а) стан поверхні; б) елементи об'єкта-мікрометра (ціна поділки – 0,1 мм)

2.2.4.2. Фрактографічний аналіз дослідних зразків з випробувань міцності скла на розтяг при згині

Після випробувань міцності скла на розтяг при згині (див. п. 2.2.3.1), за допомогою цифрового оптичного мікроскопа (див. п. 2.2.4.1) був проведений фрактографічний аналіз для поверхонь руйнування дослідних зразків (рис. 2.20).

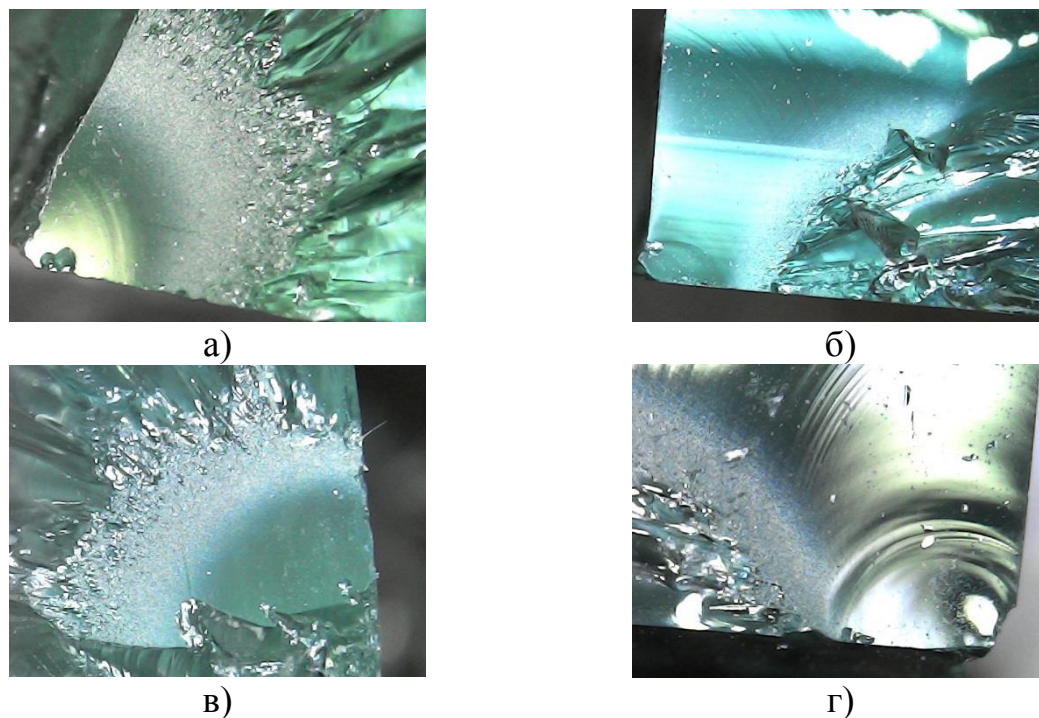


Рис. 2.20. Поверхні руйнування (поверхні зламу) скляних зразків:

а) марки GP-1; б) марки GP-3; в) марки GP-5; г) марки GP-6

Основні позначення (маркування) на поверхні руйнування прийняли відповідно до схеми, представленої на рис. 2.21.

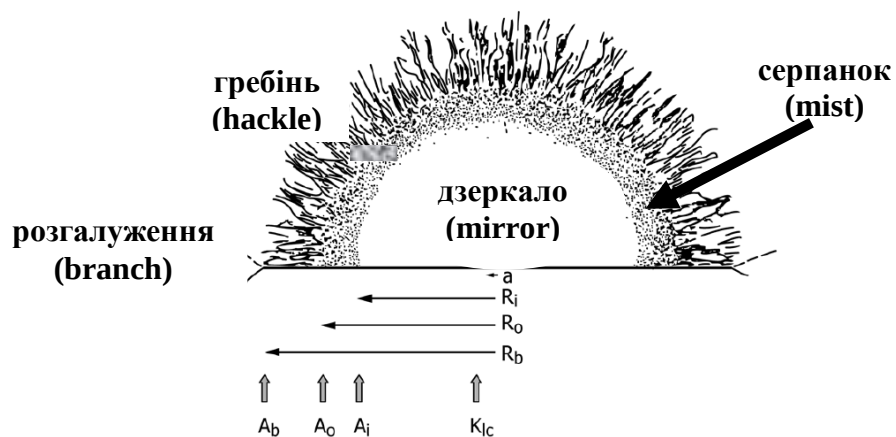


Рис. 2.21. Схема поверхні руйнування елемента скляного або керамічного матеріалу (згідно з ASTM C1678-10 [27])

Дзеркало руйнування (див. рис. 2.21) – відносно гладка ділянка на поверхні руйнування, що оточує початкову точку руйнування (згідно з п. 3.1.1 ASTM C1678-10 [27], п. 3.6 ASTM C1322-15 [25], п. 6.3.1 ASTM C1256-93(2013) [24]). Зазвичай, дзеркало руйнування обмежене серпанком, за виключенням випадків, коли локальне напруження руйнування зменшується вздовж розвитку тріщини (згідно з п. 6.3.1 ASTM C1256-93(2013) [24]). *Серпанок* – маркування на поверхні швидкісного росту тріщини, яке починається із непрозорої розмитої ділянки та зі збільшенням швидкості росту тріщини набуває волокнистої текстури, витягнутої в напрямку розповсюдження тріщини (згідно з п. 3.1.4 ASTM C1678-10 [27], п. 3.10 ASTM C1322-15 [25], п. 6.2.1 ASTM C1256-93(2013) [24]). *Гребінь* – лінії на поверхні тріщини, паралельні до напрямку розповсюдження тріщини (напрямку розтріскування), які, в свою чергу, розділяють паралельні, але некопланарні (ті, що не лежать в одній площині), частини поверхні тріщини (згідно з п. 3.1.3 ASTM C1678-10 [27], п. 3.9 ASTM C1322-15 [25], п. 6.10.2 ASTM C1256-93(2013) [24]).

Первинний дефект a може стабільно зростати аж до нестабільного руйнування при критичній величині a_c (див. рис. 2.21), коли інтенсивність напружень досягає K_{IC} . Радіус зони «дзеркало-серпанок» (mirror-mist radius) R_i , радіус зони «серпанок-гребінь» (mist-hackle radius) R_0 , відстань до розгалуження (branching distance) R_b відповідають дзеркальним константам A_i , A_0 та A_b , відповідно (згідно з прим. 1 до рис.1 в ASTM C1678-10 [27]).

Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} , як прийнятий критерій тріщиностійкості, обчислювали згідно з п. 7.2.4.5 ASTM C1322-15 [25] за формулою (2.12):

$$K_{IC} = \sigma \cdot Y \sqrt{a}, \quad (2.12)$$

де K_{IC} – в'язкість руйнування, $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$; σ – руйнуючі напруження у початковій точці руйнування, МПа; Y – коефіцієнт форми для початкової точки руйнування; a – розмір початкової точки руйнування (глибина

поверхневої тріщини, радіус або половина меншої довжини внутрішньої тріщини).

Згідно з прим. 14 до п. 7.2.4.2 ASTM C1322-15 [25] для визначення відповідного коефіцієнта форми тріщини (Y), на додаток до заміру глибини тріщини (a), також заміряли і ширину тріщини ($2c$) [25, с.14]. Згідно з прим. 16 до п. 7.2.4.5 ASTM C1322-15 [25] коефіцієнт форми Y розраховували, як максимальне із значень Y_c та Y_a , знайдених для обох розмірів тріщини (рис. 2.22).

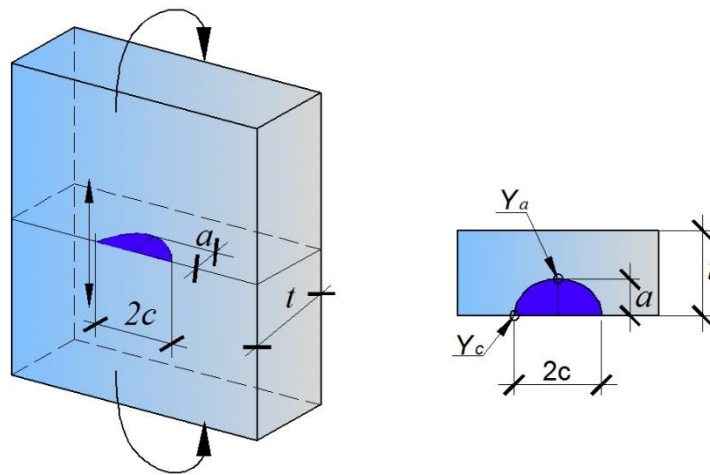


Рис. 2.22. Характерні параметри (розміри) напівеліптичної тріщини на поверхні зразка, що піддають згину [114, с.186; 124, с.7-27]

Коефіцієнт інтенсивності напружень розгалуження тріщини K_B , як прийнятий критерій розгалуження тріщин, знаходили на основі констант A_1 та A_0 , обчислених згідно з п. 7.2.4.7 ASTM C1322-15 [25] за допомогою рівняння (2.13):

$$\sigma = A / \sqrt{R}, \quad (2.13)$$

де σ – руйнуючі напруження у початковій точці руйнування, МПа; R – радіус дзеркала або відстань до розгалуження, м; A – відповідна константа дзеркала чи розгалуження, $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Аналогічний до (2.13) вираз також наведений у п. 5.4 ASTM C1678-10 [27].

2.3. Висновки до розділу 2

1. Запроектовані та виготовлені за технологією триплексації дослідні зразки скляних багатошарових плит з розмірами в плані 500×500 мм 6-ти серій в залежності від кількості, типу та товщини шарів скла, кількості полімерних плівок для міжшарового ламінування, наявності армування.

2. Розроблено методику досліджень скляних багатошарових плит, у відповідності до якої виготовлено випробувальну установку для скляних багатошарових плит, опертих по чотирьох кутах, що працюють на згин під дією короткочасного статичного навантаження, прикладеного через штамп посередині дослідних зразків.

3. Представлено методику вимірювання деформацій скляних багатошарових плит за допомогою методу кореляції цифрових зображень (КЦЗ). Адаптовано метод КЦЗ для вимірювання деформацій скляних багатошарових плит на протязі всього процесу випробування аж до моменту руйнування.

4. Виготовлено дослідні зразки для дослідження фізико-механічних характеристик скла на розтяг при згині, представлено методику таких досліджень.

5. Розроблено методику дослідження критеріїв тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі на основі фрактографічного аналізу скляних зразків, випробуваних на розтяг при згині, за допомогою цифрової оптичної мікроскопії.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Несуча здатність та деформативність скляних багатошарових плит

Відповідно до розробленої програми досліджень було виготовлено 20 плит 6-ти серій експериментальних досліджень із різною кількістю і товщиною шарів скла та різною кількістю полімерних плівок, наявністю армування. Дослідження плит усіх серій виконували згідно з методикою, описаною в п. 2.2.

3.1.1. Плити серії 1

Вибір оптимального перерізу дослідного зразка для дослідження несучої здатності та деформативності скляних багатошарових плит проводили на чотирьох плитах серії 1, марок ПСБ-1.1 ... ПСБ-1.4 (див. табл. 2.1). Вигляд установки під час виконання досліджень, зібраної згідно з методикою досліджень, представлено на рис. 3.1.

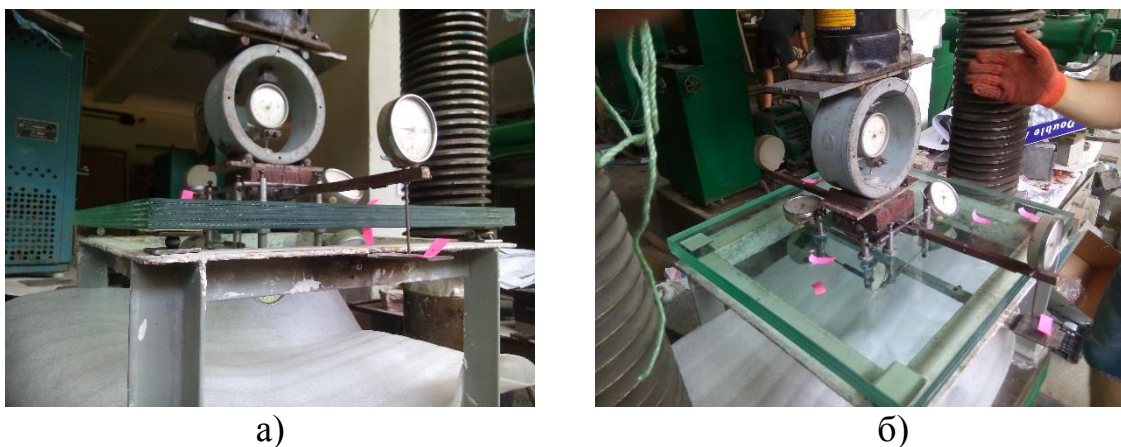


Рис. 3.1. Вигляд дослідної установки під час виконання досліджень плит: а) марки ПСБ-1.1; б) марки ПСБ-1.3

Вигляди плит марок ПСБ-1.1 ... ПСБ-1.4 після випробування показано на рис. 3.2. Для усіх плит початок руйнування відповідав раптовому утворенню тріщин у крайньому нижньому шарі скла. Дослідні зразки зруйнувались з утворенням перехресних тріщин, що рухались у двох

взаємноперпендикулярних напрямках від центру, де розташовувався штамп, до вільних від опирання граней плит (див. рис. 3.2).

**ПСБ-1.2,
(вигляд зверху)**



**ПСБ-1.3,
(вигляд зверху)**



**ПСБ-1.4,
(вигляд зверху)**



Рис. 3.2. Вигляди зруйнованого нижнього шару плит марок ПСБ-1.1 ... ПСБ-1.4 після випробувань

В процесі випробувань на кожному етапі навантаження заміряли прогини. З рис. 3.3 видно, що прогини зростали рівномірно із збільшенням навантаження. При цьому, на графіках простежується пружна робота скла в усіх випробуваних плитах.

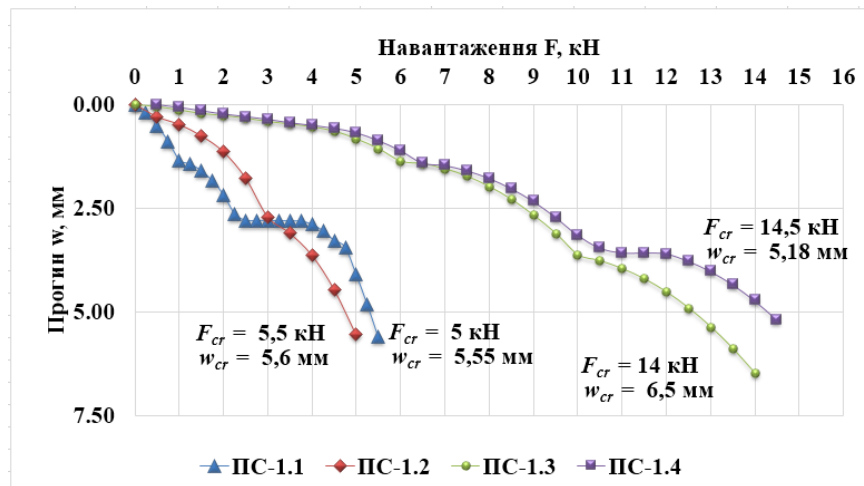


Рис. 3.3. Графіки залежності прогинів від навантаження у дослідних зразках марок ПСБ-1.1 ... ПСБ-1.4

Згідно з показами мікроіндикаторів Ів-1, Ів-2 та Ін-1, Ін-2, враховуючи бази їх заміру, були визначені величини відносних деформацій скла (рис. 3.4).

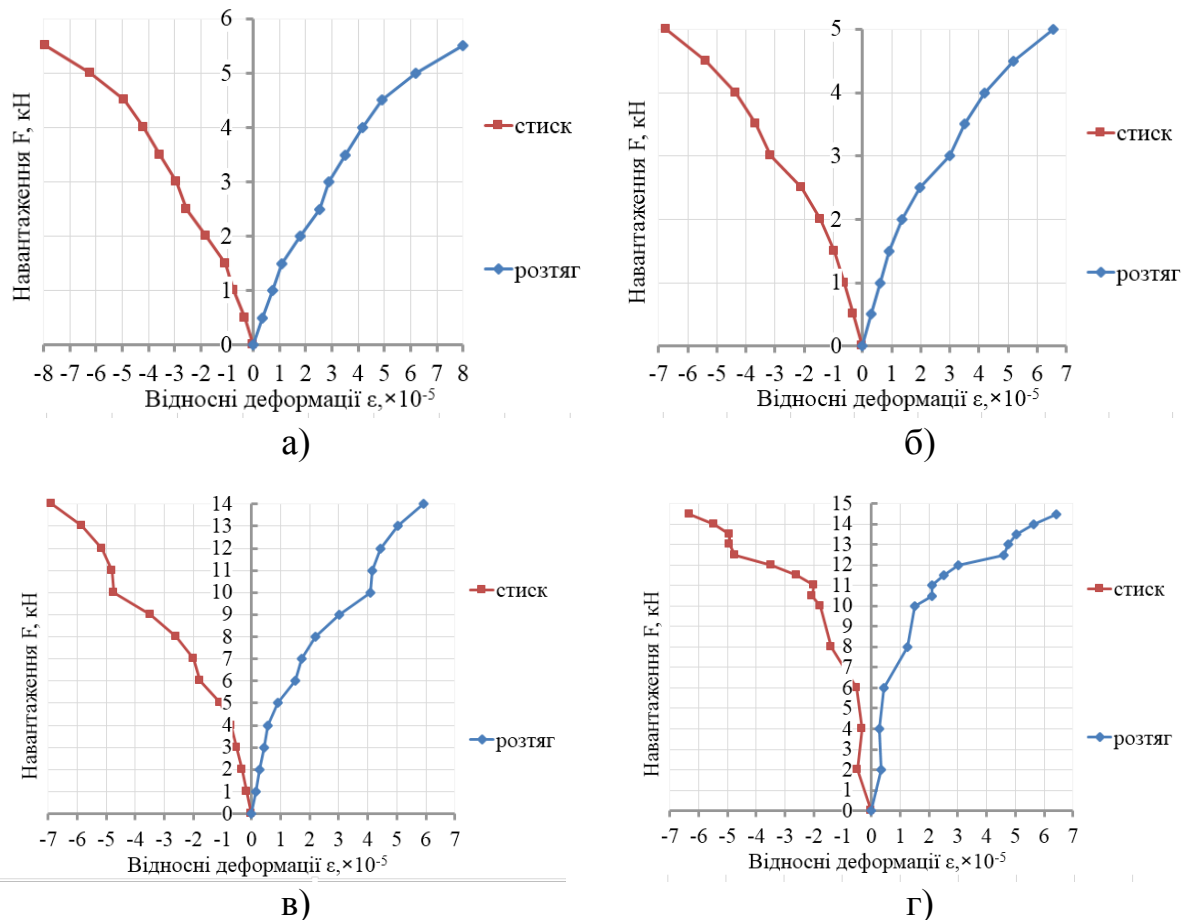


Рис. 3.4. Графіки розподілу відносних деформацій на верхній та нижній гранях дослідних зразків плит: а) марки ПСБ-1.1; б) марки ПСБ-1.2; в) марки ПСБ-1.3; г) марки ПСБ-1.4

У всіх плитах мікроіндикатори у верхній зоні (Ів-1, Ів-2) показали деформації стиску, а у нижній зоні (Ін-1, Ін-2) – деформації розтягу.

Відповідно до рис. 3.3 та рис. 3.4 було встановлено, що у момент руйнування нижнього шару скла плити марок ПСБ-1.3 та ПСБ-1.4 з меншою кількістю шарів скла (3 шт.) більшої товщини (по 10 мм) мали більшу несучу здатність (F_{cr}), ніж плити марок ПСБ-1.1 та ПСБ-1.2 із більшою кількістю шарів скла (6 шт.) меншої товщини (по 4 мм). Використання двошарової плівки у плиті марки ПСБ-1.2 у порівнянні з плитою марки ПСБ-1.1 із одношаровою плівкою не показало істотного впливу на заміряні експериментальні дані. Водночас, широке використання саме двошарової полімерної плівки при виготовленні багатошарових (триплексних плит) дозволяє отримати більш рівномірну конструкцію, а також додатково встановлювати прошарки з інших матеріалів (наприклад, армування – як у плитах серії 3).

Тому, усі наступні дослідні зразки виготовляли аналогічно до плит марок ПСБ-1.3 та ПСБ-1.4, а саме: з трьох шарів скла товщиною 10 мм, ламінованих між собою подвійною полімерною плівкою.

Вигляди плит марок ПСБ-1.5 та ПСБ-1.6 після випробування представлені на рис. 3.5, плит марок ПСБ-1.7 та ПСБ-1.8 – на рис. 3.6.

**ПСБ-1.5, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**

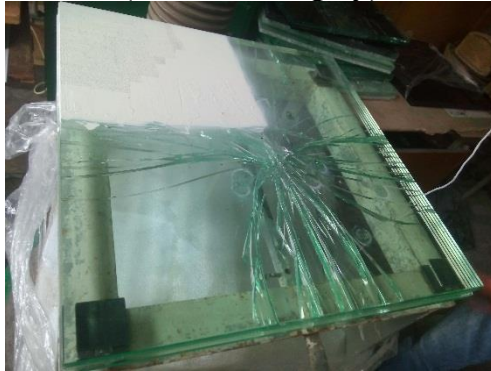


**ПСБ-1.6, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**



Рис. 3.5. Вигляди плит марок ПСБ-1.5, ПСБ-1.6 після випробувань

**ПСБ-1.7, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**



**ПСБ-1.8, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**

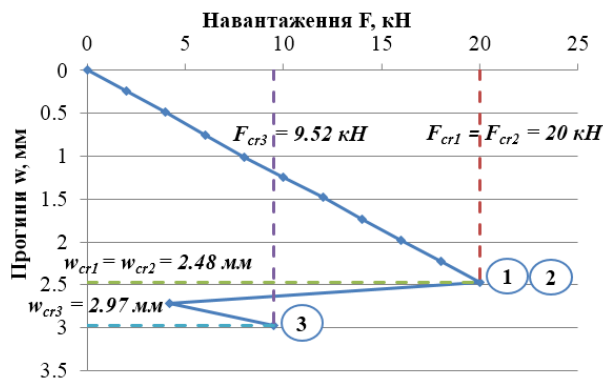


Рис. 3.6. Вигляди плит марок ПСБ-1.7, ПСБ-1.8 після випробувань

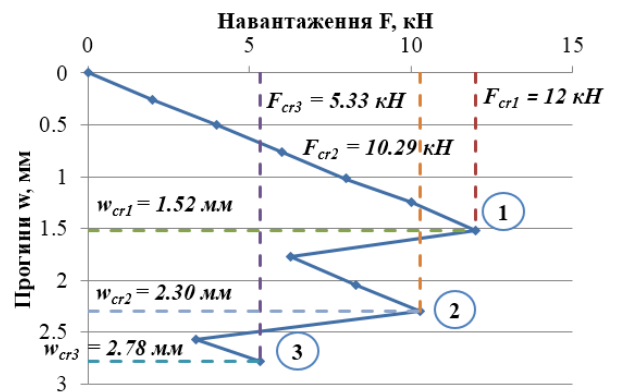
Плити марок ПСБ-1.5 ... ПСБ-1.8, що складались із трьох шарів звичайного скла товщиною 10 мм, склеєних між собою подвійною полімерною плівкою, зруйнувались з утворенням перехресних тріщин у всіх шарах скла (див. рис. 3.5 та рис. 3.6) по аналогії до плит марок ПСБ-1.1 ... ПСБ-1.4. При цьому, у плитах марок ПСБ-1.5 ... ПСБ-1.7 першим руйнувався нижній шар, другим – середній, третім – верхній. В плиті марки ПСБ-1.5 при однаковому рівні навантаження першими зруйнувались нижній та середній шари, в ПСБ-1.7 – середній та верхній, а в плиті марки ПСБ-1.8 руйнування спостерігали одночасно у всіх шарах скла.

Отримані вигляди руйнування усіх шарів скла у плитах марок ПСБ-1.5 ... ПСБ-1.8 відповідали характеру руйнування звичайного скла, що, розбивається на гострі уламки та шматки.

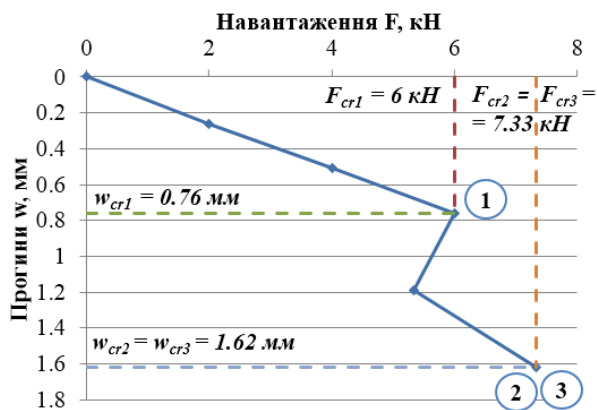
Значення прогинів посередині досліджуваних плит, заміряні на кожному етапі навантаження, графічно представлені на рис. 3.7.



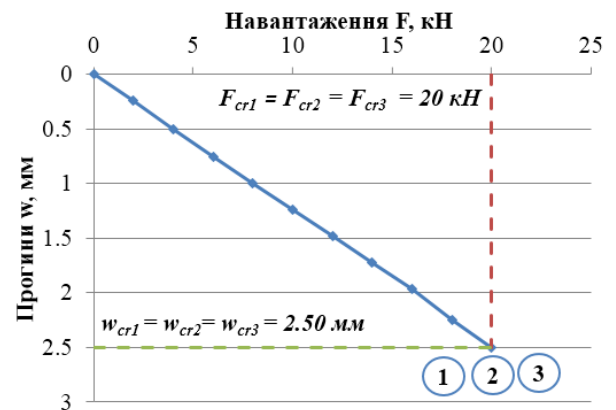
а)



б)



в)



г)

① – нижній шар; ② – середній шар; ③ – верхній шар

Рис. 3.7. Графіки залежності прогинів від навантаження у дослідних зразках плит: а) марки ПСБ-1.5; б) марки ПСБ-1.6; в) марки ПСБ-1.7; г) марки ПСБ-1.8

Як видно з рис. 3.7, в плитах із трьома шарами звичайного скла, за виключенням плити марки ПСБ-1.8, руйнування нижнього (1) та середнього (2) шарів спричинило падіння показів динамометра, далі рівень навантаження продовжував зростати до моменту руйнування наступного (2) та/або останнього (3) шару. При цьому, прогини зростали постійно.

Графіки розподілу деформацій на верхній та нижній гранях дослідних зразків марок ПСБ-1.5 ... ПСБ-1.8 зображені на рис. 3.8. За допомогою показів мікроіндикаторів у верхній зоні (Ів-1, Ів-2) зафіксували деформації стиску, а у нижній зоні (Ін-1, Ін-2) – деформації розтягу.

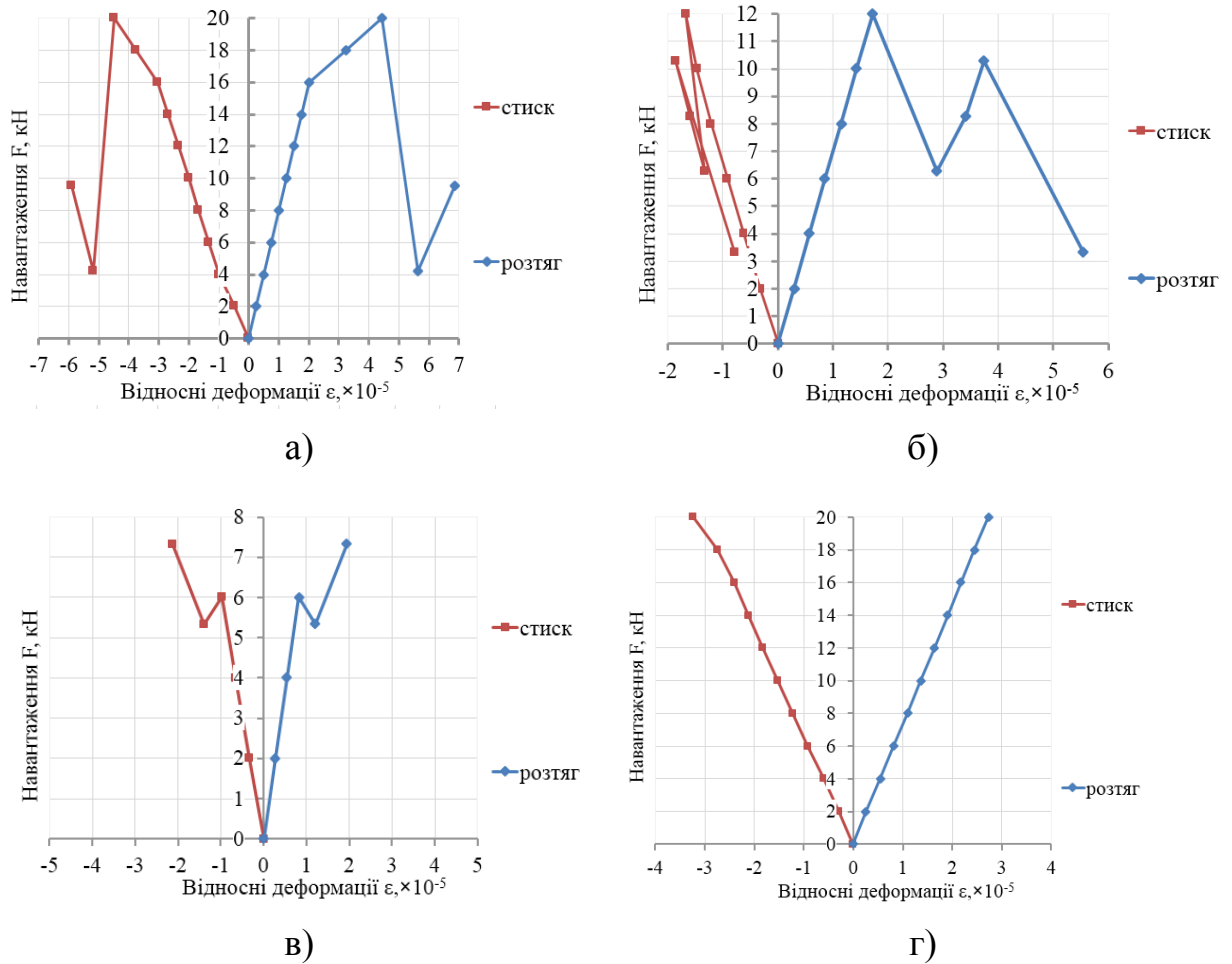


Рис. 3.8. Графіки розподілу відносних деформацій на верхній та нижній гранях дослідних зразків плит: а) марки ПСБ-1.5; б) марки ПСБ-1.6; в) марки ПСБ-1.7; г) марки ПСБ-1.8

За результатами виконаних експериментальних досліджень багатошарових скляних плит, виготовлених із трьох шарів звичайного скла, ламінованих між собою плівкою, можна зробити наступні висновки:

1. Апробовано методику експериментальних досліджень багатошарових скляних плит, вільно опертих по чотирьох кутах, що працювали на згин від зосередженого статичного навантаження, прикладеного через штамп посередині дослідних зразків. Отримано результати експериментальних досліджень багатошарових скляних плит серії 1. Критичні навантаження та відповідні їм критичні прогини в дослідних зразках серії 1 представлені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Результати експериментальних досліджень плит серії 1

№ шару	Вимірювана величина	ПСБ-1.1	ПСБ-1.2	ПСБ-1.3	ПСБ-1.4	Середні (п.3...6)	ПСБ-1.5	ПСБ-1.6	ПСБ-1.7	ПСБ-1.8	Середні (п.8...11)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	F_{cr1}^{exp} , кН	5,00	5,50	14,00	14,50	9,75	20,00	12,00	6,00	20,00	14,50
	W_{cr1}^{exp} , мм	5,55	5,60	6,50	5,18	5,71	2,48	1,52	0,76	2,50	1,82
2	F_{cr2}^{exp} , кН						20,00	10,29	7,33	20,00	14,41
	W_{cr2}^{exp} , мм						2,48	2,30	1,62	2,50	2,23
3	F_{cr3}^{exp} , кН						9,52	5,33	7,33	20,00	10,55
	W_{cr3}^{exp} , мм						2,97	2,78	1,62	2,50	2,47

2. Плита марки ПСБ-1.2 з двошаровою плівкою та плита марки ПСБ-1.1 із одношаровою плівкою показали близькі експериментальні значення несучої здатності та прогинів. Тому, для подальших досліджень рекомендовано використання саме двошарової полімерної плівки, що дозволяє отримати більш рівномірну конструкцію, а також додатково встановлювати прошарки з інших матеріалів (наприклад, армування).

3. Встановлено, що у плитах із трьома шарами звичайного скла (плити марок ПСБ-1.5 ... ПСБ-1.8) руйнування пройшло за схемою «нижній – середній – верхній» шари. Під час руйнування шарів скла утворювались перехресні тріщини, які починали свій ріст від центру плит і рухались вздовж центральних ліній перпендикулярно до вільних від опирання граней. Отримані вигляди руйнування відповідали характеру руйнування звичайного скла, що, розбивається на гострі уламки та шматки.

4. Оскільки руйнування усіх плит 1-ої серії почалося із нижнього шару скла, тому плити марок ПСБ-1.5 ... ПСБ-1.8 із нижнім шаром скла більшої товщини (10 мм) у порівнянні з плитами марок ПСБ-1.1 ... ПСБ-1.4 з нижнім шаром скла меншої товщини (6 мм) продемонстрували, в середньому, у $14,5 \text{ кН} / 9,75 \text{ кН} = 1,49$ разів більшу несучу здатність у момент руйнування першого шару скла (табл. 3.1).

5. Оскільки руйнування плит почалося із нижнього шару скла, припускаємо про можливість збільшення несучої здатності та деформативності таких плит за рахунок використання гартованого скла у нижньому шарі (серія 2) та/або додаткового армування між нижнім та середнім шарами (серія 3).

6. За критерій руйнування скляних багатошарових плит необхідно приймати перше руйнування одного із шарів. Руйнування інших шарів, що відбувалось пізніше, необхідно вважати таким, яке гарантує необхідну роботу плити в цілому. При цьому, якщо в одному з шарів скла було зафіксовано тріщини, необхідно виконати його заміну.

3.1.2. Плити серії 2

З метою отримання багатошарових скляних плит із більшою несучою здатністю та меншою деформативністю у порівнянні із дослідними зразками марок ПСБ-1.3 ... ПСБ-1.8 з трьома шарами звичайного скла, були запроектовані та виготовлені плити марок ПСБ-2.1 ... ПСБ-2.3 з верхнім і середнім шарами звичайного скла та нижнім шаром ґартованого скла для зміцнення плит в розтягнутій зоні.

Вигляди дослідних зразків марок ПСБ-2.1 ... ПСБ-2.3 після руйнування показані на рис. 3.9 та рис.3.10. В плитах серії 2 першим зруйнувався середній шар, другим – верхній, третім – нижній. В плиті марки ПСБ-2.3 при однаковому рівні навантаження зруйнувались верхній та нижній шари скла.

**ПСБ-2.1, зруйнований середній шар
(вигляд зверху)**



**ПСБ-2.1, зруйнований середній шар
(вигляд знизу)**



**ПСБ-2.1, зруйновані всі шари
(вигляд знизу)**



Рис. 3.9. Вигляди плити марки ПСБ-2.1 після випробувань

Характер руйнування плит серії 2 був наступний: в середньому та верхньому шарах звичайного скла утворились перехресні тріщини по аналогії до плит серії 1, натомість нижній шар гартованого скла зруйнувався у вигляді павутини з великою кількістю дрібних частинок (див. рис. 3.9 та рис. 3.10).

**ПСБ-2.2, зруйнований середній шар
(вигляд зверху)**



**ПСБ-2.2, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**



**ПСБ-2.3, зруйнований середній шар
(вигляд зверху)**



**ПСБ-2.3, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**



Рис. 3.10. Вигляди плит марок ПСБ-2.2 і ПСБ-2.3 після випробувань

Руйнування нижнього шару плит серії 2 відповідало характеру руйнування гартованого натрієво-кальцієвого силікатного безпечного скла згідно з розділом 5 EN 12150-1:2015 [47] та характеру розбиття повністю гартованого скла згідно з підрозділом 5.2 ASTM C1048-12e1 [22], оскільки таке скло розбивалося на численні дрібні частинки з тупими гранями. Відповідно, отримані вигляди руйнування (див. рис. 3.9 та рис. 3.10) є схожі на ті, що отримують при випробуванні на фрагментацію гартованого скла згідно з розділом 8 і Додатком С EN 12150-1:2015 [47].

Графіки наростання прогинів посередині плит марок ПСБ-2.1, ПСБ-2.2, ПСБ-2.3 під навантаженням в процесі експериментальних досліджень показані на рис. 3.11.

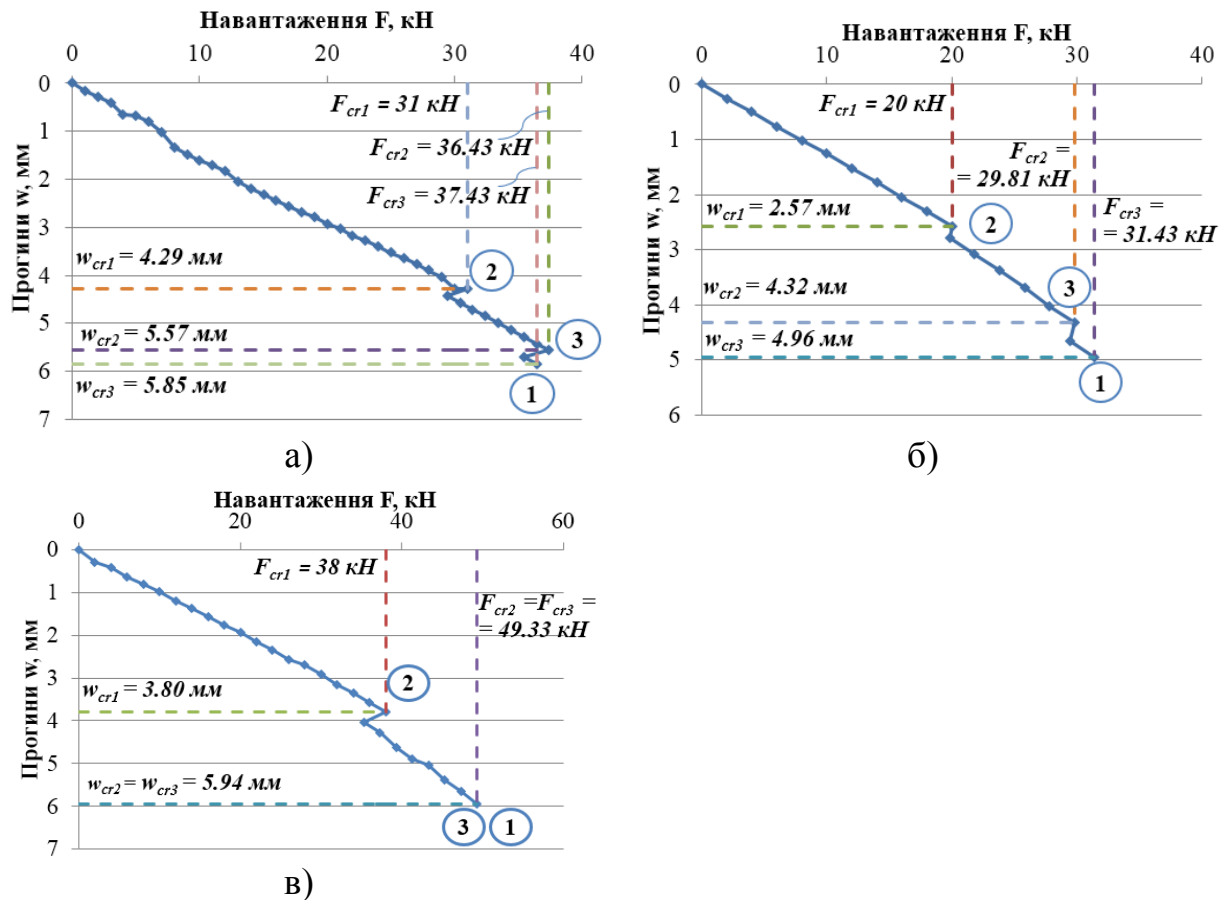
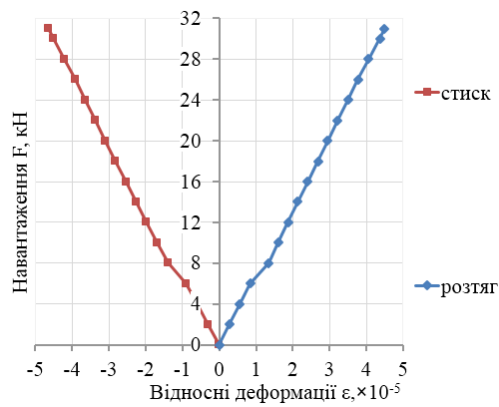


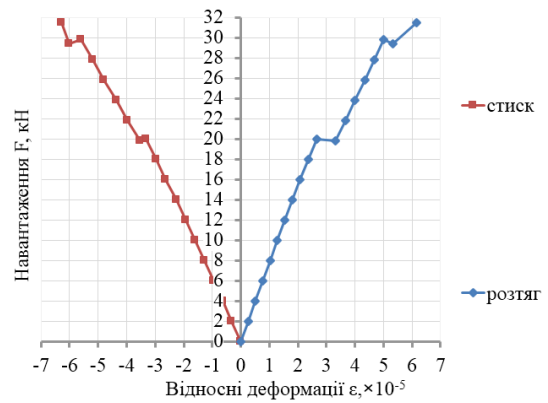
Рис. 3.11. Графіки залежності прогинів від навантаження у дослідних зразках плит: а) марки ПСБ-2.1; б) марки ПСБ-2.2; в) марки ПСБ-2.3

В плитах з верхнім і середнім шарами звичайного скла та нижнім шаром гартованого скла аналогічно до плит марок ПСБ-1.5 ... ПСБ-1.8 руйнування середнього шару скла (2) спричинило незначне падіння навантаження, яке після цього зростало до моменту руйнування верхнього шару (3), і так само – до руйнування нижнього шару (1). Значення, зафіксовані за допомогою прогиномірів, показали постійний ріст прогинів для всіх плит серії 2.

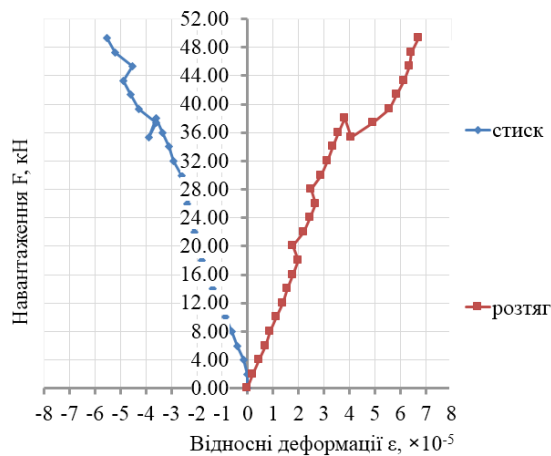
Розподіл деформацій на верхній та нижній гранях плит зображений у вигляді графічних залежностей на рис. 3.12.



а)



б)



в)

Рис. 3.12. Графіки розподілу відносних деформацій на верхній та нижній гранях дослідних зразків плит: а) марки ПСБ-2.1; б) марки ПСБ-2.2; в) марки ПСБ-2.3

За результатами виконаних експериментальних досліджень багатошарових скляних плит, виготовлених із гартованого скла у нижньому шарі і звичайного скла у середньому та верхньому шарах, ламінованих між собою подвійною плівкою, можна зробити наступні висновки:

1. Отримано результати експериментальних досліджень багатошарових скляних плит серії 2. Критичні навантаження та відповідні їм критичні прогини в дослідних зразках серії 2 представлені у табл. 3.2.

Результати експериментальних досліджень плит серії 2

№ шару	Вимірювана величина	ПСБ-2.1	ПСБ-2.2	ПСБ-2.3	Середні
2	F_{cr1}^{exp} , кН	31,00	20,00	38,00	29,67
	W_{cr1}^{exp} , мм	4,29	2,57	3,80	3,55
3	F_{cr2}^{exp} , кН	37,43	29,81	49,33	38,86
	W_{cr2}^{exp} , мм	5,57	4,32	5,94	5,28
1	F_{cr3}^{exp} , кН	36,43	31,43	49,33	39,06
	W_{cr3}^{exp} , мм	5,85	4,96	5,94	5,58

2. Встановлено, що у плитах серії 2 руйнування пройшло за схемою «середній – верхній – нижній» шари. Картина руйнування для шарів звичайного скла показала перехресне розтріскування як і в плитах серії 1, а для гартованого скла – розтріскування у вигляді павутини з великою кількістю дрібних частинок.

3. За прийнятим у п. 3.1.1 критерієм руйнування скляних багатошарових плит, з'ясовано, що використання гартованого скла у нижньому шарі плит серії 2, у порівнянні із плитами серії 1, збільшило їх несучу здатність у 2,05 раза ($29,67 \text{ кН} / 14,50 \text{ кН} \approx 2,05$, де 29,67 кН – див. табл. 3.2, 14,50 кН – див. табл. 3.1) та збільшило прогини у 1,95 раза ($3,55 \text{ мм} / 1,82 \text{ мм} \approx 1,95$, де 1,82 мм – див. табл. 3.1, 3,55 мм – див. табл. 3.2).

4. На основі проведених досліджень були сформовані напрямки можливого збільшення несучої здатності та зменшення деформативності скляних багатошарових плит за рахунок:

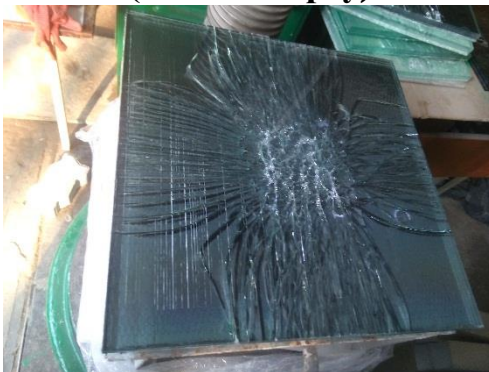
- додаткового армування між нижнім та середнім шарами скла (серія 3);
- застосуванням гартованого скла у верхньому та нижньому шарах (серії 4, 5).

3.1.3. Плити серії 3

З метою збільшення несучої здатності та зменшення деформативності скляних багатошарових плит були запроектовані та виготовлені скляні багатошарові плити серії 3, марок ПСБ-3.1 і ПСБ-3.2, армовані сіткою SikaWrap-230C.

Вигляди плит марок ПСБ-3.1, ПСБ-3.2 після руйнування показані на рис. 3.13. Послідовність руйнування шарів скла у даних плитах була ідентичною до зразків перших двох серій: у плиті марки ПСБ-3.1 з усіма шарами із звичайного скла першим зруйнувався нижній шар, другим – середній, третім – верхній шар; у плиті марки ПСБ-3.2 з гартованим склом внизу спочатку зруйнувався середній шар, далі – верхній, і вже потім – нижній шар.

**ПСБ-3.1, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**



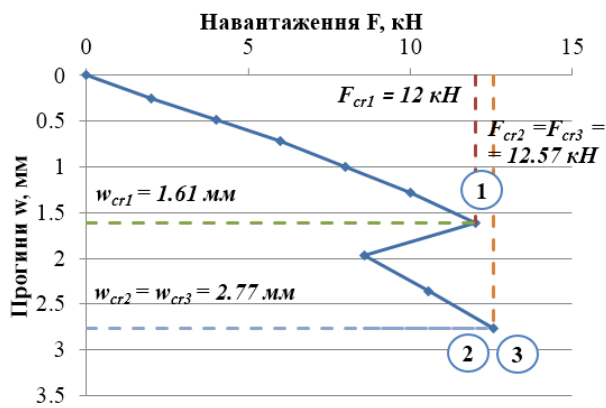
**ПСБ-3.2, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**



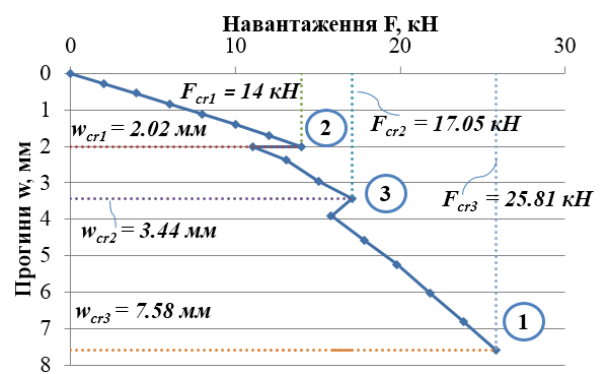
Рис. 3.13. Вигляди плит серії 3 після випробувань

За своїм характером руйнування плит серії 3 не відрізнялися від плит серій 1 та 2 без додаткового армування.

На рис. 3.14 представлені експериментальні залежності між навантаженням та прогинами для плит марок ПСБ-3.1 та ПСБ-3.2.



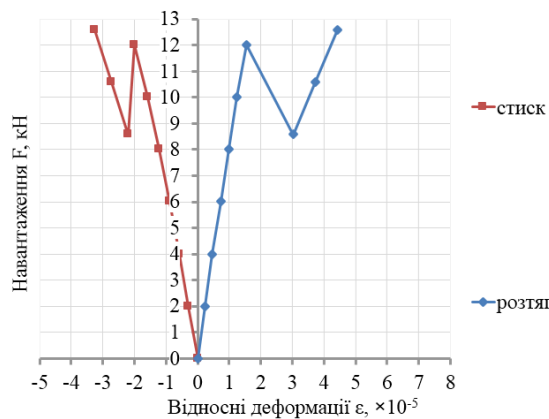
а)



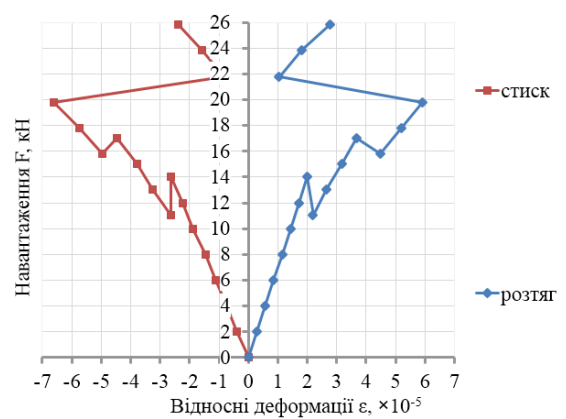
б)

Рис. 3.14. Графіки залежності прогинів від навантаження у дослідних зразках плит: а) марки ПСБ-3.1; б) марки ПСБ-3.2

Графіки розподілу відносних деформацій на верхній та нижній гранях плит марок ПСБ-3.1 і ПСБ-3.2 для різних рівнів навантаження показані на рис. 3.15.



а)



б)

Рис. 3.15. Графіки розподілу відносних деформацій на верхній та нижній гранях дослідних зразків плит: а) марки ПСБ-3.1; б) марки ПСБ-3.2

З наведених графіків можна зробити висновок про подібність роботи під навантаженням дослідних зразків серії 3 до плит серій 1 та 2.

За результатами виконаних експериментальних досліджень багатошарових скляних плит серії 3 можна зробити наступні висновки:

1. Отримано результати експериментальних досліджень багатошарових скляних плит серії 3. Експериментальні значення критичних навантажень та

відповідних їм критичних прогинів в дослідних зразках плит серії 3 представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Результати експериментальних досліджень плит серії 3

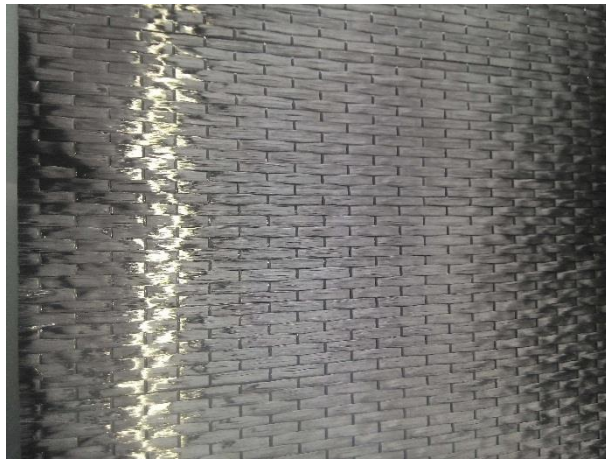
№ шару	Вимірювана величина	ПСБ-3.1	№ шару	Вимірювана величина	ПСБ-3.2
1	F_{cr1}^{exp} , кН	12,00	2	F_{cr1}^{exp} , кН	14,00
	W_{cr1}^{exp} , мм	1,61		W_{cr1}^{exp} , мм	2,02
2	F_{cr2}^{exp} , кН	12,57	3	F_{cr2}^{exp} , кН	17,05
	W_{cr2}^{exp} , мм	2,77		W_{cr2}^{exp} , мм	3,44
3	F_{cr3}^{exp} , кН	12,57	1	F_{cr3}^{exp} , кН	25,81
	W_{cr3}^{exp} , мм	2,77		W_{cr3}^{exp} , мм	7,58

2. Використання сітки SikaWrap-230 С у плитах марок ПСБ-3.1 і ПСБ-3.2 у порівнянні із плитами серій 1 та 2 показало наступні результати:

– несуча здатність плити марки ПСБ-3.1 у порівнянні з плитами серії 1 зменшилась у $14,5 \text{ кН} / 12 \text{ кН} \approx 1,21$ раза, прогин зменшився у $1,82 \text{ мм} / 1,61 \text{ мм} \approx 1,13$ раза (див. табл. 3.1 та табл. 3.3);

– несуча здатність плити марки ПСБ-3.2 у порівнянні з плитами серії 2 зменшилась у $29,67 \text{ кН} / 14 \text{ кН} \approx 2,12$, а прогин зменшився у $3,55 \text{ мм} / 2,02 \text{ мм} \approx 1,76$ раза (див. табл. 3.2 та табл. 3.3).

Зниження несучої здатності можна пояснити неоднорідним з'єднанням між нижнім та середнім шарами через наявність сітки з вуглецевих волокон, а також порушенням цілісності сітки у зв'язку з втратою лінійності поздовжніх волокон під впливом термічної обробки під час триплексації плит (рис. 3.16), в результаті чого сітка погано працювала на розтяг.



а)



б)

Рис. 3.16. Стан армуючої сітки до (а) та після (б) триплексації

3. Армування трьохшарових плит вуглецевою сіткою SikaWrap-230 С між нижнім та середнім шарами показало негативний результат, а саме зменшення несучої здатності, що пов'язано з втратою прямолінійності сітки через термічну обробку в процесі триплексації плит та додатковим збільшенням товщини клейового шва.

3.1.4. Плити серії 4

В скляних багатошарових плитах серії 4 було досліджено вплив розміщення гартованого скла у верхньому шарі у поєднанні з нижнім та середнім шарами звичайного скла.

Вигляди плит марок ПСБ-4.1, ПСБ-4.2 та ПСБ-4.3 після руйнування показані на рис. 3.17. У даних плитах першим зруйнувався нижній шар, другим – середній, третім – верхній шар, причому у плитах марок ПСБ-4.1, ПСБ-4.2 нижній та середній шари зруйнувались одночасно.

**ПСБ-4.1, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**



**ПСБ-4.2, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**



**ПСБ-4.3, зруйнований нижній шар
(вигляд знизу)**



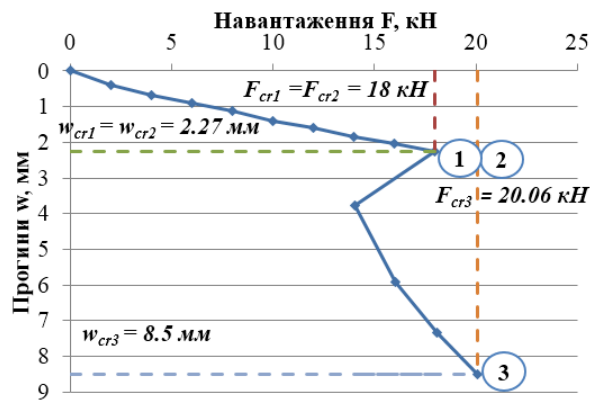
**ПСБ-4.3, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**



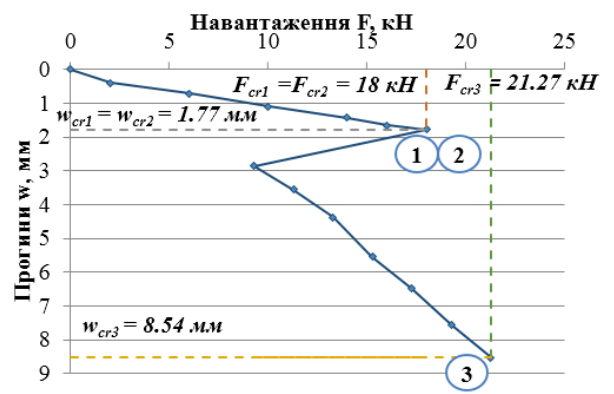
Рис. 3.17. Вигляди плит марок ПСБ-4.1 ... ПСБ-4.3 після випробувань

Руйнування нижнього та середнього шарів плит серії 4 відповідало характеру руйнування звичайного скла, а верхнього шару – характеру руйнування гартованого скла у вигляді павутини. Окрім цього, на верхньому шарі гартованого скла, що зруйнувався з утворенням дрібних частинок, також утворились і вторинні перехресні тріщини по аналогії до картини руйнування звичайного скла.

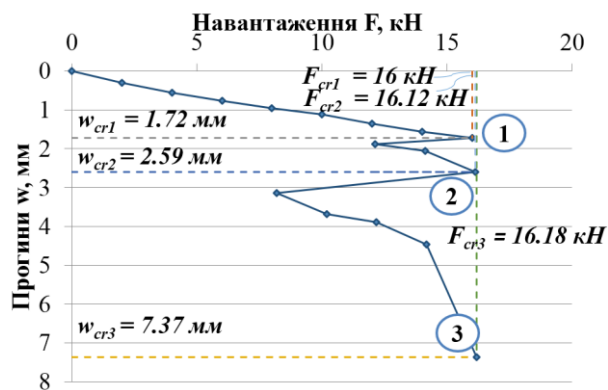
На рис. 3.18 представлені графіки експериментальних залежностей між навантаженням та прогинами для плит марок ПСБ-4.1 ... ПСБ-4.3, отримані на різних етапах навантаження.



а)



б)

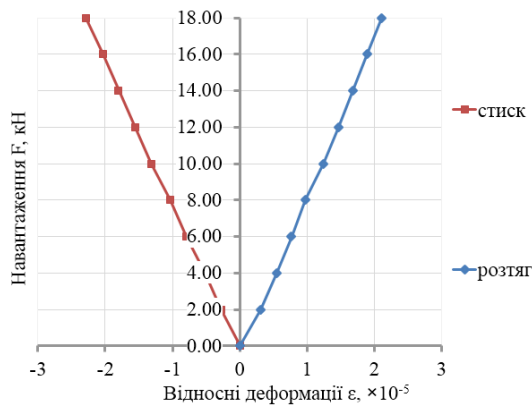


в)

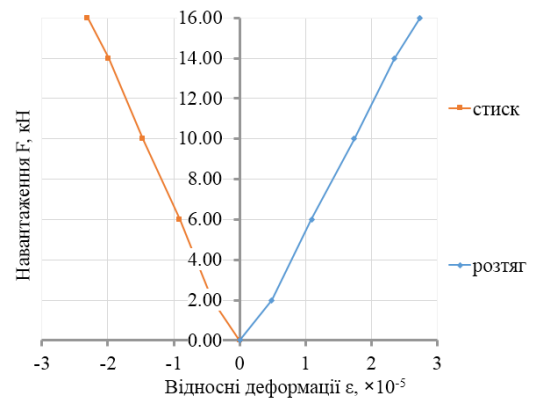
Рис. 3.18. Графіки залежності прогинів від навантаження у дослідних зразках плит: а) марки ПСБ-4.1; б) марки ПСБ-4.2; в) марки ПСБ-4.3

Як видно з графіків, в плитах серії 4 руйнування нижнього (1) та середнього (2) шарів скла спричинило падіння показів динамометра, після чого навантаження продовжило зростати до руйнування верхнього шару (3). Прогини зростали постійно.

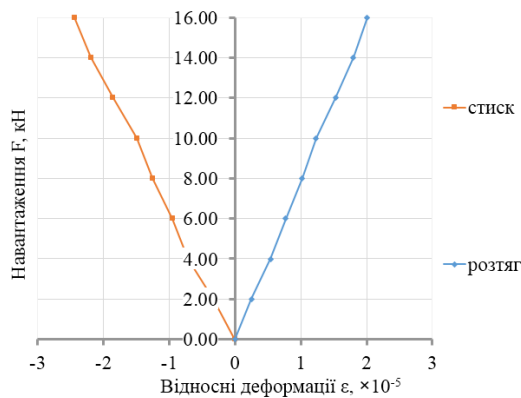
Розподіл деформацій на верхній та нижній гранях плит марок ПСБ-4.1 ... ПСБ-4.3 графічно представлено на рис. 3.19.



а)



б)



в)

Рис. 3.19. Графіки розподілу відносних деформацій на верхній та нижній гранях дослідних зразків плит: а) марки ПСБ-4.1; б) марки ПСБ-4.2; в) марки ПСБ-4.3

Графіки розподілу відносних деформацій для плит 4-ої серії були побудовані для етапів навантаження до руйнування нижнього шару скла, коли припинились заміри деформацій на нижній грані плит у зв'язку з закінченням ходу мікроіндикатора (Ін-1) та відсутністю технічною можливістю його заміни.

За результатами виконаних експериментальних досліджень багатошарових скляних плит серії 4 можна зробити наступні висновки:

1. Отримано результати експериментальних досліджень багатошарових скляних плит серії 4. Експериментальні значення критичних навантажень та відповідних їм критичних прогинів в дослідних зразках плит серії 4 представлені в табл. 3.4.

Результати експериментальних досліджень плит серії 4

№ шару	Вимірювана величина	ПСБ-4.1	ПСБ-4.2	ПСБ-4.3	Середні
1	F_{cr1}^{exp} , кН	18,00	18,00	16,00	17,33
	W_{cr1}^{exp} , мм	2,27	1,77	1,72	1,92
2	F_{cr2}^{exp} , кН	18,00	18,00	16,12	17,37
	W_{cr2}^{exp} , мм	2,27	1,77	2,59	2,21
3	F_{cr3}^{exp} , кН	20,06	21,27	16,18	19,17
	W_{cr3}^{exp} , мм	8,50	8,54	7,37	8,14

2. Встановлено, що схема руйнування у плитах серії 4 – це «нижній – середній – верхній» шари, як і в плитах 1-ої серії. Картина руйнування для шарів звичайного скла показала перехресне розтріскування, а для гартованого скла – розтріскування на численні дрібні частинки у вигляді павутини, причому на верхньому шарі гартованого скла також утворились і вторинні перехресні тріщини, характерні для шарів звичайного скла.

3. Використання гартованого скла у верхньому шарі плит серії 4, у порівнянні з плитами серії 2, у момент руйнування забезпечило у 1,71 раза меншу несучу здатність ($29,67 \text{ кН} / 17,33 \text{ кН} \approx 1,71$, де 29,67 кН – див. табл. 3.2, 17,33 кН – див. табл. 3.4) та у 1,85 раза менший прогин ($3,55 \text{ мм} / 1,92 \text{ мм} \approx 1,85$, де 3,55 мм – див. табл. 3.2, 1,92 мм – див. табл. 3.4). В свою чергу, у порівнянні із серією 1, несуча здатність зросла у 1.2 раза ($17,33 \text{ кН} / 14,50 \text{ кН} \approx 1,20$, де 17,33 кН – див. табл. 3.4, 14,50 кН – див. табл. 3.1), прогин – у 1.05 раза ($1,92 \text{ мм} / 1,82 \text{ мм} \approx 1,05$, де 1,92 мм – див. табл. 3.4, 1,82 мм – див. табл. 3.1).

4. Порівнявши отримані дані для дослідних зразків плит з гартованим склом зверху (серія 4) з плитами із гартованим склом внизу (серія 2), можна зробити висновок про доцільність використання гартованого скла при його розміщенні внизу у зоні розтягу.

3.1.5. Плити серії 5

Були досліджені плити марок ПСБ-5.1 і ПСБ-5.2 з верхнім і нижнім шарами гартованого скла та середнім шаром звичайного скла.

Вигляди плит марок ПСБ-5.1, ПСБ-5.2 після руйнування показані на рис. 3.20. В обох плитах 5 серії експериментальних досліджень спочатку зруйнувався середній шар, далі – нижній, потім – верхній шар.

**ПСБ-5.1, зруйнований середній шар
(вигляд зверху)**



**ПСБ-5.1, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**



**ПСБ-5.2, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**



**ПСБ-5.2, зруйновані всі шари
(вигляд знизу)**



Рис. 3.20. Вигляди плит серії 5 після випробувань

Характер руйнування шарів скла відповідав руйнуванню звичайного і гартованого скла, описаному в попередніх серіях експериментальних досліджень. Як і в плитах 4-ої серії, на верхньому шарі гартованого скла утворились вторинні перехресні тріщини.

На рис. 3.21 представлені діаграми залежності «навантаження – прогин» для плит марок ПСБ-5.1 і ПСБ-5.2.

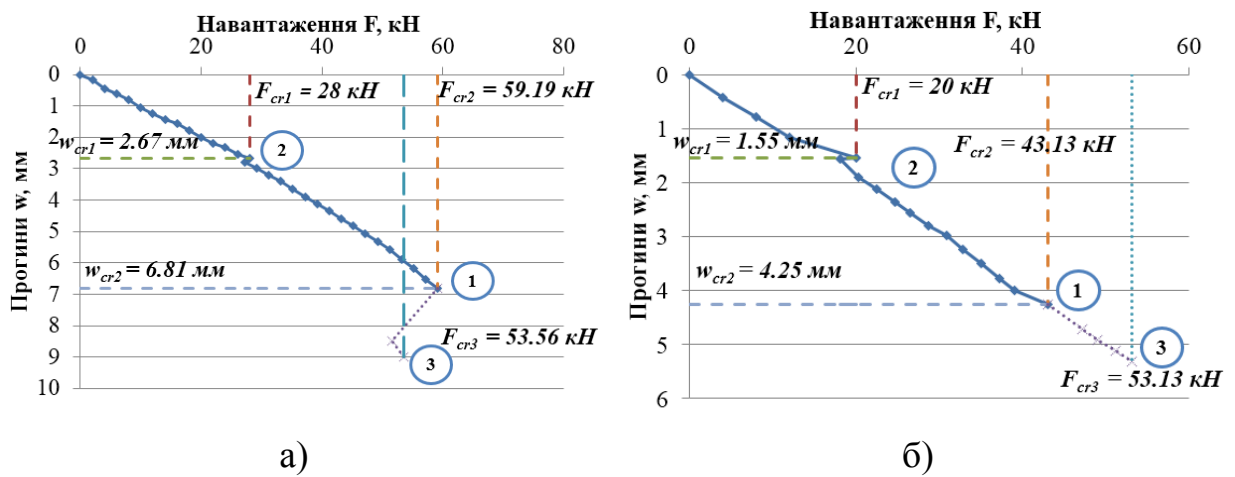


Рис. 3.21. Графіки залежності прогинів від навантаження у дослідних зразках плит: а) марки ПСБ-5.1; б) марки ПСБ-5.2

В плитах з верхнім і нижнім шарами гартованого скла та середнім шаром звичайного скла аналогічно до плит серій 1 ... 4 руйнування середнього (2) шару скла спричинило падіння рівня навантаження, яке після цього зростало до моменту руйнування наступного (1) шару при постійному рості прогину посередині плит. Після руйнування нижнього шару скла (1), коли стало неможливим заміряти величини деформацій та прогинів за допомогою механічних приладів, велись записи навантаження до руйнування верхнього шару плит (3).

Графіки деформацій при різних рівнях навантаження для плит марок ПСБ-5.1 і ПСБ-5.2 показані на рис. 3.22.

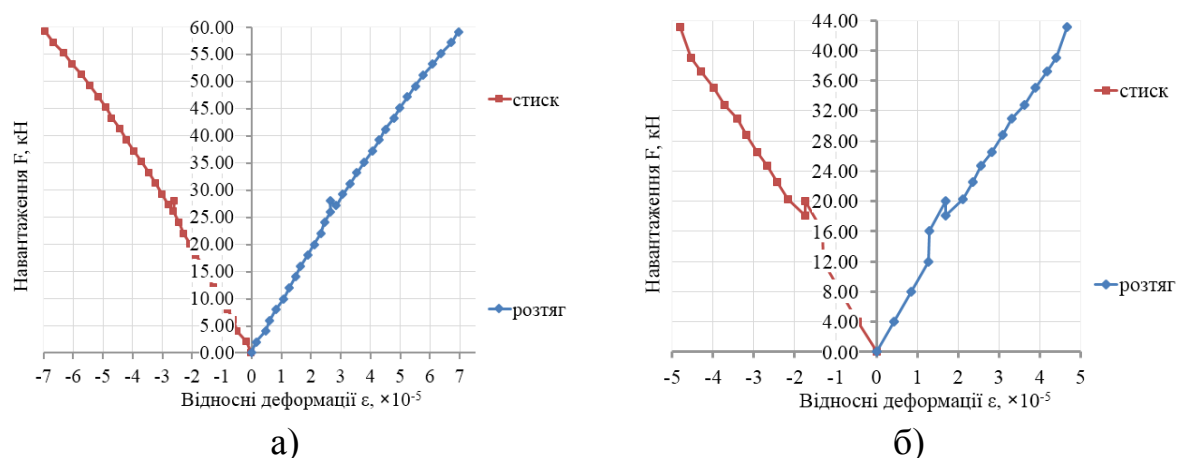


Рис. 3.22. Графіки розподілу відносних деформацій на верхній та нижній гранях дослідних зразків плит: а) марки ПСБ-5.1; б) марки ПСБ-5.2

За результатами виконаних експериментальних досліджень багатошарових скляних плит серії 5 можна зробити наступні висновки:

1. Отримано результати експериментальних досліджень багатошарових скляних плит серії 5. Експериментальні значення критичних навантажень та відповідних їм критичних прогинів в дослідних зразках плит серії 5 представлені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Результати експериментальних досліджень плит серії 5

№ шару	Вимірювана величина	ПСБ-5.1	ПСБ-5.2	Середні
2	F_{cr1}^{exp} , кН	28,00	20,00	24
	W_{cr1}^{exp} , мм	2,67	1,55	2,11
1	F_{cr2}^{exp} , кН	59,19	43,13	51,16
	W_{cr2}^{exp} , мм	6,81	4,25	5,53
3	F_{cr3}^{exp} , кН	53,56	53,13	53,35
	W_{cr3}^{exp} , мм	-	-	-

2. Встановлено, що плити серії 5 зруйнувались за схемою «середній – нижній – верхній» шари. Картина руйнування для звичайного скла у середньому шарі плит показала перехресне розтріскування, для гартованого скла у нижньому та верхньому шарах – розтріскування на численні дрібні частинки у вигляді павутини, причому у верхньому шарі також спостерігали вторинні перехресні тріщини.

3. У порівнянні із плитами 2-ої серії, використання в плитах серії 5 гартованого скла у нижньому і верхньому шарах та звичайного скла у середньому шарі, в момент руйнування забезпечило у 1,23 раза меншу несучу здатність ($29,67 \text{ кН} / 24 \text{ кН} \approx 1,23$, де $29,67 \text{ кН}$ – див. табл. 3.2, 24 кН – див. табл. 3.5) та у 1,68 раза менший прогин ($3,55 \text{ мм} / 2,11 \text{ мм} \approx 1,68$, де $3,55 \text{ мм}$ – див. табл. 3.2, $2,11 \text{ мм}$ – див. табл. 3.5). Натомість, у порівнянні із плитами серії 4 несуча здатність зросла в 1,38 раза ($24 \text{ кН} / 17,33 \text{ кН} \approx 1,38$,

де 24 кН – див. табл. 3.5, 17,33 кН – див. табл. 3.4), а прогин – у 1,1 раза (2,11 мм / 1,92 мм $\approx$ 1,1, де 2,11 мм – див. табл. 3.5, 1,92 мм – див. табл. 3.4).

3.1.6. Плити серії 6

Було досліджено роботу скляних багатошарових плит ПСБ-6.1 і ПСБ-6.2 з верхнім і нижнім шарами гартованого скла та середнім шаром термозміцненого скла.

Вигляди плит серії 6 після руйнування показані на рис. 3.23. В усіх плитах спочатку зруйнувалися середній і нижній шари, потім – верхній, аналогічно як і в плитах серії 5.

**ПСБ-6.1, зруйнований середній шар
(вигляд зверху)**



**ПСБ-6.1, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**



**ПСБ-6.2, зруйновані всі шари
(вигляд знизу)**



**ПСБ-6.2, зруйновані всі шари
(вигляд зверху)**

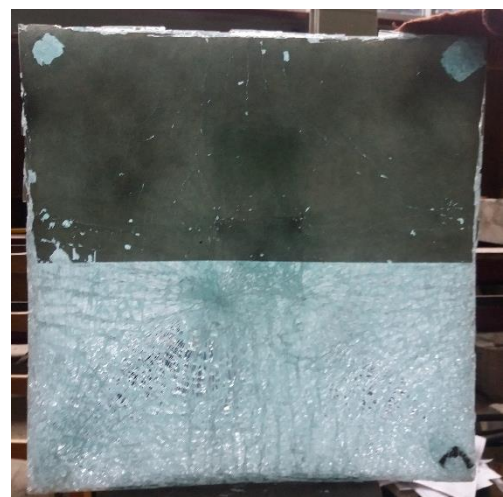


Рис. 3.23. Вигляди плит серії 6 після випробувань

Характер руйнування нижнього та верхнього шарів гартованого скла відповідав руйнуванню гартованого скла, як у серії 2 експериментальних досліджень. Також, як і в плитах попередніх двох серій, на верхньому шарі гартованого скла утворились вторинні перехресні тріщини. Руйнування середнього шару плит відповідало виглядам, які отримують при випробуванні на фрагментацію термічно зміцненого скла згідно з розділом 8 EN 1863-1:2011 [62]. При цьому фрагменти руйнування термозміцненого скла, як зазначено у розділі 5 EN 1863-1:2011 [62] та підрозділі 5.1 ASTM C1048-12e1 [22], подібні за розміром і формою до фрагментів звичайного скла.

Зростання прогину посередині плит 6-ої серії на кожному етапі навантаження, визначене аналогічно як для плит марок ПСБ-4.2, ПСБ-4.3, приведено на рис. 3.24.

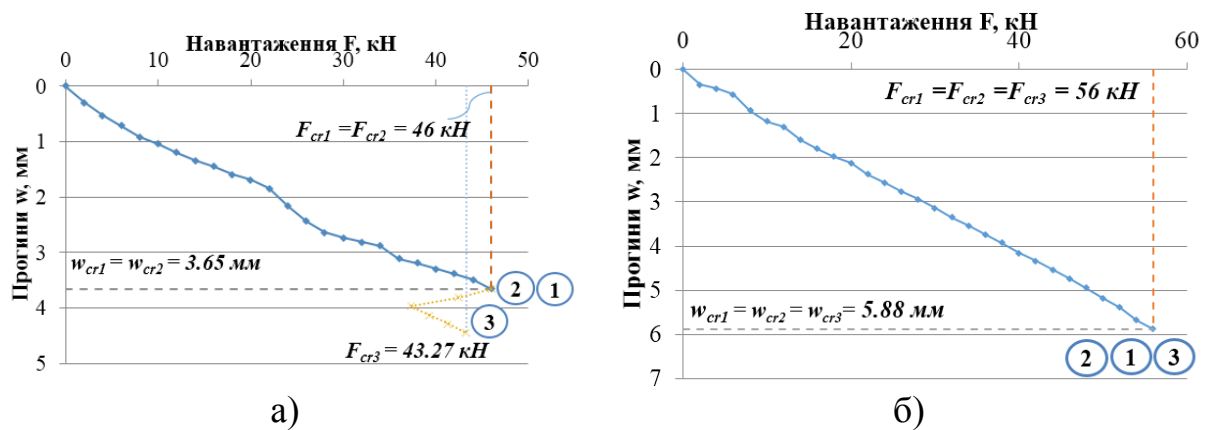


Рис. 3.24. Графіки залежності прогинів від навантаження у дослідних зразках плит: а) марки ПСБ-6.1; б) марки ПСБ-6.2

Вимірювання прогинів плити марки ПСБ-6.1 виконували до досягнення рівня навантаження, при якому зруйнувались середній та нижній шари.

Графіки розподілу відносних деформацій на верхній та нижній гранях дослідних зразків плит 6 серії представлені на рис. 3.25.

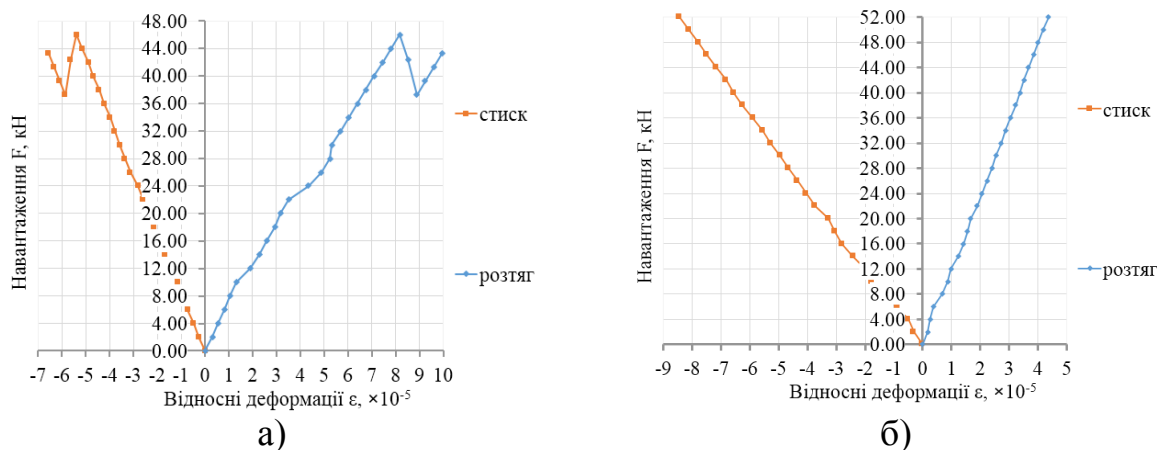


Рис. 3.25. Графіки розподілу відносних деформацій на верхній та нижній гранях дослідних зразків плит: а) марки ПСБ-6.1; б) марки ПСБ-6.2

Деформації у нижній зоні плит заміряли до руйнування середнього і нижнього шарів скла у плиті марки ПСБ-6.1 та до закінчення ходу мікроіндикатора незадовго до руйнування цих двох шарів у плиті марки ПСБ-6.2.

За результатами виконаних експериментальних досліджень багатошарових скляних плит серії 6 можна зробити наступні висновки:

1. Отримано результати експериментальних досліджень багатошарових скляних плит серії 6. Експериментальні значення критичних навантажень та відповідних їм критичних прогинів в дослідних зразках плит серії 6 представлені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Результати експериментальних досліджень плит серії 6

№ шару	Вимірювана величина	ПСБ-6.1	ПСБ-6.2	Середні
2	F_{cr1}^{exp} , кН	46,00	56,00	51,00
	W_{cr1}^{exp} , мм	3,65	5,88	4,77
1	F_{cr2}^{exp} , кН	46,00	56,00	51,00
	W_{cr2}^{exp} , мм	3,65	5,88	4,77
3	F_{cr3}^{exp} , кН	43,27	56,00	49,64
	W_{cr3}^{exp} , мм	-	5,88	5,88

2. Встановлено, що у плитах серії 6, як і в плитах 5-ої серії, руйнування відбулось за схемою «середній – нижній – верхній» шари. Картина руйнування для середнього шару термозміцненого скла була схожою до руйнування звичайного скла, а нижнього та верхнього шарів гартованого скла – як у серіях 4 та 5.

3. Використання гартованого скла у нижньому і верхньому шарах та термозміцненого скла у середньому шарі в плитах серії 6, у порівнянні із плитами серії 2, у момент руйнування забезпечило у 1,72 раза більшу несучу здатність ($51 \text{ кН} / 29,67 \text{ кН} \approx 1,72$, де 51 кН – див. табл. 3.6, 29,67 кН – див. табл. 3.2), та у 1,34 раза більший прогин ($4,77 \text{ мм} / 3,55 \text{ мм} \approx 1,34$, де 4,77 мм – див. табл. 3.6, 3,55 мм – див. табл. 3.2). Відповідно, за параметрами міцності та деформативності досліджувана конструкція плит мала перевагу над зразками, представленими у серіях 1 ... 5.

3.1.7. Узагальнення та статистичний аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень скляних багатошарових плит

Під час виконання експериментальних досліджень скляних багатошарових плит було проаналізовано вплив різних факторів, які безпосередньо або опосередковано впливали на стан об'єктів дослідження, а саме:

1) контрольовані та керовані фактори: характер, тип і величина навантаження, схема опирання дослідних зразків;

2) контрольовані, але некеровані фактори: міцність скла, наявність різних хімічних елементів у склі, характеристики полімерної плівки, вимірювані величини (несуча здатність, прогини, деформації);

3) неконтрольовані фактори: випадкові причини, через які може змінитися міцність шарів скла (нерівномірність деформації скла по площині в процесі його виробництва; постобробка, включаючи різання, механічну обробку і термічне зміцнення, умови зберігання і транспортування скла, що, безпосередньо, впливають на якість застосованого скла через стан його

поверхні) і скляної багатошарової плити (впливи під час процесу триплексації на якість з'єднання шарів скла полімерною плівкою).

Контрольовані та керовані фактори (перша група), які вводилися, змінювалися, управлялися і контролювалися під час експерименту, були експериментальними факторами або незалежними змінними (НЗ). Залежними змінними (ЗП) були вимірювані величини (несуча здатність, прогини, деформації), показники яких розглядали в якості наслідків впливу НЗ.

Аналіз отриманих даних експериментальних досліджень скляних багатошарових плит провели за допомогою статистичних методів обробки даних. Числові значення показників безвідмовної роботи (навантажень та прогинів) скляних багатошарових плит при руйнуванні певного шару скла визначили як усереднені значення в межах кожної серії. У табл. 3.7 зведено результати досліджень для усіх плит.

Табл. 3.7

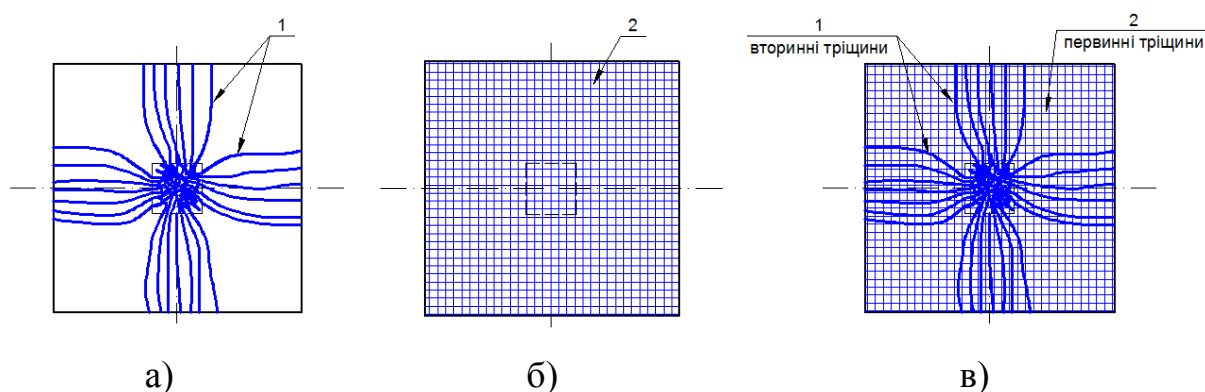
Середні експериментальні значення навантажень та прогинів дослідних зразків скляних багатошарових плит

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	14	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								

За результатами виконаних експериментальних досліджень багатошарових скляних плит серій 1 ... 6 можна зробити наступні висновки:

1. В загальному, характер руйнування шарів скла відповідав трьом видам (рис. 3.26):

- перехресні тріщини з гострими уламками та шматками (див. рис. 3.26, а);
- тріщини у вигляді павутини з численними дрібними частинками з тупими гранями (див. рис. 3.26, б);
- тріщини у вигляді павутини з вторинними перехресними тріщинами (див. рис. 3.26, в).



1 – вигляд «перехресні тріщини»; 2 – вигляд «павутина»

Рис. 3.26. Картина руйнування шарів скла дослідних зразків плит:

а) звичайне та термозміцнене скло; б) гартоване скло (нижній шар);

в) гартоване скло (верхній шар)

2. За послідовністю руйнування шарів скла встановлено наступні схеми:

- «нижній – середній – верхній» шари – в плитах з трьома шарами із звичайного скла (марки ПСБ-1.4 ... ПСБ-1.8 та ПСБ-3.1), 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), в плитах

з верхнім і нижнім шарами гартованого скла та середнім шаром термозміцненого скла (серія 6).

3. Оскільки руйнування усіх плит 1-ої серії почалося із нижнього шару скла, тому плити марок ПСБ-1.5 ... ПСБ-1.8 із 3-ма шарами звичайного скла більшої товщини (10 мм) у порівнянні з плитами марок ПСБ-1.1 ... ПСБ-1.4 із 6-ма шарами звичайного скла меншої товщини (6 мм) продемонстрували, в середньому, у 1,49 раза більшу несучу здатність у момент руйнування першого шару скла.

4. У табл. 3.8 представлено порівняння усереднених результатів експериментальних досліджень плит серій 1 ... 6. За базові прийняті результати випробувань плит серії 1.

Табл. 3.8

Порівняльна таблиця середніх експериментальних значень 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	1×	2,05×	0,83×	0,97×	1,20×	1,66×	3,52×
	W_{cr1}^{exp} , мм	1×	1,95×	0,88×	1,11×	1,05×	1,16×	2,62×
друге	№ шару	②	③	②	③	②	①	①
	F_{cr2}^{exp} , кН	1×	2,70×	0,87×	1,18×	1,21×	3,55×	3,54×
	W_{cr2}^{exp} , мм	1×	2,37×	1,24×	1,54×	0,99×	2,48×	2,14×
третє	№ шару	③	①	③	①	③	③	③
	F_{cr3}^{exp} , кН	1×	3,70×	1,19×	2,45×	1,82×	5,06×	4,71×
	W_{cr3}^{exp} , мм	1×	2,26×	1,12×	3,07×	3,30×	-	2,38×
① - нижній шар, ② - середній шар, ③ - верхній шар								

5. Порівняльний аналіз міцності скляних багатошарових плит серій 1 ... 6 в момент першого руйнування (див. табл. 3.8) дозволив встановити наступну залежність між плитами різних серій в порядку зростання несучої здатності:

$$\text{ПСБ-3.1} < \text{ПСБ-3.2} < \text{Серія 1} < \text{Серія 4} < \text{Серія 5} < \text{Серія 2} < \text{Серія 6}$$

6. Порівняльний аналіз деформативності скляних багатошарових плит серій 1 ... 6 в момент першого руйнування (див. табл. 3.8) дозволив встановити наступну залежність між плитами різних серій в порядку зростання прогинів:

$$\text{ПСБ-3.1} < \text{Серія 1} < \text{Серія 4} < \text{ПСБ-3.2} < \text{Серія 5} < \text{Серія 2} < \text{Серія 6}$$

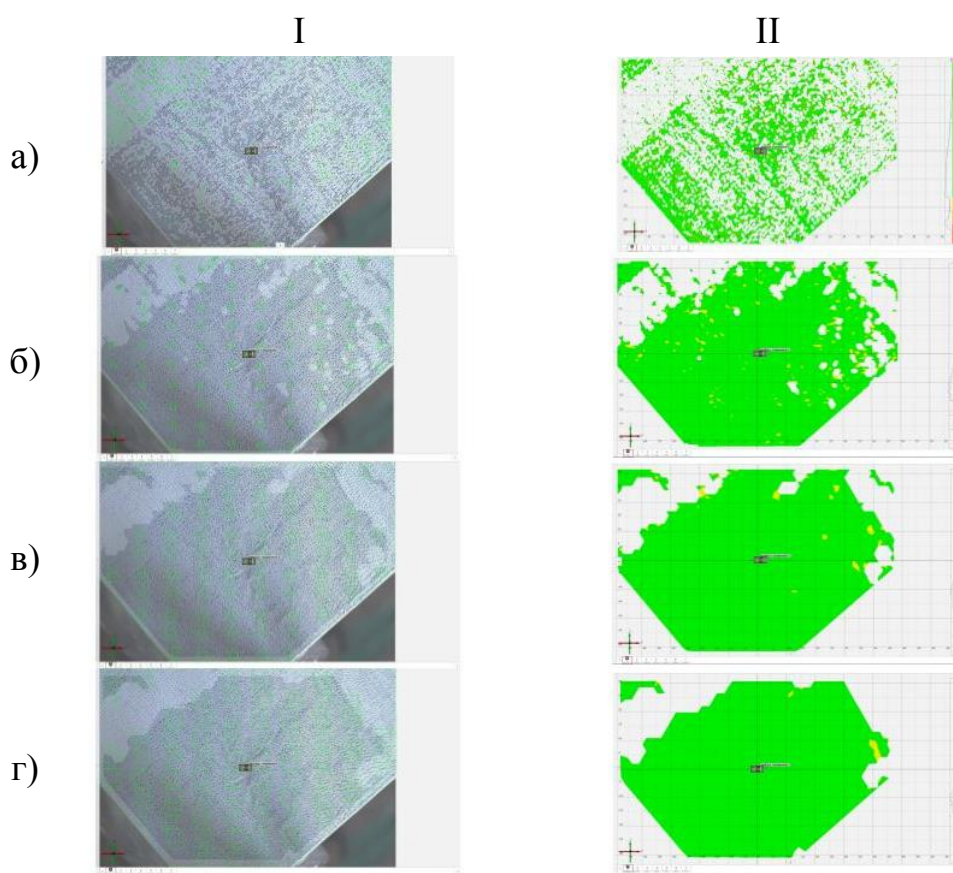
7. У порівнянні з плитами 1-ої серії, використання гартованого скла у нижньому шарі плит серії 2, у верхньому шарі плит серії 4, а також у нижньому та верхньому шарах плит серій 5 та 6 забезпечило більші середні значення несучої здатності у момент руйнування – в 2,05, 1,20, 1,66 та 3,52 рази, відповідно. При цьому, прогини плит серій 2, 4 та 5 становили, відповідно, 1,95, 1,05 та 1,16 від прогину плит серії 1, а у плитах 6-ої серії це відношення склало – 2,62 (див. табл. 3.8).

8. Використання у плитах серії 6 термозміцненого скла посередині між двома шарами гартованого скла, у порівнянні з плитами 5-ої серії, де середній шар був представлений звичайним склом, забезпечило значно більші значення несучої здатності, а саме $51 \text{ кН} / 24 \text{ кН} = 3,52 / 1,66 \approx 2,12$ рази та деформативності в $4,77 \text{ мм} / 2,11 \text{ мм} = 2,62 / 1,16 \approx 2,26$ рази (див. табл. 3.7 та табл. 3.8).

7. 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 склало 0,83, прогину – 0,88 рази (див. табл. 3.8). В свою чергу, в плиті марки ПСБ-3.2 з додатковим армуванням сіткою SikaWrap-230C, у порівнянні з плитами серії 2 без армування, зменшення становило $14 \text{ кН} / 29,67 \text{ кН} = 0,97 / 2,05 \approx 0,47$ рази від несучої здатності та $2,02 \text{ мм} / 3,55 \text{ мм} = 1,11 / 1,95 \approx 0,57$ рази від прогину (див. табл. 3.7 та табл. 3.8). Такі результати можуть бути викликані як розкидом міцності застосованого скла, так і погіршенням з'єднання шарів скла під час триплексації при використанні армуючої сітки SikaWrap-230C.

3.2. Результати використання методу кореляції цифрових зображень для вимірювання деформацій скляних багатошарових плит

Для отримання інформативних зображень поля деформацій, визначеного за допомогою методу КЦЗ, було необхідно провести підбір оптимальних параметрів фасетів a_f та їх кроку k_f . Вплив різних за розміром фасетів на якість результатів КЦЗ оцінювали у програмі GOM Correlate через попередній перегляд аналізованого програмою об'єму поверхні зразка на нульовому етапі перед навантаженням при відповідному значенні a_f (рис. 3.27).



I – компонент поверхні зразка; II – якість моделі

Рис. 3.27. Підбір оптимальних параметрів фасетів a_f та їх кроку k_f при різних вихідних даних (на прикладі плити марки ПСБ-1.7):
а) $a_f=19$; $k_f=16$ (стандартні налаштування в ПК GOM Correlate);
б) $a_f=60$; $k_f=33$; в) $a_f=120$; $k_f=66$; г) $a_f=180$; $k_f=100$

Крок між фасетами k_f був прийнятий згідно з рекомендаціями, поданими в довідці програмного продукту GOM Correlate. Для області перекриття між фасетами a_0 , рівній 20 % від площі фасета a_f , значення кроку між фасетами k_f обчислювали за формулою (3.1):

$$a_0 \approx \sqrt{20\% \cdot a_f^2} \Rightarrow k_f \approx \frac{a_f}{2} + \left(\frac{a_f}{2} - a_0 \right) = a_f - a_0 \quad (3.1)$$

де a_0 – розмір перекриття фасетів, a_f^2 – площа фасета.

Зображення поля деформацій скла у верхній зоні, отримані на останньому етапі навантаження перед руйнуванням, при збільшенні параметрів a_f та k_f показали відповідне збільшення значень і діапазону виміряних деформацій (рис. 3.28).

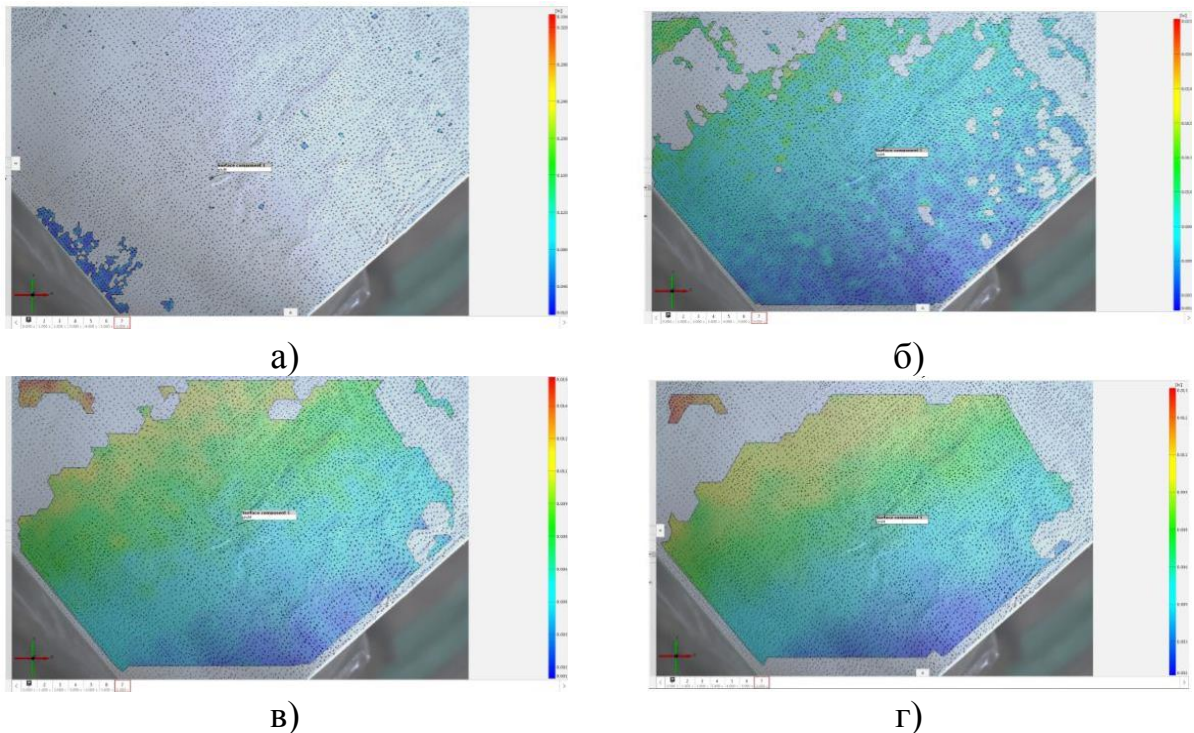


Рис. 3.28. Поля деформацій на останньому етапі навантаження при різних вихідних даних (на прикладі плити марки ПСБ-1.7):

а) $a_f=19$; $k_f=16$; б) $a_f=60$; $k_f=33$; в) $a_f=120$; $k_f=66$; г) $a_f=180$; $k_f=100$

При перевищенні певних значень a_f та k_f якість аналізованого зображення залишалась приблизно на однаковому рівні. Тому, для подальшого аналізу розподілу деформацій на поверхні скляних багатошарових плит в залежності

від способу підготовки поверхні (див. п. 2.2.2) були прийняті наступні параметри:

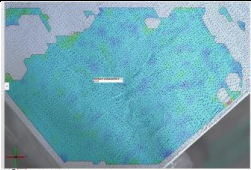
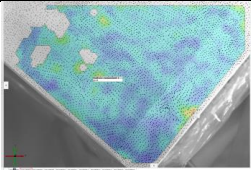
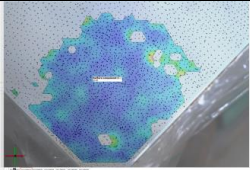
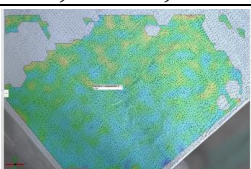
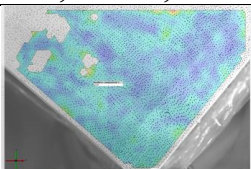
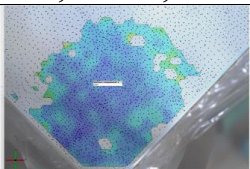
– для дослідних зразків марок ПСБ-1.7, ПСБ-2.2 та ПСБ-3.2 при ручному нанесенні стохастичного рисунку: розмір фасету – $a_f = 120$ пікселів, розмір кроку між ними – $k_f = 66$ пікселів.

– для дослідних зразків марок ПСБ-2.3, ПСБ-4.1 ... ПСБ-4.3, ПСБ-5.2, ПСБ-6.1 та ПСБ-6.2 при нанесенні стохастичного рисунку розпиленням аерозольної фарби: розмір фасету – $a_f = 30$ пікселів, розмір кроку між ними – $k_f = 17$ пікселів.

Для плит марок ПСБ-1.7, ПСБ-2.2 та ПСБ-3.2 виконали порівняльний аналіз зображень полів деформацій, отриманих згідно з методом КЦЗ. Поля відносних деформацій, а також діапазони відносних деформацій ε (%) для даних плит на однакових етапах навантаження представлені у табл.3.9.

Таблиця 3.9

Поля відносних деформацій ε на поверхні плит
марок ПСБ-1.7, ПСБ-2.2 та ПСБ-3.2 згідно з методом КЦЗ
(прийняті параметри: $a_f = 120$, $k_f = 66$)

Навантаження F , кН	Марка плити /діапазон відносних деформацій ε (%)		
	ПСБ-1.7	ПСБ-2.2	ПСБ-3.2
2			
	0,400÷0,500 %	0,200÷0,300 %	0,050÷0,100 %
6			
	0,500÷0,600 %	0,300÷0,400 %	0,100÷0,200 %

Значення ε (%), представлені у табл. 3.9, були прийняті за «Шкалою легенд» («Legend») по контрольних точках, позначених «Мітками відхилення» («Deviation labels») (див. рис.2.10). Аналіз відносних значень заміряних деформацій ε показав, що у порівнянні з іншими плитами на однакових етапах

навантаження найбільші деформації ϵ були зафіксовані у плиті марки ПСБ-1.7, найменші ϵ – у плиті марки ПСБ-3.2. Відповідно, середні значення відносних деформацій ϵ спостерігали у плиті марки ПСБ-2.2.

У плитах марок ПСБ-2.3, ПСБ-4.1 ... ПСБ-4.3, ПСБ-5.2, ПСБ-6.1 та ПСБ-6.2 значення відносних деформацій у контрольних точках біля штампа (рис. 3.29), заміряні «Мітками відхилення», знаходились у широкому діапазоні та істотно відрізнялись від значень, отриманих за допомогою «Екстензометра».

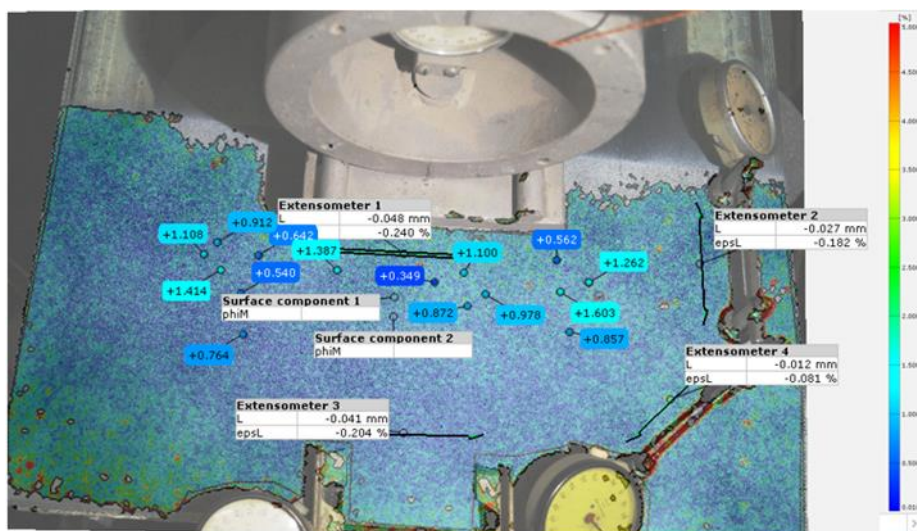


Рис. 3.29. Відносні деформації у центральній зоні плити марки ПСБ-4.1, виміряні в GOM Correlate за допомогою «Міток відхилення» та «Екстензометрів»

Тому, в якості основних величин прийняті відносні деформації, визначені у програмі GOM Correlate за допомогою цифрового «Екстензометра», що використовує принцип замірів, аналогічний як для механічних мікроіндикаторів.

Для плит марок ПСБ-2.3, ПСБ-4.1 ... ПСБ-4.3, ПСБ-5.2, ПСБ-6.1 та ПСБ-6.2 на однакових етапах навантаження було проведено порівняння значень відносних деформацій, отриманих за допомогою цифрових «Екстензометрів» згідно з методом КЦЗ (E , %), та значень відносних деформацій, заміряних за допомогою механічних мікроіндикаторів (I_v , %) (рис.3.30).

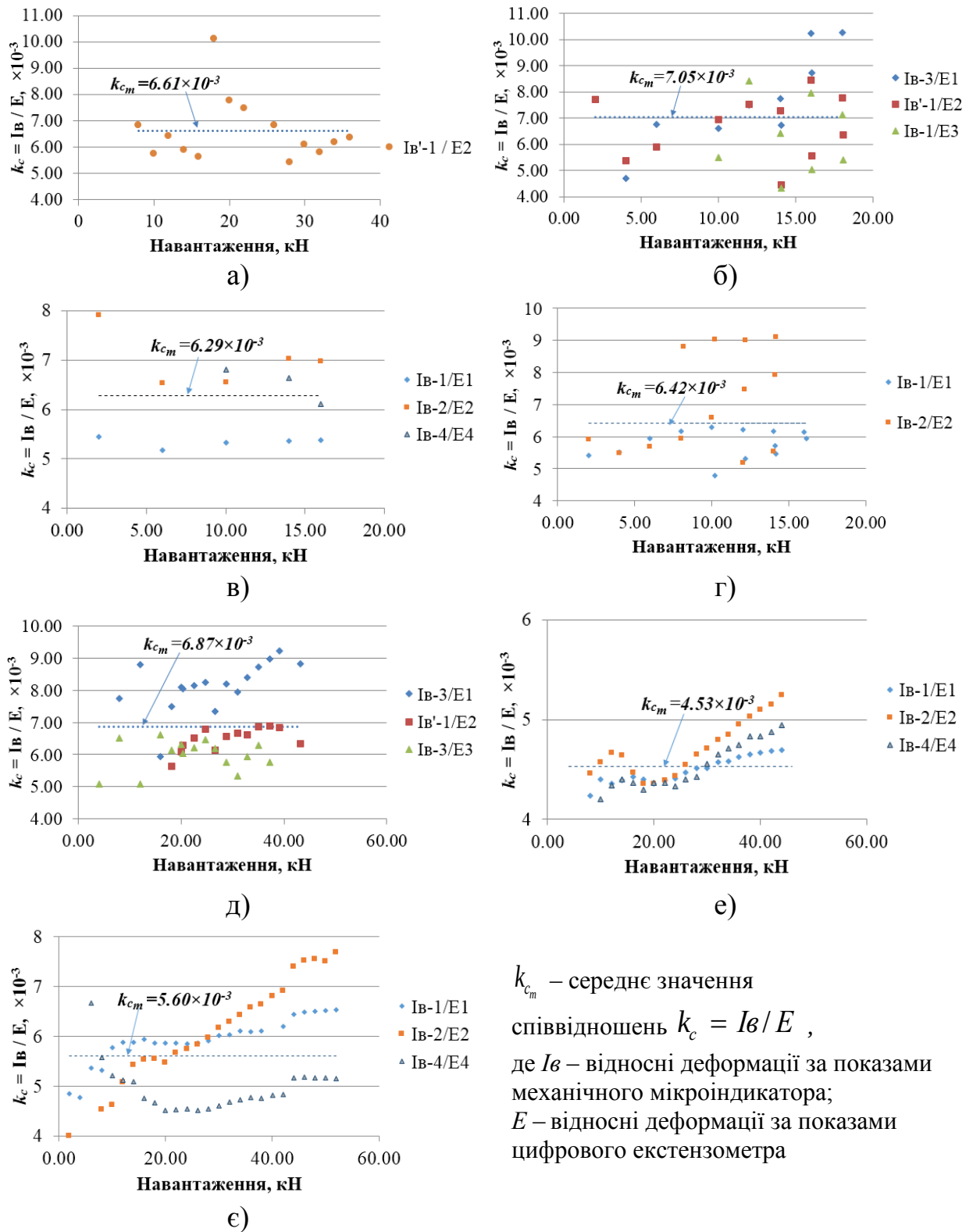


Рис. 3.30. Співвідношення k_c відносних деформацій за показами механічних мікроіндикаторів ($I_v, \%$) до відносних деформацій згідно з методом КЦЗ ($E, \%$) в дослідних зразках плит: а) марки ПСБ-2.3; б) марки ПСБ-4.1; в) марки ПСБ-4.2; г) марки ПСБ-4.3; д) марки ПСБ-5.2; е) марки ПСБ-6.1; є) марки ПСБ-6.2

Усі плити показали приблизно однаковий рівень перевищення відносних деформацій за показами механічних мікроіндикаторів над відносними деформаціями згідно з методом КЦЗ (див. рис.3.30). Тому, при використанні методики дослідження деформацій плоскої поверхні скла, аналогічної як у даній роботі, можна рекомендувати усереднений перевідний коефіцієнт $k_c = 6,20 \times 10^{-3}$, що дозволяє знайти відносні деформації скла на основі значень, отриманих за допомогою методу КЦЗ.

За результатами виконаних досліджень деформацій багат шарових скляних плит за допомогою методу КЦЗ можна зробити наступні висновки:

1. Метод нанесення стохастичної текстури впливає на розмір та розподіл спеклів, що в свою чергу, змінює точність вимірювань деформацій по відношенню до еталонних значень згідно з показами мікроіндикаторів. Використання способу нанесення спекл-аплікації за допомогою розпилення аерозольної фарби, у порівнянні з ручним нанесенням спеклів, дозволило зменшити трудомісткість процесу підготовки поверхні дослідних зразків та отримати аналізовану поверхню більшої площі при менших параметрах методу КЦЗ. Рекомендовані параметри наступні:

– при ручному нанесенні стохастичного рисунку: розмір фасету – $a_f = 120$ пікселів, розмір крок між ними – $k_f = 66$ пікселів.

– при нанесенні стохастичного рисунку розпиленням аерозольної фарби: розмір фасету – $a_f = 30$ пікселів, розмір крок між ними – $k_f = 17$ пікселів.

2. Використання цифрового «Екстензометра» в програмному пакеті GOM Correlate дозволило отримати характер зростання деформацій, аналогічний до показів мікроіндикаторів. При цьому, для визначення «реальних» відносних деформацій поверхні скла на основі значень відносних деформацій, отриманих за допомогою методу КЦЗ, останні, рекомендовано, перемножувати на перевідний коефіцієнт $k_c = 6,20 \times 10^{-3}$.

3.3. Фізико-механічні характеристики матеріалів скляних багатошарових плит

3.3.1. Міцність скла на розтяг при згині

3.3.1.1. Характер руйнування дослідних зразків під час визначення міцності скла на розтяг при згині

У всіх дослідних зразках для визначення міцності скла на розтяг при згині (див. п. 2.1.2) початок руйнування знаходився під прикладеним навантаженням у зоні між опорними роликками, що відповідало п. 8.1 EN 1288-3:2000 [52]. На рис. 3.31 показані типові вигляди руйнування дослідних зразків після випробування на згин.

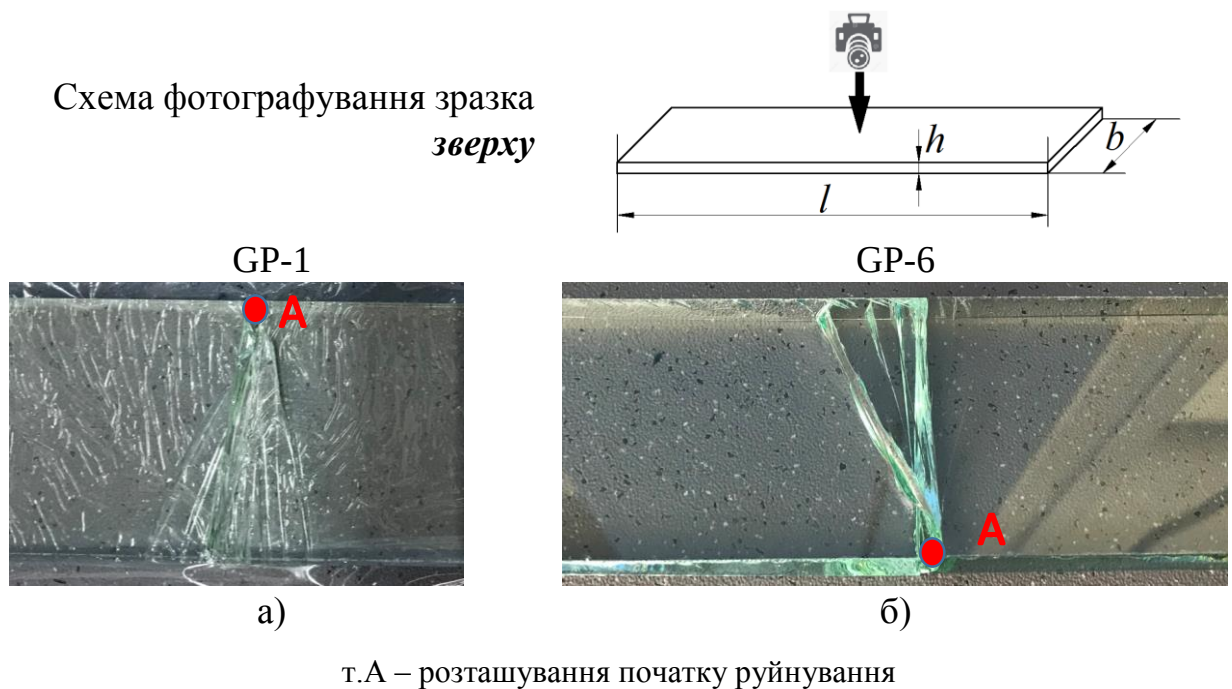


Рис. 3.31. Поверхні дослідних зразків після випробування на згин

Для усіх дослідних зразків початок руйнування знаходився на краю (кромці) (див. рис.3.31).

Схеми руйнування скляних зразків відповідали тим, які зазвичай спостерігалися при згині у керамічних зразках (згідно з

п. X1 ASTM C1161-13 [23]). Всі дослідні зразки зруйнувались на більш ніж дві частини, подібно до середньо- та високоміцної кераміки.

3.3.1.2. Результати експериментальних досліджень

Для визначення характеристичної міцності звичайного скла на розтяг при згині було випробувано 6 скляних зразків (див. п. 2.1.2) за методикою, описаною у п. 2.2.3.

За допомогою програмного забезпечення для автоматичної установки випробування здійснювалося управління виконання випробування відповідно до методики. Також, в режимі реального часу відображались фактичні значення навантаження, а після завершення випробування були побудовані графіки «прогинів від навантаження» (рис. 3.32).

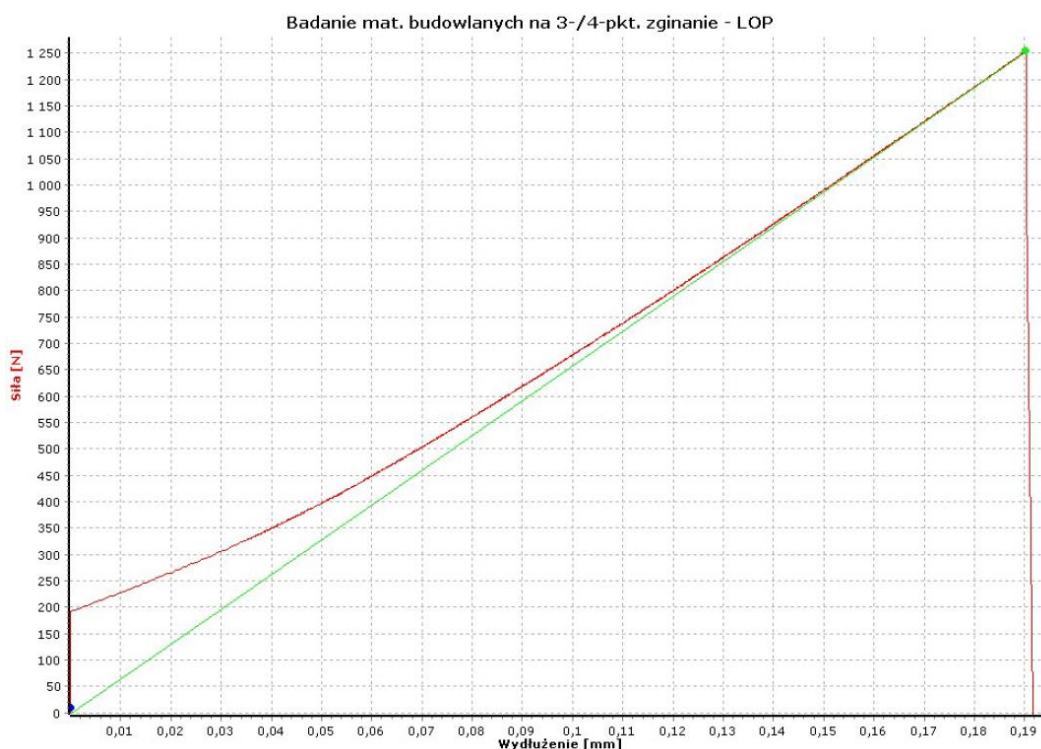


Рис. 3.32. Фрагмент графічного протоколу випробування на згин
(графік «прогини-навантаження»)

Результати експериментальних значень руйнуючих зусиль F_{max} та параметри навантаження t_f і $\Delta F / \Delta t$, а також знайдені за результатами проведених випробувань згідно з рівняннями (2.1) та (2.2) значення міцності звичайного скла на розтяг при згині $\sigma_{bB} = \sigma_{flex} = MOR$ і швидкість збільшення напруження для кожного зразка $R = \Delta\sigma / \Delta t$, наведені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10

Протокол випробувань зразків для дослідження
міцності звичайного скла на розтяг при згині^{1, 2}

Марка зразка	Максимальне навантаження $[F_{max}]$, кН	Міцність на розтяг при згині $[\sigma_{bB}]$, Н/мм ² (МПа)	Час до руйнування $[t_f]$, с	Швидкість прикладення навантаження $[\Delta F / \Delta t]$, Н/с	Швидкість збільшення напруження $[R = \Delta\sigma / \Delta t]$, МПа/с
GP-1	1,4688	54,4	73,44	20	0,74
GP-2	1,3919	52,33	69,595	20	0,75
GP-3	1,2546	46,87	62,73	20	0,75
GP-4	1,2652	47,21	63,26	20	0,75
GP-5	1,4491	54,34	72,455	20	0,75
GP-6	1,3039	48,71	65,195	20	0,75
¹ Згідно з вимогами п. 9 EN 1288-3 [52] та п. 13.2, п. 15 ASTM C158-02 [26] ² Геометричні розміри дослідних зразків – див. табл. 2.2, початкове місце руйнування – на краю (кромці) зразків (див. рис.3.31)					

Міцність скла на розтяг при згині σ_{bB} для зразків марок GP-1 ... GP-6 знаходилась у межах 46,87 – 54,4 МПа. Швидкість прикладення навантаження $\Delta F / \Delta t$ (див. табл. 3.10) становила 20 Н/с. Величина збільшення напруження $R = \Delta\sigma / \Delta t$, що відповідала заданій для кожного зразка швидкості навантаження $\Delta F / \Delta t$, не перевищувала значення 1,05 МПа/с, що відповідало нормативним вимогам, викладеним у п. 2.2.3.1.

3.3.1.3. Характеристична міцність скла на розтяг при згині

Для аналізу результатів міцності скла на розтяг при згині було використано ймовірісно-статистичний метод оцінки даних експериментальних досліджень за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла (див. п. 2.2.3.3).

На рис. 3.33 показано діаграму Вейбулла для діапазону виміряних значень міцності звичайного скла, побудовану з використанням електронних таблиць Microsoft Excel. Тенденція даних міцності зразків описана за допомогою регресії у вигляді прямої лінії, рівняння якої відповідно до формули (2.8) використовується для оцінки параметрів Вейбулла. Відповідно до п. 7.2.4 та п. 7.2.5 EN 61649:2008 [70] візуальна оцінка близькості даних до прямої лінії вказала на їх відповідність розподілу Вейбулла. Також, згідно з п. 7.2.5 [70] для перевірки того, наскільки отримане рівняння підтверджує обрану модель розподілу, як статистичний критерій згоди був використаний квадрат коефіцієнта кореляції R , що називається коефіцієнтом детермінації R^2 . Для отриманих експериментальних значень R^2 становив 0,87, тому, можна стверджувати, що розподіл Вейбулла добре підходить для аналізу міцності звичайного скла.

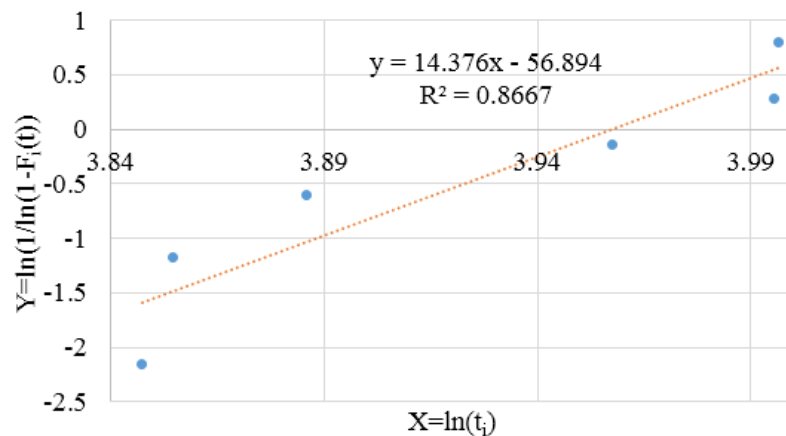


Рис. 3.33. Діаграма Вейбулла для розподілу даних міцності звичайного скла

Визначені з поданого вище графіка параметри розподілу Вейбулла, модуль Вейбулла β і характеристичне значення міцності η для моделі Вейбулла або міцність B63,2 (63,2% руйнувань), представлені у табл. 3.11. Середнє значення міцності $\mu(t)$ або міцність B50 (50% руйнувань) було знайдено за допомогою статистичної функції розподілу Вейбулла відносно параметрів β і η . Значення характеристичної міцності скла на розтяг при згині $f_{gk, 5\%}$ було визначено за допомогою квантильної функції (2.10) відносно параметрів β і η для рівня ненадійності 5% з нижньою межею довірчого інтервалу на рівні 95%.

Таблиця 3.11

Основні статистичні показники міцності звичайного скла на розтяг при згині $[\sigma_{bV}]$ по розподілу Вейбулла

Характеристика міцності	Значення
Модуль Вейбулла $\beta = m$	14,38
Характеристична міцність згідно з Вейбуллом, МПа $\eta = \exp(-b/\beta)$	52,34
Середня міцність, МПа $\mu(t) = M(t) = \bar{t}$	50,47
Коефіцієнт варіації $c_v = \frac{\sigma(t)}{M(t)} = \left(\frac{\Gamma(1+2\beta^{-1})}{(\Gamma(1+\beta^{-1}))^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}}$	0,09
Характеристична міцність, МПа $f_{gk, 5\%} = \eta \left(\ln \left(\frac{1}{1-0.05} \right) \right)^{\frac{1}{\beta}} = \eta (-\ln(1-0.05))^{\frac{1}{\beta}}$	42,57

Характеристична міцність скла на розтяг при згині склала $f_{gk, 5\%} = 42,57$ МПа.

3.3.2. Модуль пружності скла з випробувань міцності скла на розтяг при згині

Знайдені згідно з рівнянням (2.6), значення модуля пружності звичайного скла з випробувань міцності скла на розтяг при згині представлені у табл. 3.12. При цьому, прогин Δw (див. табл. 3.12), як і приріст навантаження ΔF (див. табл. 3.10) – величини, отримані з протоколів випробувань за допомогою автоматичної дослідної установки (див. п. 2.2.3.1 даної роботи).

Таблиця 3.12

Прогини та модуль пружності звичайного скла
за результатами досліджень на розтяг при згині

Марка зразка	Δw , мм	$E = \frac{\Delta F \cdot l_s^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta w}$, МПа
GP-1	0,22	41212,121
GP-2	0,21	41529,419
GP-3	0,19	41115,554
GP-4	0,19	41411,364
GP-5	0,22	41167,614
GP-6	0,20	40594,646

Для аналізу даних модуля пружності звичайного скла було використано ймовірно-статистичний метод оцінки даних експериментальних досліджень за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла. Діаграма Вейбулла для діапазону обчислених значень модуля пружності скла представлена на рис. 3.34.

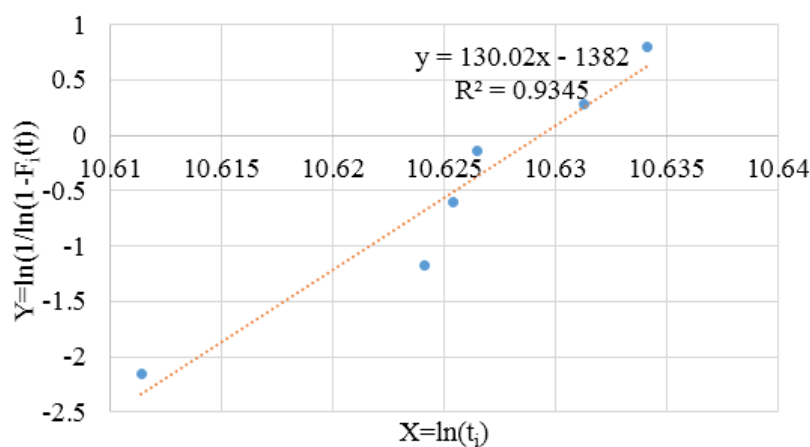


Рис. 3.34. Діаграма Вейбулла для розподілу даних модуля пружності звичайного скла

Коефіцієнт детермінації R^2 склав 0,93, тому, можна стверджувати, що розподіл Вейбулла добре підходить для аналізу модуля пружності звичайного скла.

Визначені з поданого вище графіка параметри розподілу Вейбулла, модуль Вейбулла β і характеристичне значення модуля пружності η для моделі Вейбулла або модуль пружності B63,2 (63,2% руйнувань), представлені у табл. 3.13. Середнє значення модуля пружності $\mu(x)$ або модуль пружності B50 (50% руйнувань) було визначено за допомогою статистичної функції розподілу Вейбулла відносно параметрів β і η . Значення модуля пружності звичайного скла з випробувань на розтяг при згині $E_{gk, 5\%}$ було визначено за допомогою квантильної функції (2.10) відносно параметрів β і η для рівня ненадійності 5% з нижньою межею довірчого інтервалу на рівні 95%, відповідно.

Таблиця 3.13

Основні статистичні показники модуля пружності звичайного скла
згідно з Вейбуллом за даними випробувань на розтяг при згині

Характеристика модуля пружності	Значення
Модуль Вейбулла $\beta = m$	130,02
Характеристичний модуль пружності згідно з Вейбуллом, МПа $\eta = \exp(-b/\beta)$	41329,54
Середній модуль пружності, МПа $\mu(t) = M(t) = \bar{t}$	41148,46
Коефіцієнт варіації $c_v = \frac{\sigma(t)}{M(t)} = \left(\frac{\Gamma(1+2\beta^{-1})}{(\Gamma(1+\beta^{-1}))^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}}$	0,01
Характеристичний модуль пружності, МПа $E_{gk, 5\%} = \eta \left(\ln \left(\frac{1}{1-0.05} \right) \right)^{\frac{1}{\beta}} = \eta (-\ln(1-0.05))^{\frac{1}{\beta}}$	40396,08

Модуль пружності скла становив $E_{gk, 5\%} = 40396,08$ МПа.

3.3.3. Зчеплення шарів скла під дією статичного навантаження

Для дослідження зчеплення шарів скла під дією статичного навантаження були випробувані дослідні зразки (див. п. 2.1.3) за методикою, описаною у п. 2.2.3.4.

За допомогою динамометрів були визначені величини руйнівних навантажень F_{cr} (табл. 3.14). За допомогою індикаторів годинникового типу в ході досліджень були виміряні абсолютні деформації зсуву Δl дослідних зразків. Величину напружень зсуву клейового з'єднання τ розраховували за формулою (2.11).

Таблиця 3.14

Результати випробування дослідних зразків для
дослідження зчеплення шарів скла між собою

Серія	Марка	Руйнівне навантаження F_{cr} , кН	Площа з'єднання $b \times l_u$, мм ²	Середні граничні напруження зсуву τ_u , МПа	Середні граничні деформації зсуву Δl_u , мм	Вид руйнування	
						по клейовому шву	по тілу скла
1	C3-1.1	8,82	5070	1,74	3,39	+	
	C3-1.2	8,77					
2	C3-2.1	13,13		2,67	2,64		
	C3-2.2	13,93					
3	C3-3.1	1,34		0,26	1,11		
	C3-3.2	1,32					
4	C3-4.1	32,3		6,45	0,41		+
	C3-4.2	33,1					
5	C3-5.1	9,57	400	22,53	0,46	+	
	C3-5.2	8,45					
6	C3-6.1	89,09	8400	10,57	0,91		+
	C3-6.2	88,56					

Зразки серій 1 ... 3 та 5 зруйнувались по клейовому шву (див. табл. 3.14), лише у зразках серії 4 з ультрафіолетовим клеєм та серії 6 з полімерною плівкою EVASAFE руйнування відбулося по тілу скла.

За результатами випробувань для всіх серій експериментальних досліджень були побудовані графіки залежностей «напруження зсуву τ – деформації зсуву Δl » (рис. 3.35).

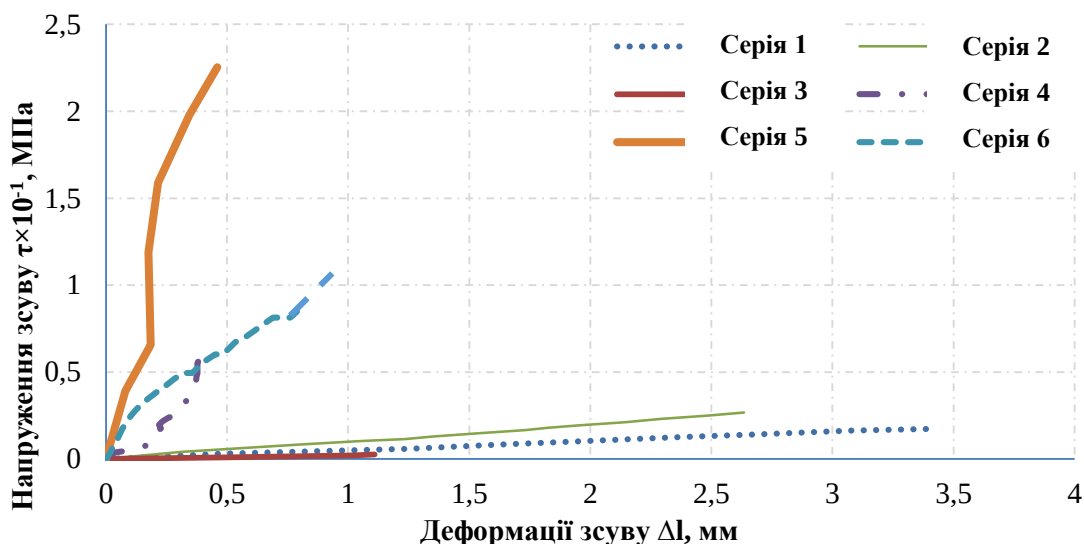


Рис. 3.35. Графіки залежностей «напруження зсуву τ – деформації зсуву Δl »

Як видно з графіку, найвищі напруження зсуву були зафіксовані в зразках серії 5 з ультрафіолетовим клеєм та серії 6 з полімерною плівкою EVASAFE.

При використанні ультрафіолетового клею, який дав найвищі результати несучої здатності клейового шва, є деякі технологічні складнощі. Для роботи необхідне джерело ультрафіолетового випромінювання, причому швидкість затвердіння клею залежить від інтенсивності та довжини ультрафіолетових хвиль. Потрібно уникати попадання повітря на поверхню з'єднання та стежити за тим, щоб шари для склеювання не змістилися, оскільки на поверхні клею можуть утворитися тріщини. Також, недосліджена довговічність таких з'єднань під час експлуатації.

Вартість з'єднання за допомогою ультрафіолетового клею є вищою від традиційних для виробництва багатошарового скла полімерних плівок. Також, при триплексації використовується джерело температури, а автоматична лінія виробництва дозволяє отримувати конструкції великих площ. При цьому, у спеціальній камері «колландері» відбувається механічне видалення повітря,

яке знаходиться між шарами скла і плівкою, що призводить до виникнення адгезії плівки до скла, після чого проводиться остаточне пресування в автоклаві при заданій температурі.

Враховуючи аналіз результатів виконаних досліджень зразків з різними типами з'єднання скла між собою у даній роботі використали з'єднання за допомогою плівки типу EVASAFE.

3.4. Критерії тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі

Для розрахунку критеріїв тріщиностійкості (K_{IC}) та розгалуження тріщини (K_B) були проведені вимірювання параметрів поверхні руйнування дослідних зразків (рис. 3.36).

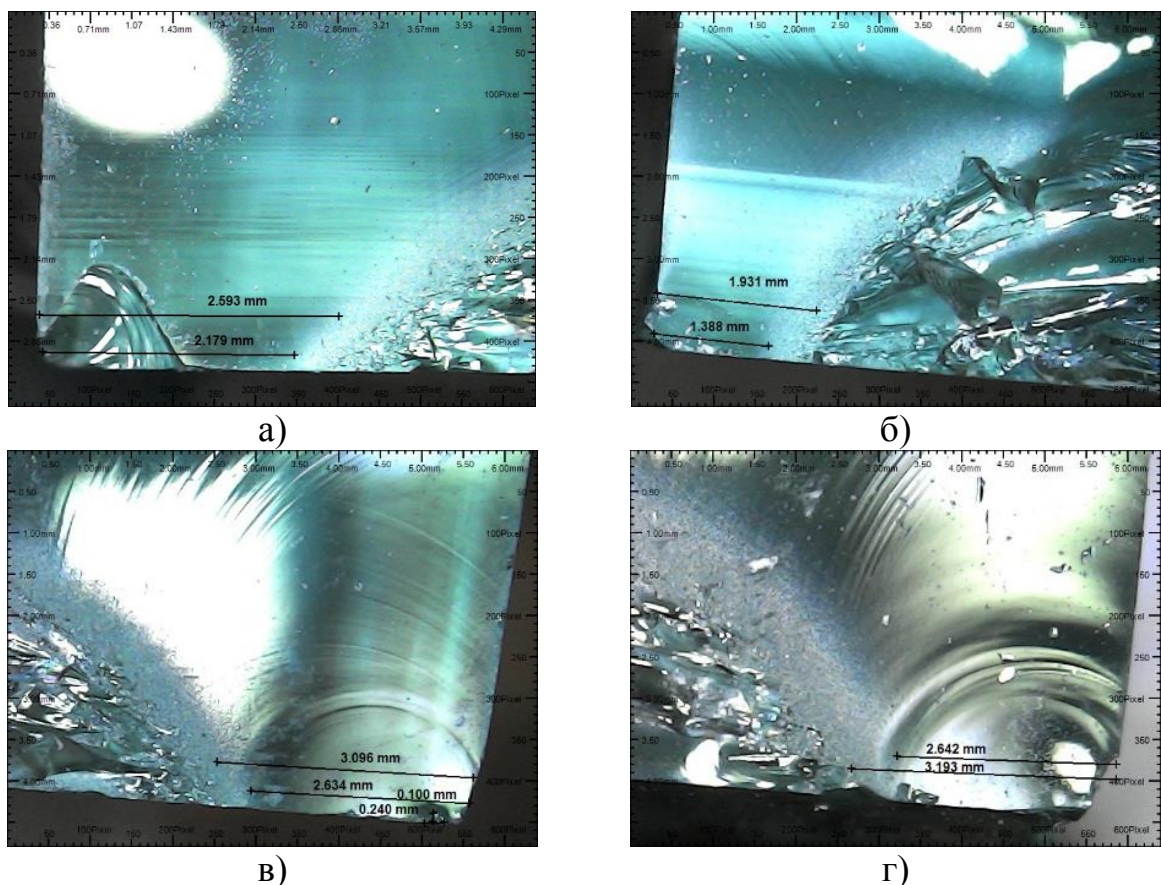


Рис. 3.36. Оброзражені елементи на поверхні руйнування скляних зразків: а) марки GP-2; б) марки GP-3; в) марки GP-4; г) марки GP-6

На основі отриманих з поверхонь руйнування параметрів, а саме значення глибини (a) і довжини ($2c$) поверхневих напівеліптичних тріщин, радіусів зон дзеркала (R_f) та серпанка (R_0) були обчислені наступні параметри: коефіцієнти форми тріщин (Y_a, Y_c) – згідно з Дж.С. Ньюманом і І.С. Раджу [114, с.186-188], критичні коефіцієнти інтенсивності напружень (K_{IC}) – за формулою (2.12), дзеркальні константи (A_f, A_0) – за виразом (2.13).

Експериментально встановлені значення K_{IC} , A_f, A_0 для скляних зразків різних марок проаналізували за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла (табл. 3.15). Характеристичні значення констант скла були визначені за допомогою квантильної функції розподілу Вейбулла (2.10) відносно параметрів β і η для рівня ненадійності 5% з нижньою межею довірчого інтервалу на рівні 95%.

Таблиця 3.15.

Статистично-ймовірнісний аналіз результатів експериментальних досліджень за допомогою розподілу Вейбулла

$\beta_{K_{IC}}$	$\eta_{K_{IC}}$	$K_{IC,5\%}$	β_A	η_A	$A_{f,5\%}$	β_{A_0}	η_{A_0}	$A_{0,5\%}$
—	$МПа\sqrt{м}$		—	$МПа\sqrt{м}$		—	$МПа\sqrt{м}$	
1,71	3,56	0,63	3,86	3,78	1,75	4,13	4,23	2,06

Таким чином, експериментально встановлений критичний коефіцієнт інтенсивності напружень скла становив $K_{IC,5\%} = 0,63 МПа\sqrt{м}$. Коефіцієнт інтенсивності напружень розгалуження тріщини $K_{B,5\%} = 1,905 МПа\sqrt{м}$ був прийнятий як середнє із значень $A_{f,5\%}$ та $A_{0,5\%}$. Дані величини запропоновано використовувати в розрахунках на міцність скляних багатошарових плит.

3.5. Висновки до розділу 3

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

2. Проведено вимірювання деформацій скляних багатошарових плит за допомогою методу кореляції цифрових зображень (КЦЗ). Рекомендовано наступні параметри методу КЦЗ в залежності від виду підготовки поверхні зразка, а саме: розмір фасету $a_f = 120$ пікселів, розмір кроку між ними $k_f = 66$ пікселів – при ручному нанесенні стохастичного рисунку; розмір фасету – $a_f = 30$ пікселів, розмір кроку між ними $k_f = 17$ пікселів – при нанесенні стохастичного рисунку розпиленням аерозольної фарби. При використанні програмного пакету GOM Correlate запропоновано використання цифрового «Екстензометра», який дозволив отримати характер зростання деформацій, аналогічний до показів мікроіндикаторів. Для визначення відносних деформацій поверхні скла на основі значень відносних деформацій, отриманих за допомогою методу КЦЗ, рекомендовано застосовувати перевідний коефіцієнт $k_c = 6,20 \times 10^{-3}$.

4. Отримано результати досліджень фізико-механічних характеристик скла на розтяг при згині. В результаті статистично-ймовірнісного аналізу даних експериментальних досліджень за допомогою розподілу Вейбулла визначено такі рекомендовані до використання у розрахунках величини: значення характеристичної міцності скла на розтяг при згині $f_{gk, 5\%} = 42,57$ МПа та модуль пружності скла $E_{gk, 5\%} = 40396,08$ МПа, що відповідали рівню ненадійності 5% з нижньою межею довірчого інтервалу на рівні 95%.

5. За результатами досліджень різних типів з'єднань скла між собою у багатошарових плитах, виготовлених за допомогою триплексації, було прийнято з'єднання скла з використанням полімерних плівок EVASAFE.

6. За допомогою цифрової оптичної мікроскопії проведено фрактографічний аналіз скляних зразків з випробувань міцності скла на трьохточковий згин. На основі вимірюваних елементів поверхонь руйнування скляних зразків та відповідних руйнуючих зусиль розраховано та рекомендовано до використання у розрахунках характеристичні значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{IC,5\%} = 0,63 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ та коефіцієнта інтенсивності напружень розгалуження тріщини $K_{B,5\%} = 1,905 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, що, згідно з розподілом Вейбулла, відповідають 5%-му рівню ненадійності з нижньою межею довірчого інтервалу на рівні 95%.

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СКЛЯНИХ БАГАТОШАРОВИХ ПЛИТ

4.1. Методика аналітичного моделювання та розрахунку скляних багатошарових плит на основі концепції ефективної товщини та теорії пружності пластин

I-ша методика. На основі представленої у п.1.6 методики обчислили ефективну товщину скляної багатошарової плити з 3 шарами звичайного скла, товщиною по 10 мм кожен, з врахуванням зсуву у 2 проміжних шарах плівки EVASAFE товщиною по 0,76 мм кожна. Ефективну товщину багатошарового скла для розрахунку прогину при згині $h_{ef;w}$ (табл. 4.1) знайшли згідно з рівнянням (1.3) при коефіцієнті передачі зсуву $\omega=0,1$. Ефективну товщину для розрахунку напружень в нижньому шарі скла $h_{ef;\sigma;1}$ (див. табл. 4.1) знайшли згідно з рівнянням (1.2) на основі значення $h_{ef;w}$ при $\omega=0,1$.

Таблиця 4.1.

Результати розрахунку для скляної багатошарової плити

згідно з prEN 16612: 2013 [122]

ω	$h_{ef;w}$, мм	$h_{ef;\sigma;1}$, мм (нижній шар)
0,1	17,945	21,807

Згідно з С.П. Тимошенком та С. Войновським-Кригером [19, с.246-249], прямокутну пластину, пружно оперту по контуру на чотири балки, можна розглядати як пластину, оперту в вершинах з вільними краями. При цьому, балки, жорстко обперті в вершинах пластини, мають нульову жорсткість. Згідно з С. Войновським-Кригером [150, с.352] для квадратної пластини із стороною a , посередині якої рівномірно розподілено на невеликій прямокутній області із розмірами $s \times t$ діє навантаження F , згинальні моменти

M_{x1} і M_{y1} , що виникають в центрі завантаженої області, при коефіцієнті Пуассона $\nu = 0,3$ знаходять із системи рівнянь (4.1):

$$\left. \begin{aligned} M_{x1} + M_{y1} &= \left[0,1034 \cdot \left(\ln \frac{a^2}{s^2 + t^2} - \varphi \right) + 0,492 \right] \cdot F \\ M_{x1} - M_{y1} &= 0,0557 \cdot \psi \cdot F \end{aligned} \right\}, \quad (4.1)$$

$$\text{де } \varphi = k \cdot \arctan \frac{1}{k} + \frac{1}{k} \cdot \arctan k; \psi = k \cdot \arctan \frac{1}{k} - \frac{1}{k} \cdot \arctan k; k = t / s.$$

Якщо коефіцієнт Пуассона інший, то поправка стосовно згинальних моментів відповідно до системи рівнянь (4.1) виконується множенням суми моментів на коефіцієнт $(1 + \nu) / 1,3$ [150, с.352].

Знаючи згинальні моменти для двох значень коефіцієнта Пуассона ν_1 і ν_2 ($\nu_2 > \nu_1$), можна визначити величини моментів для будь-якого значення ν [2, с.356-357]:

$$\left. \begin{aligned} M_x &= \frac{(\nu_2 - \nu)(M_x)_1 - (\nu_1 - \nu)(M_x)_2}{\nu_2 - \nu_1} \\ M_y &= \frac{(\nu_2 - \nu)(M_y)_1 - (\nu_1 - \nu)(M_y)_2}{\nu_2 - \nu_1} \end{aligned} \right\}, \quad (4.2)$$

де $(M_x)_1$ і $(M_y)_1$ – моменти при коефіцієнті Пуассона ν_1 , $(M_x)_2$ і $(M_y)_2$ – моменти при ν_2 .

Моменти M_{x2} і M_{y2} , що виникають в центрі опертої в вершинах квадратної пластини під дією рівномірно-розподіленого навантаження q від власної ваги пластини, при $\nu = 0,2$ обчислили згідно з рівнянням (4.3), знайденим за допомогою відношень (4.2) при відомих значеннях моментів $(M_x)_1 = (M_y)_1 = 0,1109qa^2$ і $(M_x)_2 = (M_y)_2 = 0,1090qa^2$ [19, с. 247; 150, с.352]

для коефіцієнтів Пуассона $\nu_1 = 0,25$ та $\nu_2 = 0,3$, відповідно:

$$M_{x2} = M_{y2} = \frac{(0,3 - 0,2)(0,1109 q a^2) - (0,25 - 0,2)(0,1090 q a^2)}{(0,3 - 0,25)} = 0,1128 q a^2 \quad (4.3)$$

В результаті, сумарні згинальні моменти M_x і M_y в центрі квадратної пластини, опертої у вершинах, від навантаження, зосередженого на невеликій області посередині пластини, рівні:

$$M_x = M_{x1} + M_{x2} = M_y = M_{y1} + M_{y2}. \quad (4.4)$$

Максимальні нормальні напруження в пластині знаходять за формулою (4.5) [19, с.56]:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{6 \cdot M_x}{h^2} = \frac{6 \cdot M_y}{h^2}, \quad (4.5)$$

де $h = h_{ef;\sigma;j}$ – ефективна товщина шару багатошарової пластини.

У табл. 4.2 представлені згинальні моменти M_x , M_y , знайдені за формулою (4.4), та напруження σ_x , σ_y , за формулою (4.5), опертої по кутах квадратної плити з розмірами в плані $a \times a = 0,45 \text{ м} \times 0,45 \text{ м}$, навантаженої покроково зусиллям F_i посередині плити через квадратний штамп із стороною $s = t = 0,1 \text{ м}$. Складову від власної ваги плити $M_{x2} = M_{y2}$ розраховували для товщини, рівної трьом шарам скла. Значення σ_x , σ_y відповідають внутрішнім зусиллям в нижньому шарі скла з приведеною товщиною $h_{ef;\sigma;1} = 21,807 \text{ мм}$ при коефіцієнті передачі зсуву $\omega = 0,1$.

Таблиця 4.2.

Результати розрахунку для нижнього шару скла
згідно з теорією пружності пластин за допомогою аналітичної моделі
С.П. Тимошенка та С. Войновського-Кригера [19, с.246-249]

i	F_i , кН	$M_x = M_y$, кН·м/м	$\sigma_x = \sigma_y$, МПа ($\omega=0,1$; $h_{ef;\sigma;1} = 21,807$ мм)
1	2	0,542	6,843
2	4	1,068	13,469
3	6	1,593	20,096
4	8	2,118	26,722
5	10	2,643	33,349
6	12	3,168	39,975
7	14	3,693	46,602
8	16	4,219	53,228
9	18	4,744	59,855
10	20	5,269	66,481
11	22	5,794	73,108
12	24	6,319	79,734

Як видно з табл. 4.2, значення характеристичної міцності скла на розтяг при згині $f_{gk, 5\%} = 42,57 \text{ МПа}$ у нижньому шарі досягнуто між 6-им та 7-им кроками навантаження при величині $F_{cr}^{calc} = 12,85 \text{ кН}$. Відповідно, перевищення величини експериментального критичного навантаження F_{cr}^{ex} над розрахунковим F_{cr}^{calc} склало: $F_{cr}^{ex} / F_{cr}^{calc} = 14,50 \text{ кН} / 12,85 \text{ кН} = 1,13$ раз.

Блок-схема методики аналітичного розрахунку (*I-ої методики*) несучої здатності скляної багатошарової плити, вільно опертої по чотирьох кутах, що працює на згин від навантаження, рівномірно розподіленого по невеликій квадратній області, посередині плити, представлена на рис. 4.1.

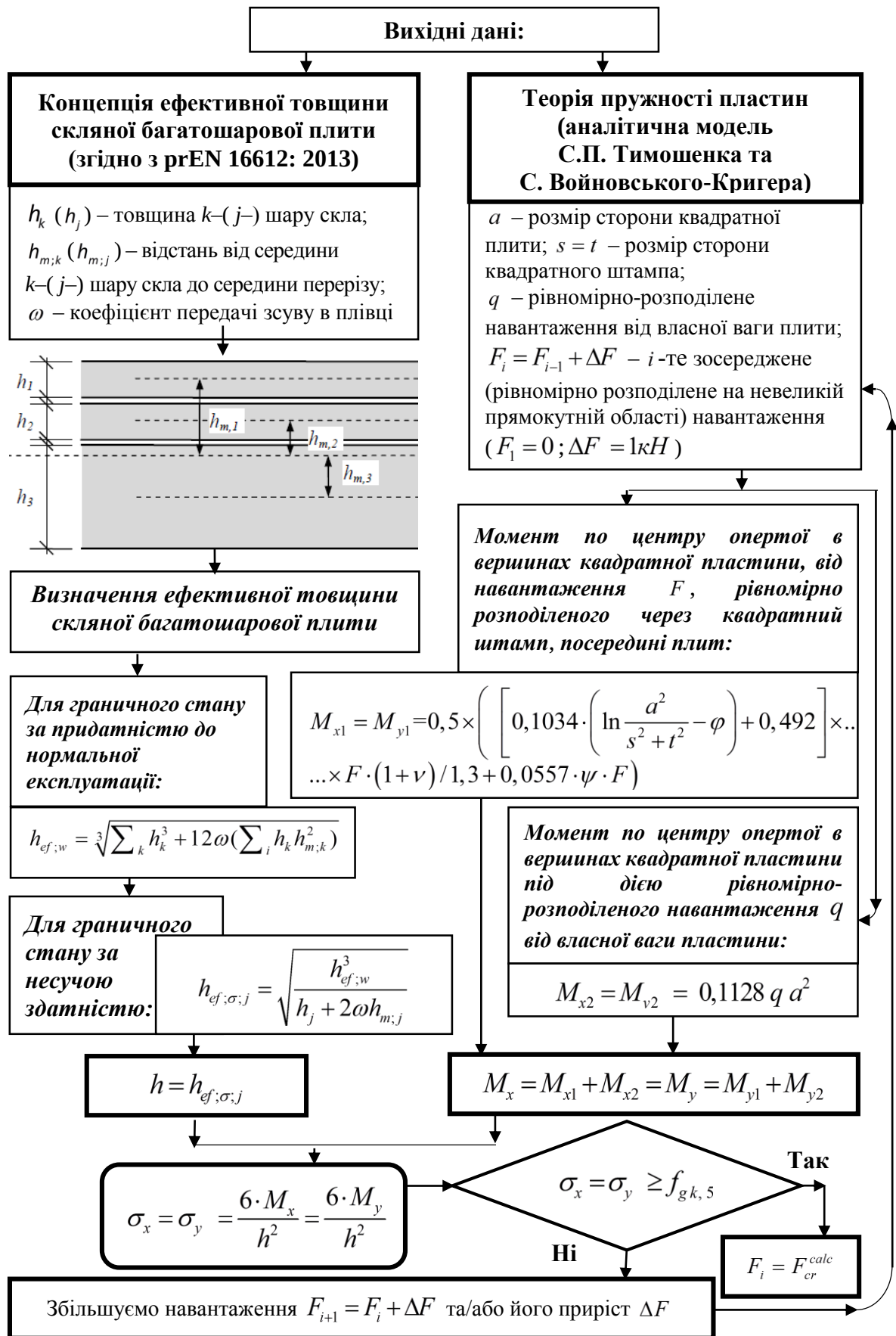


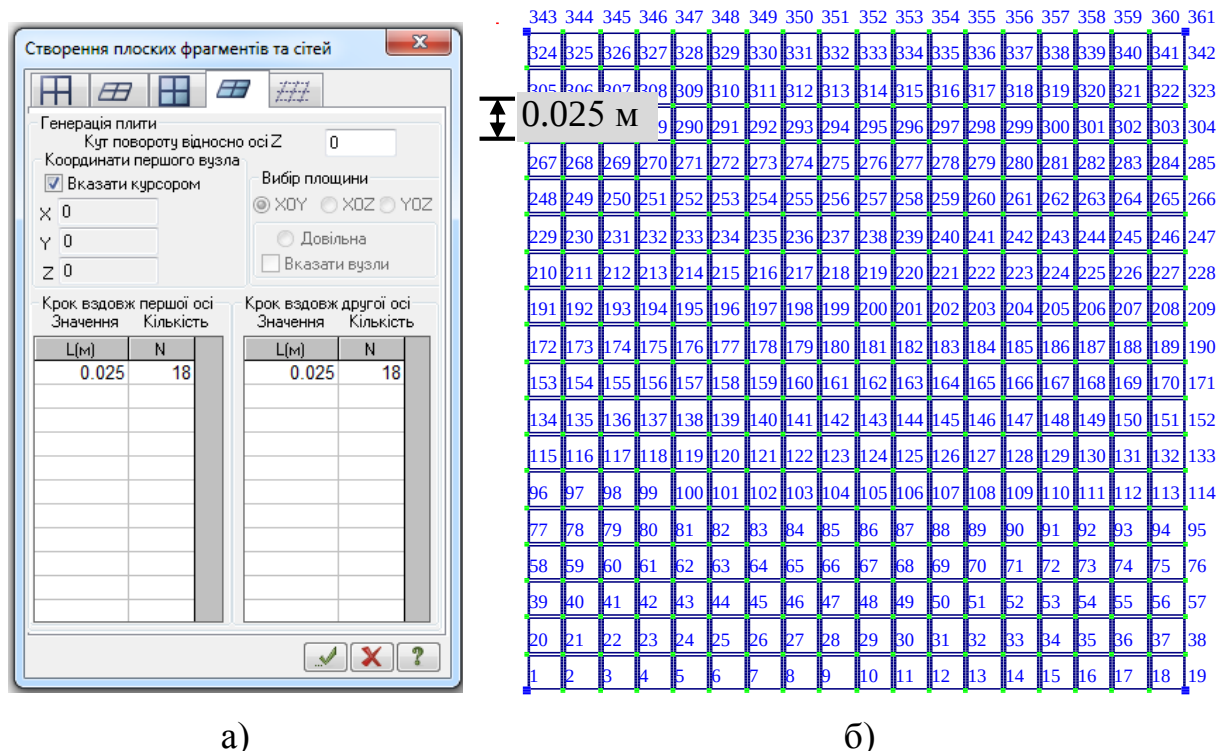
Рис. 4.1. Блок-схема методики аналітичного розрахунку несучої здатності скляної багатошарової плити (I-ої методики)

4.2. Методика чисельно-аналітичного моделювання та розрахунку скляних багатошарових плит на основі концепції ефективної товщини та методу скінченних елементів

II-га методика полягає у комп'ютерному моделюванні за допомогою МСЕ скляної багатошарової плити як одношарової плити з товщиною, знайденою аналітично на основі концепції ефективної товщини згідно з prEN 16612: 2013 [121] (див. п. 4.1).

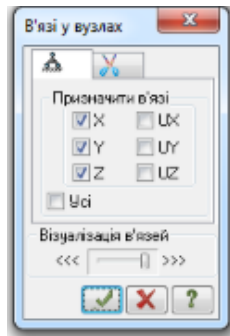
4.2.1. Побудова розрахункової схеми. Нелінійна постановка задачі

Чисельну модель скляної багатошарової плити з ефективною товщиною згідно з prEN 16612: 2013 [121] розраховували на основі МСЕ за допомогою ПК ЛІРА-САПР. СЕ-модель плити складалася із 324 скінченних елементів з розмірами у плані 25 x 25 мм та 361 вузла (рис. 4.2).

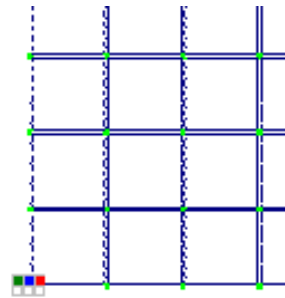


а) б)
Рис. 4.2. Побудова СЕ-моделі плити: а) задання кроків СЕ
(діалогове вікно «Створення регулярних фрагментів та сітей»);
б) СЕ-модель плити з нумерацією вузлів

Задання шарнірного опирання для виділених вузлів по кутах плити виконали у діалоговому вікні «В'язі у вузлах», відзначивши прапорцями напрямки X, Y, Z, за якими заборонили переміщення вузлів (рис. 4.3).



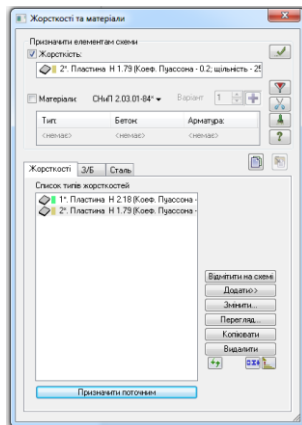
а)



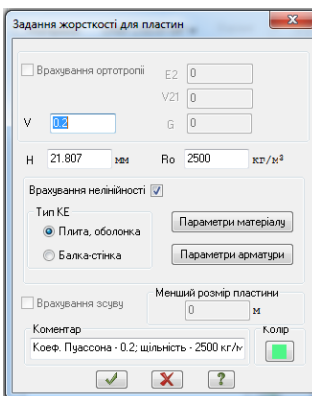
б)

Рис. 4.3. Задання граничних умов у вузлах опирання плити: а) діалогове вікно «В'язі у вузлах»; б) фрагмент СЕ-моделі плити з прикладеними в'язями

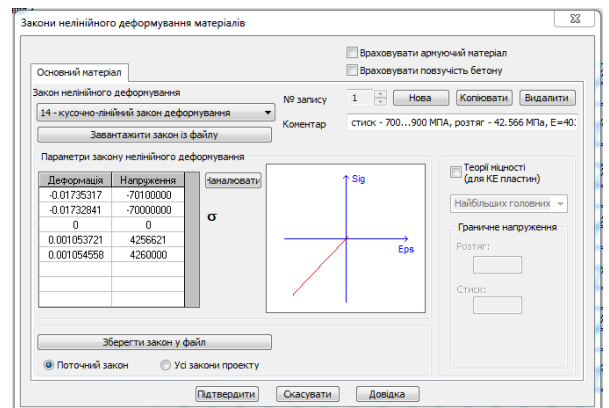
Жорсткість елементів плити відповідала типу «Пластини» (рис. 4.4, а). У діалоговому вікні «Задання жорсткості для пластин» (рис. 4.4, б) задали значення коефіцієнта Пуассона ν , товщину перерізу H та питому вагу матеріалу R_0 . Активували опцію «Врахування нелінійності», для типу КЕ «Плита, оболонка», далі, у діалоговому вікні «Закони нелінійного деформування матеріалів» (рис. 4.4, в) обрали «14-кусочно-лінійний закон деформування» матеріалу.



а)



б)



в)

Рис. 4.4. Задання жорсткості скінченним елементам плити:

а) обрані типи жорсткостей (пластини товщиною $h_{ef;\sigma;1}$ та $h_{ef;w}$);

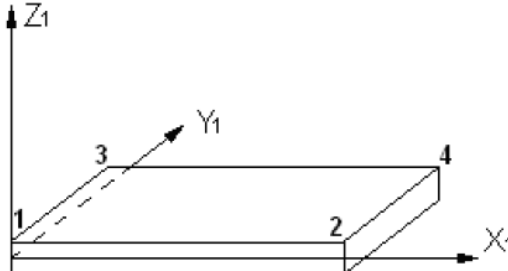
б) задання параметрів жорсткості (на прикладі пластини товщиною $h_{ef;\sigma;1}$);

в) кусочно-лінійний закон деформування

Фізичну нелінійність (нелінійну пружність) скла змодельовали за допомогою фізично нелінійних скінченних елементів типу CE-241 з бібліотеки скінченних елементів для фізично нелінійних задач [3, с.28; 18, с.8] (табл. 4.3) та закону ламаної типу «деформація-напруження» (див. рис. 4.4, в; табл. 4.4) з бібліотеки законів деформування матеріалів (залежностей σ - ϵ) для фізично нелінійних скінченних елементів [16, с.10].

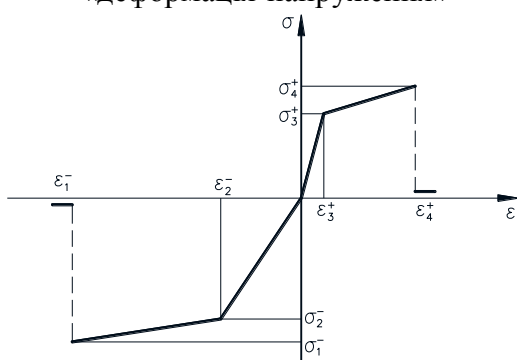
Таблиця 4.3.

Скінченний елемент типу CE-241 [3, с.28; 16, с.8]

№ CE	Найменування CE	Ознака схеми	Площина розташування	Ступені свободи
1	2	3	4	5
241	Прямокутний елемент оболонки 	5	довільно	X, Y, Z, UX, UZ, UY

Таблиця 4.4.

Закон деформування матеріалу (залежність σ - ϵ), використаний у розрахунку з фізично нелінійними скінченними елементами CE-241 [16, с.10]

Вид залежності	Поле параметрів
Закон ламаної типу «деформація-напруження» 	ϵ_i – деформація в проміжній точці; σ_i – напруження в проміжній точці; – характеристики вітки стиску є від’ємними числами; – ділянки задаються зліва направо (стиск – розтяг); Кількість i-точок необмежена. Обмеження: горизонтальні ділянки не задавати.

Врахування нелінійної роботи конструкції дозволило здійснити побудову адекватної розрахункової схеми, виявити додаткові резерви несучої здатності, знизити матеріаломісткість, здійснити моделювання процесу життєвого циклу конструкції [1].

Розрахункова схема плити представлена на рис. 4.5. Навантаження було прийняте розподіленим на області 100×100 мм по центру плити.

Завантаження 1

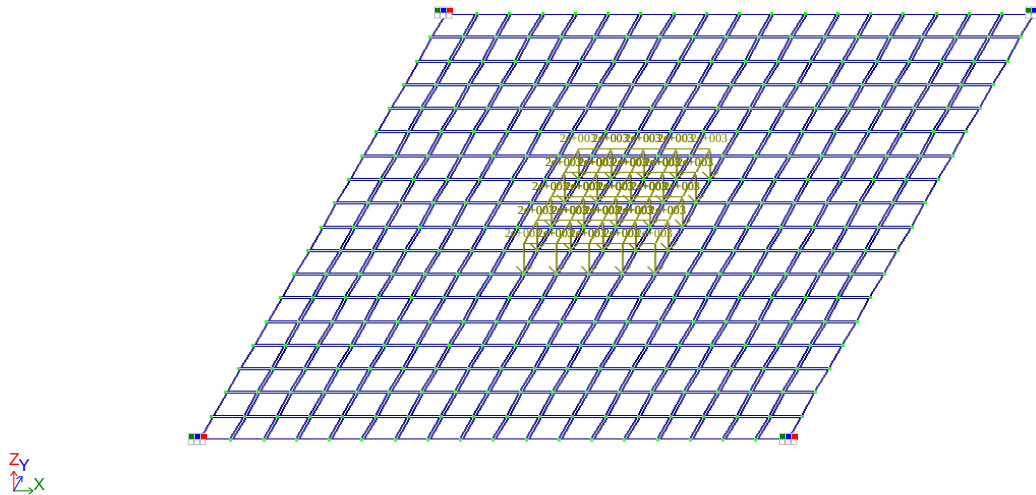


Рис. 4.5. Розрахункова схема плити (пластини товщиною $h_{ef;\sigma;1}$ та $h_{ef;w}$)

Розрахунок фізично нелінійної задачі виконано за допомогою покрокового методу для кількох завантажень [3, с.24] (рис. 4.6), які, в свою чергу, також можуть ділитись на кроки [3, с.24]. Історію навантажень сформували із нелінійних завантажень в один крок, заданих через відповідні значення «сумарного коефіцієнта», що становив 0,1 ... 0,6, 0,605 ... 0,695, 0,7 ... 1,0 від навантаження на розрахунковій схемі (див. рис. 4.6).

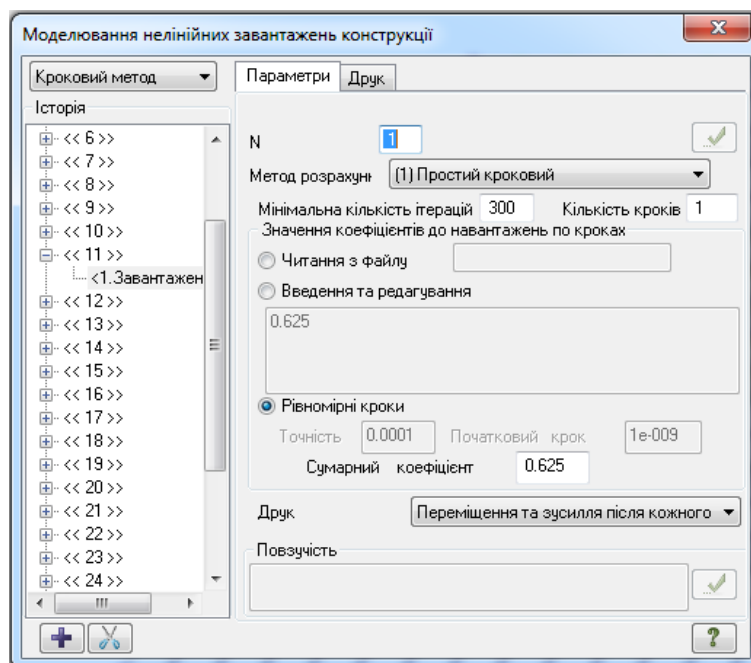
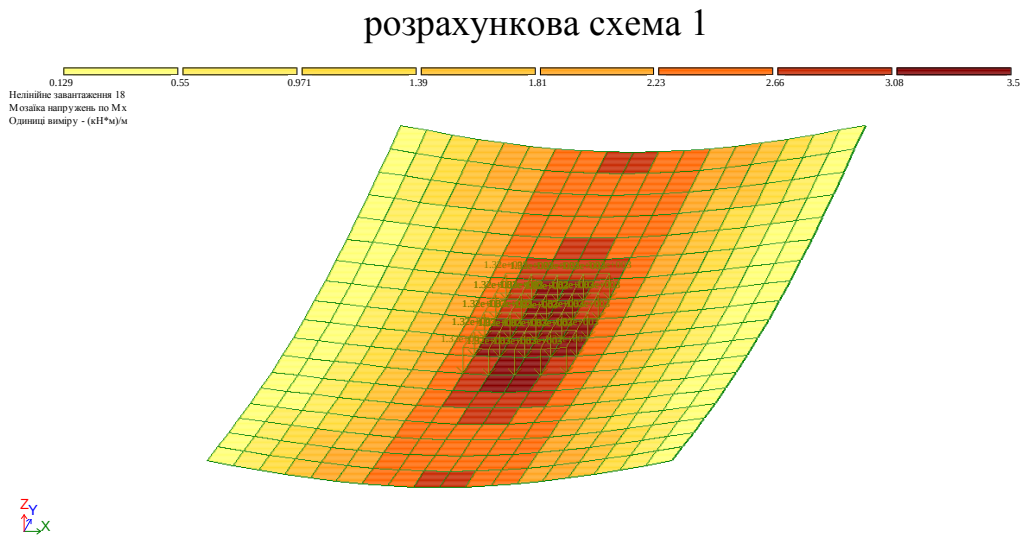


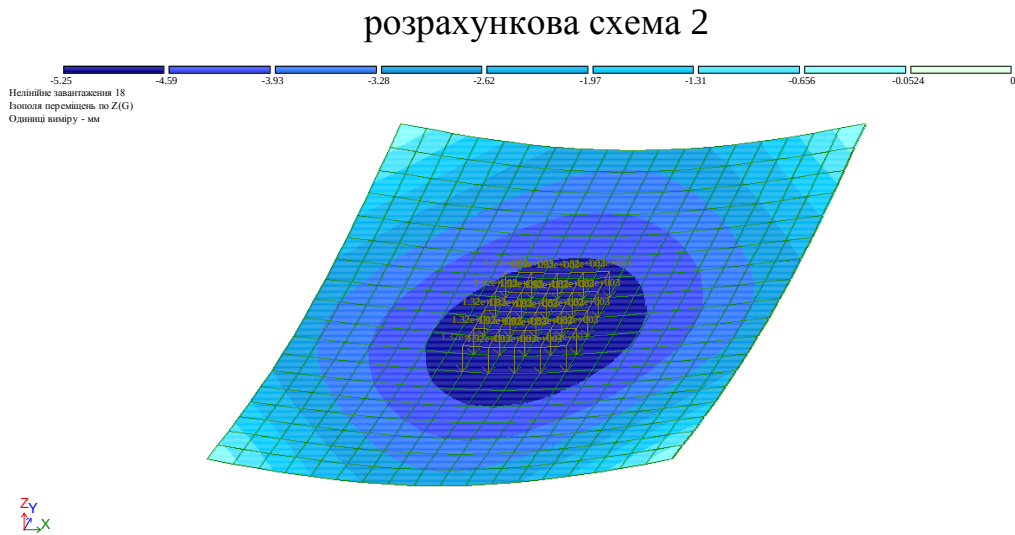
Рис. 4.6. Діалогове вікно «Моделювання нелінійних завантажень кострукції»
(на прикладі завантаження рівного 0,625 від навантаження
на розрахунковій схемі)

4.2.2. Аналіз результатів розрахунку

Для зручності візуалізації результатів фізично-нелінійного розрахунку скляної багатошарової плити в ПК ЛІРА-САПР, перед початком розрахунку був сформований набір нелінійних завантажень F_i , що відповідали етапам навантаження у натурному експерименті. Оцінку напружено-деформованого стану та стану руйнування плити виконали для кожного завантаження окремо. Аналіз результатів при кожному завантаженні F_i проводили для двох розрахункових схем плити: розрахункової схеми 1 (рис. 4.7, а) – пластини з ефективною товщиною багатошарового скла для розрахунку напружень нижнього шару скла $h_{ef;\sigma;1}$; розрахункової схеми 2 (рис. 4.7, б) – пластини з ефективною товщиною багатошарового скла для розрахунку прогину $h_{ef;w}$.



а)



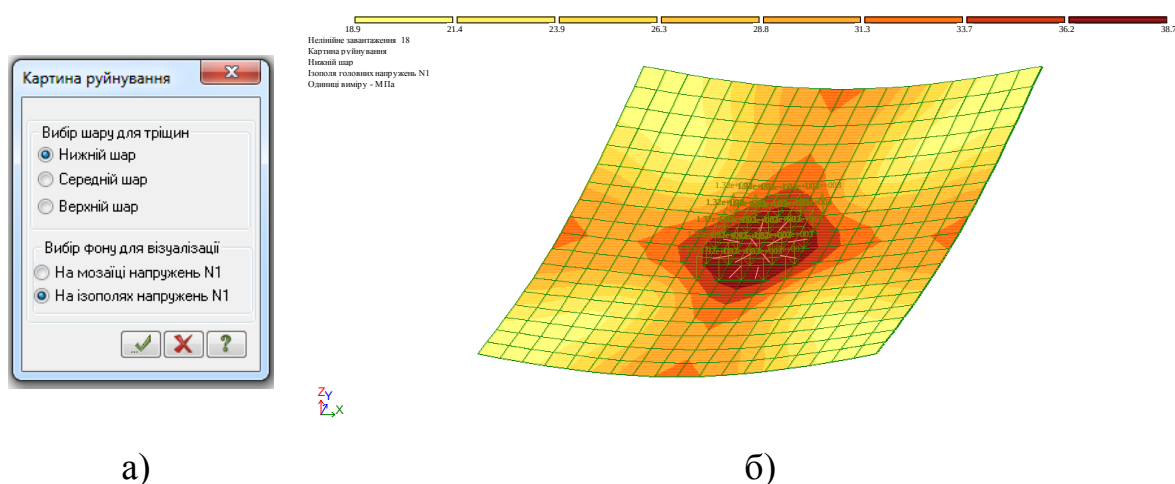
б)

Рис. 4.7. Результати розрахунку в ПК ЛІРА-САПР

(при завантаженні $F_i = 13,2$ кН): а) мозаїка напружень по Mx;

б) ізополя переміщень по Z (G)

Внаслідок засосування нелінійного розрахунку отримали результати руйнувань на кожному етапі завантаження. Появу тріщин зафіксували при нелінійному завантаженні $F_{cr}^{calc} = 13,2$ кН (рис. 4.8). Відповідно, перевищення величини експериментального критичного навантаження F_{cr}^{ex} над розрахунковим F_{cr}^{calc} склало: $F_{cr}^{ex} / F_{cr}^{calc} = 14,50$ кН / 13,2 кН = 1,10 раза.



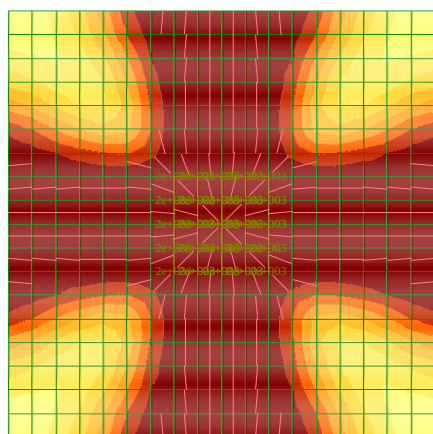
– тріщина, що виникла при розтягу (з урахуванням напрямку розвитку)

Рис. 4.8. Перегляд стану руйнування в ПК ЛІРА-САПР:

а) виведення результатів; б) картина руйнування на етапі появи тріщин

Максимальний момент був рівний $3,5 \text{ кН}\cdot\text{м/м}$ (див. рис. 4.7, а), при цьому найбільші переміщення становили $w_{cr}^{calc} = 5,25 \text{ мм}$ (див. рис. 4.7, б), що у 2,88 раза більше за експериментальний прогин $w_{cr}^{ex} = 1,82 \text{ мм}$.

Повна картина руйнування, яку отримали при нелінійному розрахунку за допомогою МСЕ в ПК ЛІРА-САПР, відповідала характеру руйнування звичайного скла у скляних багатошарових плитах (рис. 4.9).



а)

б)

Рис. 4.9. Картина руйнування звичайного скла:

а) згідно з розрахунком в ПК ЛІРА-САПР;

б) отримана експериментально

4.3. Порівняння результатів розрахунку

Результати моделювання скляних багатошарових плит з трьома шарами звичайного скла, отримані у п. 4.1, п. 4.2 даної роботи, порівняли з результатами натурних експериментів. Якісне порівняння свідчить про те, що робота таких конструкцій є відтворюваною та прогнозованою. Кількісне порівняння результатів розрахунків, отриманих за допомогою методик аналітичного та чисельно-аналітичного розрахунків, з результатами натурних експериментів представлено у табл. 4.5.

Таблиця 4.5.

Порівняння результатів експериментальних досліджень
з результатами моделювання і розрахунку
трёхшарових 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>I-ша методика</i>	14,5	1,82	12,85	–	1,13	–
<i>II-га методика</i>			13,2	5,25	1,10	2,88

Використані методики розрахунку забезпечили досягнення розрахункових руйнуючих навантажень F_{cr}^{calc} , дещо менших у порівнянні з експериментальними значеннями F_{cr}^{ex} . Перевищення в сторону експериментальних значень, у 1,13 та 1,10 раза, відповідно, підтвердило, що обрані методики розрахунків дають можливість з достатньою точністю визначити несучу здатність скляних багатошарових плит.

Розрахункове значення найбільшого прогину w_{cr}^{calc} , зафіксоване в ПК ЛІРА-САПР під час чисельно-аналітичного розрахунку (*II-га методика*), забезпечило запас у розмірі 2,88 раза у порівнянні з експериментальним значенням w_{cr}^{ex} .

4.4. Запропонована методика чисельно-аналітичного моделювання та розрахунку скляних багатошарових плит на основі механіки руйнування, методу скінченних елементів та концепції ефективної товщини

III-тя методика на основі механіки руйнування полягає у комп'ютерному моделюванні за допомогою МСЕ росту поверхневої тріщини в скляній багатошаровій плиті з товщиною, знайденою аналітично на основі концепції ефективної товщини згідно з prEN 16612: 2013 [121] (див. п. 4.1, п. 4.2).

4.4.1. Побудова розрахункової схеми.

Створення твердотільної моделі плити (рис. 4.10), як геометричної моделі скляної багатошарової плити, виконано у модулі геометричного моделювання «Design Modeler» програми «ANSYS Workbench». Скляну багатошарову плиту прийняли як одношарову плиту з ефективною товщиною, визначеною згідно з prEN 16612: 2013 [121] (див. п. 4.1, 4.2).

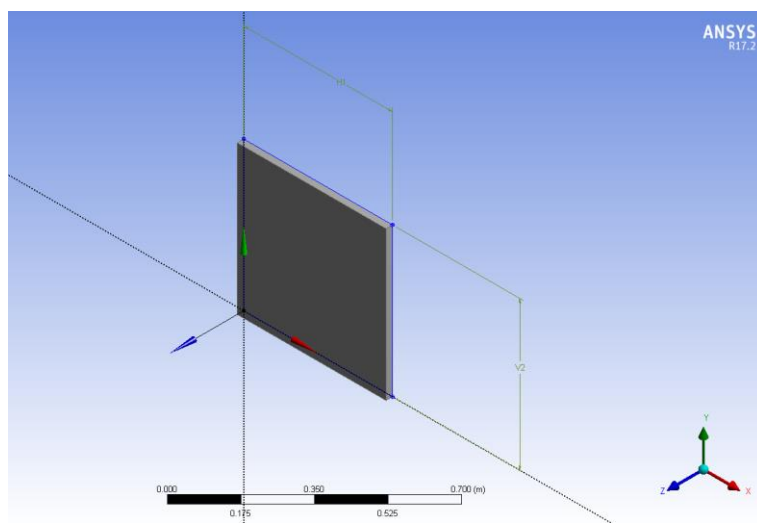


Рис. 4.10. Твердотільна модель плити (модуль «Design Modeler»)

Розбиття твердотільної моделі на СЕ (рис. 4.11) здійснили у модулі симуляції ANSYS «Mechanical» програми «ANSYS Workbench». Враховуючи подальше включення тріщини у вихідну сітку СЕ для побудови сітки тіла обрали елементи типу «Тетраедри» («Tetrahedrons»). Розмір СЕ прийняли рівним 2 мм.

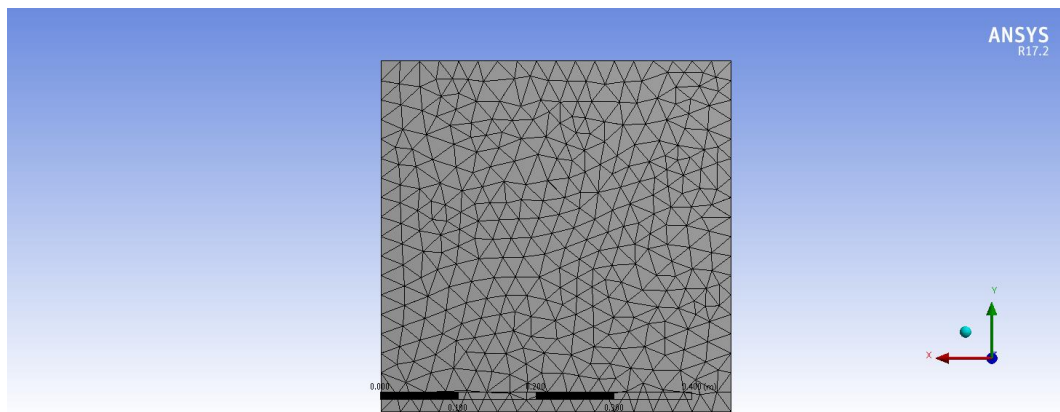


Рис. 4.11. Загальний вигляд сітки СЕ плити

Отримана об'ємна СЕ-модель плити (див. рис. 4.11) складалася із 6550 скінченних елементів та 14474 вузлів (рис. 4.12).

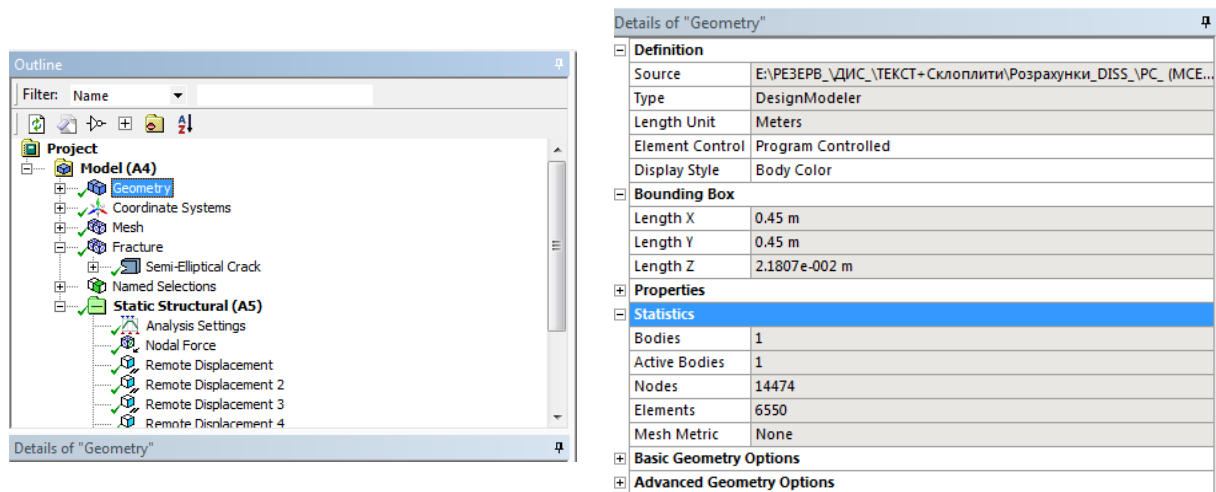
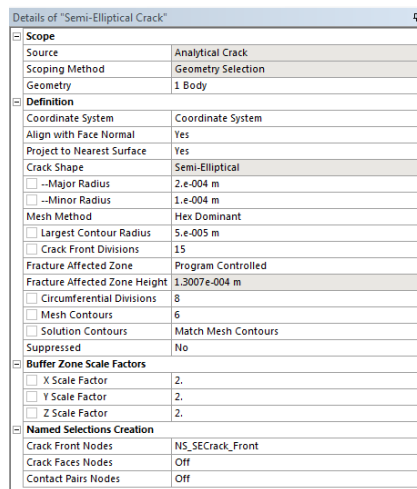


Рис. 4.12. Характеристики згенерованої сітки СЕ:

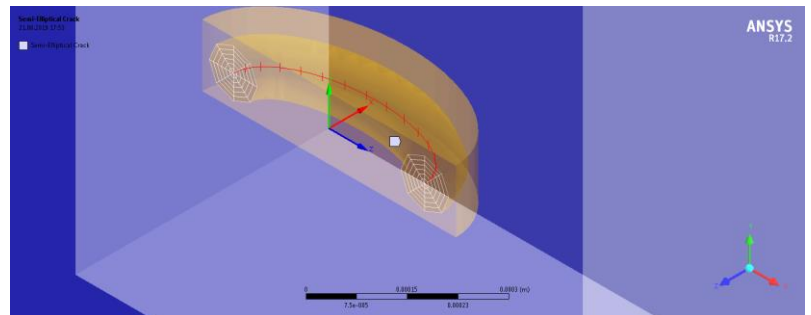
а) вибір геометрії; в) статистичні дані

Моделювання росту поверхневої тріщини на основі механіки руйнування (рис. 4.13) здійснили у модулі симуляції «ANSYS Mechanical». Дефектну область поверхневої напівеліптичної тріщини побудували за допомогою об'єкта «Semi-Elliptical Crack» із набору об'єктів механіки руйнування «Fracture» в «ANSYS Mechanical». У вікні властивостей даного об'єкту «Details of Semi-Elliptical Crack» вказали прив'язку дефекту до існуючої твердотільної моделі, обрали систему координат для орієнтації центра тріщини, задали геометричні розміри тріщини (великий і малий

радіуси), параметри СЕ-сітки для вершин та фронту тріщини, а також розміри перехідної області «Buffer Zone Scale Factors», необхідної для забезпечення рівномірної зміни розмірів СЕ.



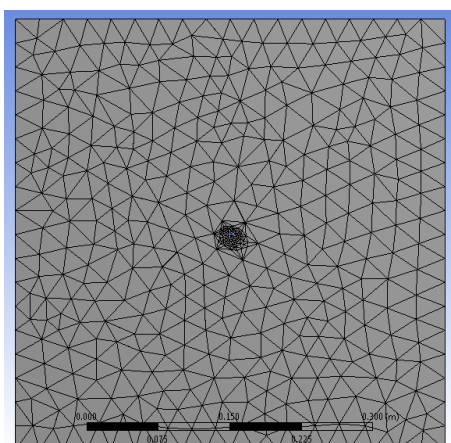
а)



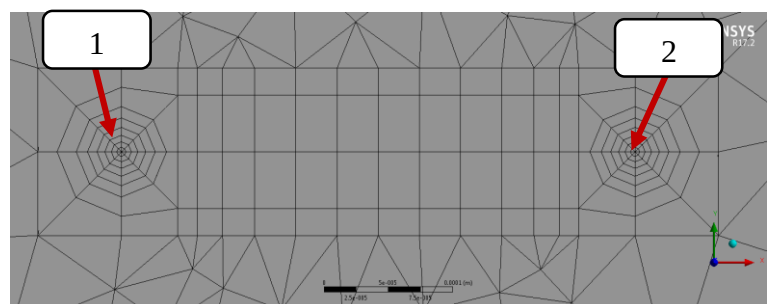
б)

Рис. 4.13. Побудова поверхневої напів-еліптичної тріщини в ANSYS «Workbench»: а) задання властивостей тріщини (панель вікна «Details of Semi-Elliptical Crack»); б) зображення моделі тріщини та перехідної зони

Для включення області тріщини у вихідну сітку СЕ плити виконали генерацію сітки тріщини (рис. 4.14). На рис. 4.14, а подано загальний вигляд початкової тріщини в центрі плити, а на рис. 4.14, б – збільшений вигляд області тріщини, розміщеної між точками 1 та 2.



а)



б)

Рис. 4.14. Сітка СЕ плити з поверхневою напів-еліптичною тріщиною:

а) загальний вигляд; б) область тріщини

Кожне поетапне навантаження задавали окремим вузловим навантаженням в т. Е (рис. 4.15, а). У вікні «Details of Nodal Force» (рис. 4.15, б) у рядку «Named Selection» обрали ім'я вузла для прив'язки навантаження, а у рядку «Z component» – величину навантаження.

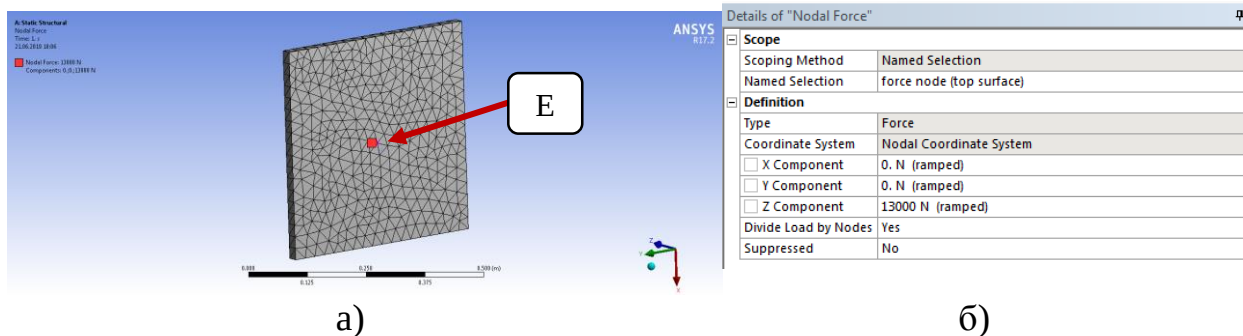


Рис. 4.15. Задання навантаження:

а) відображення навантаження у графічному вікні;

б) параметри навантаження (панель вікна «Details of Nodal Force»)

Опирання у кутових вузлах (т. А, В, С, D) обрали шарнірне (рис. 4.16, а). Для кожної обраної вершини у вікні «Details of Remote Displacement» (рис. 4.16, б) у рядку «Geometry» вказали «Apply», у рядках «X component»...«Z component» задали «0» (закріплення елемента у відповідному напрямку), у рядках «Rotation X» ... «Rotation Z» – «Free» (вільний рух елемента у вказаному напрямку). В результаті, отримали розрахункову схему плити, що представлена на рис. 4.16, а.

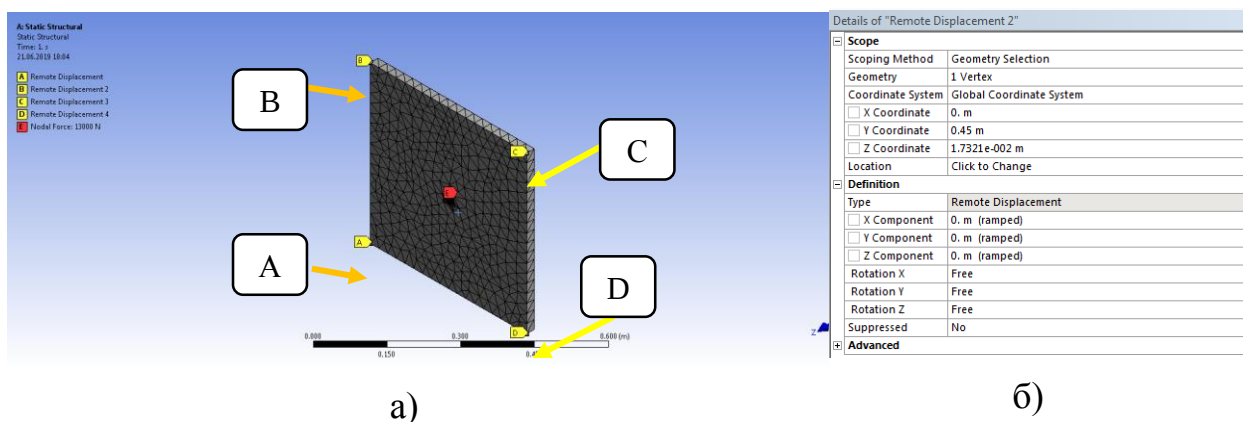


Рис. 4.16. Задання опирання для вершини у куті моделі:

а) відображення розрахункової схеми плити у графічному вікні;

б) параметри опирання (панель вікна «Details of Remote Displacement»)

4.4.2. Аналіз результатів розрахунку

В ANSYS Workbench при виборі методу побудови сітки в тілі як «Тетраедри» («Tetrahedrons»), були отримані CE типів SOLID186 (20-вузлові гексаедри тіла) та SOLID187 (10-вузлові тетраедри тіла) (рис. 4.17).

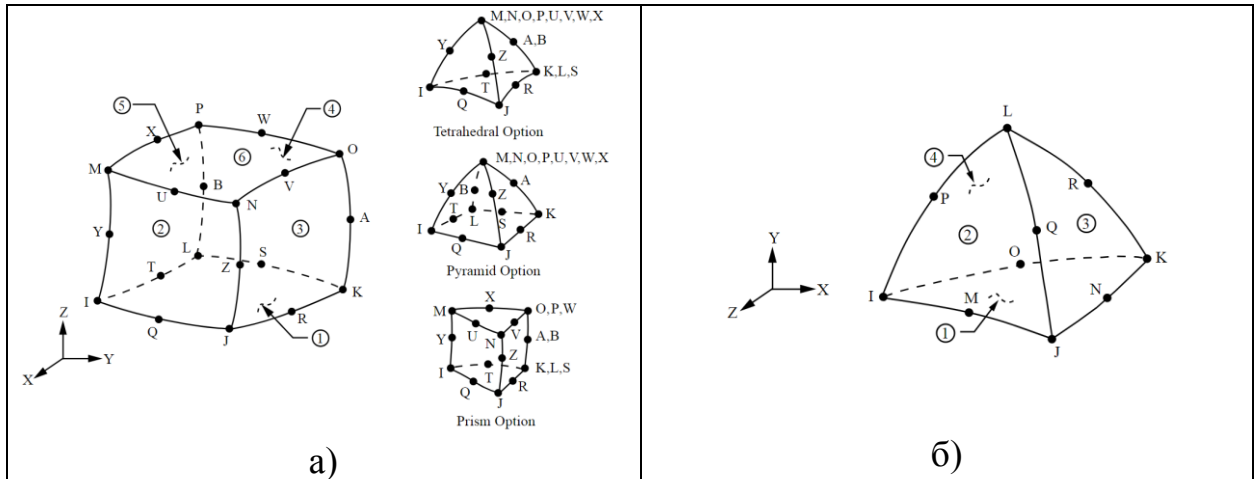
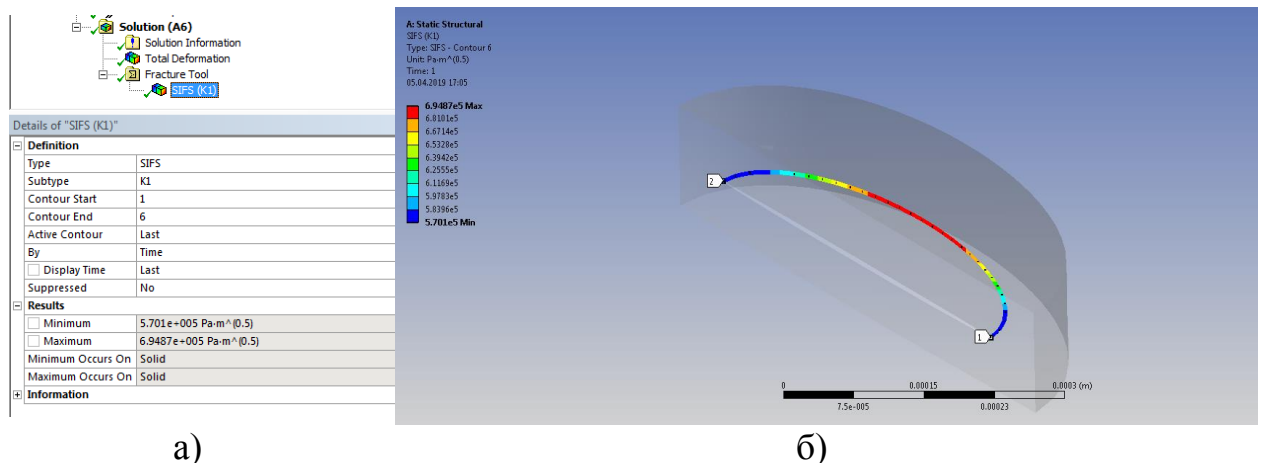


Рис. 4.17. Геометрія, розташування вузлів і система координат для елементів:

а) типу SOLID186; б) типу SOLID187

Перегляд результатів розрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень активувався вибором об'єкта «SIFS (K1)» з набору об'єктів «Fracture Tool» у постпроцесорі «Solution (A6)» (рис. 4.18, а).



а)

б)

Рис. 4.18. Результати розрахунку SIFS (K1): а) задання параметрів для перегляду результатів розрахунку; б) графічне представлення зміни значень SIFS (K1) по довжині контуру інтегрування (на прикладі контуру №6)

У вікні «Details of SIFS (K1)» у рядку «Active Contour» вказано номер контуру, для якого у розділі «Results» даного вікна наведені результати розрахунку. У вікні «Geometry» (рис. 4.18, б) представлені результати розрахунку у графічному вигляді для активного контуру. Точка «1» вказує на початок фронту тріщини, а «2» – на кінець фронту тріщини.

У вікні «Graph» (рис. 4.19) були відображені результати для всіх контурів, починаючи з першого контуру («Contour Start value») і закінчуючи останнім контуром («Contour End value»). Вісь X у вікні «Graph» вказувала на відстань вздовж фронту тріщини. Початок фронту тріщини мав нульове значення, а кінець фронту тріщини – максимальне значення.

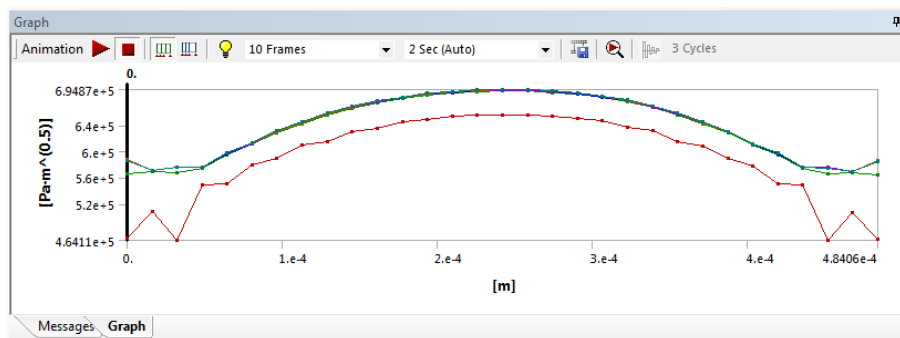


Рис. 4.19. Графік зміни значення SIFS (K1) по довжині контурів інтегрування

У вікні «Tabular Data» (рис. 4.20) відображалися точки даних графіка у форматі таблиці.

Tabular Data				
	Length [m]	✓ SIFS (K1) Contour 1 [Pa·m^(0.5)]	✓ SIFS (K1) Contour 2 [Pa·m^(0.5)]	✓ SIFS (K1) Contour 3 [P
1	0.	4.6761e+005	5.657e+005	5.8804e+005
2	1.6118e-005	5.0845e+005	5.6935e+005	5.7017e+005
3	3.2182e-005	4.646e+005	5.6721e+005	5.7526e+005
4	4.8317e-005	5.4885e+005	5.7492e+005	5.759e+005
5	6.4435e-005	5.5045e+005	5.9544e+005	5.9729e+005
6	8.0571e-005	5.7916e+005	6.1091e+005	6.1194e+005
7	9.6715e-005	5.8975e+005	6.2913e+005	6.3027e+005
8	1.1286e-004	6.0923e+005	6.4286e+005	6.4389e+005
9	1.2901e-004	6.1555e+005	6.5629e+005	6.5735e+005
10	1.4517e-004	6.3121e+005	6.6602e+005	6.6706e+005
11	1.6131e-004	6.362e+005	6.7512e+005	6.7617e+005
12	1.7746e-004	6.4575e+005	6.8132e+005	6.8235e+005
13	1.936e-004	6.496e+005	6.8661e+005	6.8764e+005
14	2.0975e-004	6.5358e+005	6.8957e+005	6.9058e+005

Рис. 4.20. Таблиця результатів зміни значення SIFS (K1) по довжині контурів інтегрування

У якості критерію руйнування обрали найближче до експериментально визначеної в'язкості руйнування $K_{IC,5\%}=0,63\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$ (див. п. 3.4) усереднене значення із коефіцієнтів інтенсивності напружень SIFS (K1) по останньому контуру інтегрування (див. рис. 4.19, рис. 4.20), 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 $F_{cr}^{ex}=14,5\text{кН}$ на рівні 3,6 % підтвердило, що обрана методика розрахунку дозволяє з достатньою точністю визначити несучу здатність скляних багатошарових плит.

4.5. Рекомендації з проектування

За результатами виконаних експериментальних та теоретичних досліджень скляних багатошарових плит, виготовлених за технологією триплексації, які оперті по чотирьох кутах, розроблені наступні рекомендації з проектування:

1. Рекомендовано для виготовлення плит використовувати три шари скла більшої товщини (10 мм) та два шари плівки типу EVASAFE™.

2. Для збільшення несучої здатності використовувати гартоване скло у нижньому та верхньому шарах, а також термозміцнене скло у середньому шарі.

3. Не рекомендується використання додаткового армування за допомогою сітки SikaWrap-230C між нижнім та середнім шарами скла, оскільки, при цьому, міцність та деформативність плит не збільшились.

4. Для розрахунку несучої здатності скляних багатошарових плит рекомендовано використовувати:

- 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).

5. Для розрахунку прогинів плит необхідно встановити величину граничних деформацій (встановлює Замовник або відповідні нормативні документи). В практичних цілях можна застосовувати чисельно-аналітичний розрахунок (*II-га методика*) на основі концепції ефективної товщини (prEN 16612: 2013) та нелінійного розрахунку за допомогою МСЕ (ПК ЛІРА-САПР), що дає запас у 2,88 рази. Для більш точнішого розрахунку прогину необхідно виконувати додаткові натурні експерименти.

6. Представлено детальний опис та алгоритми методик розрахунку скляних багатошарових плит, що працюють на згин:

- аналітичного розрахунку (*I-ша методика*) – на основі концепції ефективної товщини (prEN 16612: 2013) та теорії пружності пластин (модель С. Войновського-Кригера та С.П. Тимошенка) – див. п. 4.1;

- чисельно-аналітичного розрахунку (*II-га методика*) – на основі концепції ефективної товщини (prEN 16612: 2013) та нелінійного розрахунку за допомогою МСЕ (ПК ЛІРА-САПР) – див. п. 4.2;

- чисельно-аналітичного розрахунку (*III-тя методика*) – на основі механіки руйнування, МСЕ (Ansys Workbench) та концепції ефективної товщини (prEN 16612: 2013) – див. п. 4.4, Додаток А.

4.7. Висновки до Розділу 4

За результатами моделювання та розрахунку напружено-деформованого стану скляних багатошарових плит, виготовлених з трьох шарів звичайного скла, ламінованих між собою подвійною полімерною плівкою, можна зробити наступні висновки:

1. Представлені та проаналізовані результати за трьома методиками моделювання та розрахунку скляних багатошарових плит, виготовлених з трьох шарів звичайного скла, ламінованих між собою подвійною полімерною плівкою:

- аналітичного розрахунку (*I-ша методика*) – на основі концепції ефективної товщини (prEN 16612: 2013) та теорії пружності пластин (модель С. Войновського-Кригера та С.П. Тимошенка);

- чисельно-аналітичного розрахунку (*II-га методика*) – на основі концепції ефективної товщини (prEN 16612: 2013) та нелінійного розрахунку за допомогою MCE (ПК ЛІРА-САПР);

- чисельно-аналітичного розрахунку (*III-тя методика*) – на основі механіки руйнування, MCE (Ansys Workbench) та концепції ефективної товщини (prEN 16612: 2013).

2. 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: за допомогою фізично нелінійних скінченних елементів типу СЕ-241 в ПК ЛІРА-САПР та елементів тіла SOLID186 і SOLID187 в Ansys Workbench (деформацію зсуву врахували при визначенні ефективної товщини згідно з prEN 16612: 2013).

3. Згідно з наведеними у п.1 методиками, отримали результати напружено-деформованого стану багатошарових скляних плит. Методика аналітичного розрахунку (*I-ша методика*) стосувалася виключно розрахунку несучої здатності плит. Використання нелінійності у чисельно-аналітичному розрахунку із застосуванням ПК ЛІРА-САПР (*II-га методика*) дозволило отримати картину руйнування плит, аналогічну як у натурних експериментах. В результаті чисельно-аналітичного розрахунку із застосуванням Ansys Workbench (*III-тя методика*) при досягненні несучої здатності плити було отримано значення параметра тріщиностійкості згідно з механікою руйнування.

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

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

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 ЛІРА-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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барабаш М., Городецкий Д., Ромашкина М. Нелинейность в ЛИРА-САПР. URL: <https://help.liraland.ru/984/3426/> (дата обращения: 10.12.2019).
2. Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Пластины, диски, балки-стенки: Прочность, устойчивость и колебания. К.: Госстройиздат УССР, 1959. 1049 с.
3. Верификационный отчет по программному комплексу ЛИРА-САПР. Том I. Основные возможности. Библиотека конечных элементов. Примеры применения. М.: ГУП МНИИТЭП, ЛИРА СЕРВИС, ЛИРА САПР, 2015. 51 с. URL: https://www.liraland.ru/public_private/lira/Verification/LIRA-SAPR_Verification_vol-1.pdf (дата обращения: 10.12.2019).
4. ДСТУ 3290-95. Виробництво скла. Види скла. Терміни та визначення. [Чинний від 1997-01-01]. Вид. офіц. К. : Держстандарт України, 1996. 16 с.
5. ДСТУ Б В.2.6-7-95. Конструкції будинків і споруд. Вироби будівельні бетонні та залізобетонні збірні. Методи випробувань навантаженням. Правила оцінки міцності, жорсткості та тріщиностійкості (ГОСТ 8829-94). [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, Науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут бетону та залізобетону (НИИЖБ), 1997. 45 с.
6. ДСТУ Б В.2.7-123-2004. Скло багатошарове будівельного призначення. Технічні умови (ГОСТ 30826-2001 MOD). [Чинний від 2005-01-01]. Вид. офіц. К.: Державний комітет України з будівництва та архітектури, 2004. 39 с.
7. Ламинированное стекло (триплекс). URL: <https://www.glasspro.ua/products/triplex.html> (дата обращения: 10.12.2019).

8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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 (Дубляни, 15-17 травня 2019 р.)*. Львів: СПОЛОМ, 2019. С. 83-84.

14. Осадчук Т., Демчина Х. Дослідження пінобетонних плит, армованих стальними сітками з різним анкеруванням на продавливання. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія: Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. Львів: ЛНАУ, 2014. № 15. С101–106.
15. Осадчук Т., Демчина Х. Использование классической теории упругости пластин для расчета плит, работающих на продавливание в контексте обеспечения устойчивого развития в строительстве. *Устойчиво развитие («Sustainable Development»)*. Варна, 2014. № 20. С.131–136.
16. Программный комплекс «ЛИРА WINDOWS». Руководство пользователя. Том VIII Раздел 15: «ЛИР-СТЕП» - нелинейный шаговый процессор. К.: НИИАСС, 1997. 80 с.
17. Родичев Ю.М. Питання якості, міцності і безпеки вітчизняних виробів з зміцненого скла при проектуванні будівельних конструкцій. *Стан та шляхи вдосконалення застосування світлопрозорих конструкцій: матеріали науково-практичного семінару* (м. Київ, 28 травня 2009 р.). URL: <https://fasadinfo.ua/articles/glass/1346> (дата звернення: 10.12.2019).
18. Стекло и его уникальные возможности. Межслойные пленки EVASAFE®™ Bridgestone: *Международная выставка «Мир стекла - 2009»*: каталог продукции (Москва, 8-11 июня 2009 г.). Москва, 2009. 7 с. URL: <http://xn--80aajzhcnfck0a.xn--p1ai/PublicDocuments/0911591.pdf> (дата обращения: 10.12.2019).
19. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки: 2-е изд., стереотип., пер. с англ. М.: Наука, 1966. 635 с.
20. Achintha M. Sustainability of glass in construction. *Sustainability of Construction Materials* / Ed. J. Khatib. Woodhead Publishing, 2016. P. 79-104. DOI: 10.1016/B978-0-08-100370-1.00005-6.

21. Apple Park. URL: <https://www.sedak.com/en/applications/references/apple-park/> (Last accessed: 10.12.2019).
22. ASTM C1048-12e1. Standard Specification for Heat-Strengthened and Fully Tempered Flat Glass. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012. DOI: 10.1520/C1048-12E01.
23. ASTM C1161-13. Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013. DOI: 10.1520/C1161-13.
24. ASTM C1256-93(2013), Standard Practice for Interpreting Glass Fracture Surface Features. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013. DOI: 10.1520/C1256.
25. ASTM C1322-15. Standard Practice for Fractography and Characterization of Fracture Origins in Advanced Ceramics. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015. DOI: 10.1520/C1322-15.
26. ASTM C158-02(2017). Standard Test Methods for Strength of Glass by Flexure (Determination of Modulus of Rupture). West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017. DOI: 10.1520/C0158-02R17.
27. ASTM C1678-10(2015). Standard Practice for Fractographic Analysis of Fracture Mirror Sizes in Ceramics and Glasses. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015. DOI: 10.1520/C1678-10R15.
28. ASTM D1505-18. Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018. DOI: 10.1520/D1505-18.
29. ASTM E1300-16, Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016. DOI: 10.1520/E1300-16.
30. Auto Safety History. URL: https://amhistory.si.edu/onthemove/themes/story_86_1.html (Last accessed: 10.12.2019).
31. Bansal N.P., Doremus R.H. Handbook of glass properties. New York: Academic Press, 1986. 680 p.

32. Bennison S.J., Serruys F. Designing the Grand Canyon's new laminated glass walkway. *Glass Performance Days: Conference proceedings*, Tampere, Finland, 15 - 18 June 2007. P. 333-335. URL: http://www.sun-tec.ch/downloads/gpd07_bennison.pdf (Last accessed: 10.12.2019).
33. Bennison S.J., Smith C., Van Duser A., Jagota A. Strength of Laminated Safety Glass. *Glass Processing Days: Conference proceedings*, Tampere, Finland, 18-21 June 2001. URL: http://glasslaminatingsolutions.kuraray.com/fileadmin/user_upload/technical_information/downloads/whitepapers/strength_of_laminated_safety_glass.pdf (Last accessed: 10.12.2019).
34. Bennison S.J., Smith C., Van Duser A., Jagota A. Structural performance of laminated glass made with a «stiff» interlayer. *The Use of Glass in Buildings* / ed. V. Block. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2002. P. 57-65. DOI: 10.1520/STP11056S.
35. CNR-DT 210/2013. Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro. Rome, Italy: Italian National Research Council (CNR), 2013. 360 p.
36. Code of Practice for the Structural Use of Glass. Buildings Department, 2018. 76 p. URL: <https://www.bd.gov.hk/doc/en/resources/codes-and-references/code-and-design-manuals/SUG2018e.pdf> (Last accessed: 10.12.2019).
37. Code of practice for use of glass in buildings: AIS Glass Technical paper. URL: <https://www.aisglass.com/sites/default/files/pdfs/technical%20papers/AIS-59.pdf> (Last accessed: 10.12.2019).
38. Ćurković L., Bakić A., Kodvanj J., Haramina T. Flexural strength of alumina ceramics: Weibull analysis. *Transactions of FAMENA*. 2010. № 34. P. 13-19.
39. Curtis R.V., Juszczuk A.S. Analysis of strength data using two- and three-parameter Weibull models. *Journal of Materials Science*. 1998. Vol. 33, No. 5. P. 1151-1157. DOI: 10.1023/A:1004361222711.

40. Datsiou K.C., Overend M. Weibull parameter estimation and goodness-of-fit for glass strength data. *Structural Safety*. 2018. № 73. P. 29–41. DOI: 10.1016/j.strusafe.2018.02.002.
41. Deng B., Jiang D. Determination of the Weibull parameters from the mean value and the coefficient of variation of the measured strength for brittle ceramics. *Journal of Advanced Ceramics*. 2017. Vol. 6, No. 2. P. 149-156. DOI: 10.1007/s40145-017-0227-3.
42. Digital Image Correlation (DIC) Measurement Principles. URL: <http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-dic> (Last accessed: 10.12.2019).
43. Dotan H. Zhangjiajie Grand Canyon Glass Bridge. *Challenging Glass 5: Conference Proceedings*, Belgium, 16-17 June 2016 / Louter C., Belis J., Bos F. (eds.). Belgium: Ghent University, 2016. P. 3-12. DOI: 10.7480/cgc.5.2290.
44. East Taihang Glasswalk. URL: <https://www.atlasobscura.com/places/east-taihang-glasswalk> (Last accessed: 10.12.2019).
45. EN 1051-1:2003. Glass in building - Glass blocks and glass pavers - Part 1: Definitions and description. European Committee for Standardization (CEN), 2003. 16 p.
46. EN 1096-1:2012. Glass in building - Coated glass - Part 1: Definitions and classification. European Committee for Standardization (CEN), 2012. 24 p.
47. EN 12150-1:2015+A1:2019. Glass in building - Thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 1: Definition and description. European Committee for Standardization (CEN), 2015. 22 p.
48. EN 12337-1:2000. Glass in building - Chemically strengthened soda lime silicate glass - Part 1: Definition and description. European Committee for Standardization (CEN), 2000. 38 p.

49. EN 12603:2002. Glass in building - Procedures for goodness of fit and confidence intervals for Weibull distributed glass strength data. European Committee for Standardization (CEN), 2002. 36 p.
50. EN 12758:2019. Glass in building - Glazing and airborne sound insulation - Product descriptions, determination of properties and extension rules. European Committee for Standardization (CEN), 2019. 20 p.
51. EN 1279-1:2018. Glass in building. Insulating glass units. Generalities, system description, rules for substitution, tolerances and visual quality. European Committee for Standardization (CEN), 2018. 44 p.
52. EN 1288-3:2000. Glass in building. Determination of the bending strength of glass. Test with specimen supported at two points (four point bending). European Committee for Standardization (CEN), 2000. 14 p.
53. EN 13024-1:2011. Glass in building - Thermally toughened borosilicate safety glass - Part 1: Definition and description. European Committee for Standardization (CEN), 2011. 38 p.
54. EN 14178-1:2004. Glass in building - Basic alkaline earth silicate glass products - Part 1: Float glass. European Committee for Standardization (CEN), 2004. 20 p.
55. EN 14179-1:2016. Glass in building - Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 1: Definition and description. European Committee for Standardization (CEN), 2016. 50 p.
56. EN 14321-1:2005. Glass in building - Thermally toughened alkaline earth silicate safety glass - Part 1: Definition and description. European Committee for Standardization (CEN), 2005. 30 p.
57. EN 15681-1:2016. Glass in building - Basic alumino silicate glass products - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties. European Committee for Standardization (CEN), 2016. 22 p.
58. EN 15682-1:2013. Glass in building - Heat soaked thermally toughened alkaline earth silicate safety glass - Part 1: Definition and description. European Committee for Standardization (CEN), 2013. 46 p.

- 59. EN 15683-1:2013. Glass in building - Thermally toughened soda lime silicate channel shaped safety glass - Part 1: Definition and description. European Committee for Standardization (CEN), 2013. 22 p.
- 60. EN 1748-1-1:2004. Glass in building - Special basic products - Borosilicate glasses - Part 1-1: Definition and general physical and mechanical properties. European Committee for Standardization (CEN), 2004. 20 p.
- 61. EN 1748-2-1:2004. Glass in building - Special basic products - Glass ceramics - Part 2-1: Definitions and general physical and mechanical properties. European Committee for Standardization (CEN), 2004. 18 p.
- 62. EN 1863-1:2011. Glass in building - Heat strengthened soda lime silicate glass - Part 1: Definition and description. European Committee for Standardization (CEN), 2011. 34 p.
- 63. EN 572-1:2012+A1:2016. Glass in building - Basic soda lime silicate glass products - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties. European Committee for Standardization (CEN), 2012. 18 p.
- 64. EN 572-2:2012. Glass in Building - Basic soda lime silicate glass products - Part 2: Float glass. European Committee for Standardization (CEN), 2012. 18 p.
- 65. EN 572-3:2012. Glass in Building - Basic soda lime silicate glass products - Part 3: Polished wired glass. European Committee for Standardization (CEN), 2012. 14 p.
- 66. EN 572-4:2012. Glass in building - Basic soda lime silicate glass products - Part 4: Drawn sheet glass. European Committee for Standardization (CEN), 2012. 14 p.
- 67. EN 572-5:2012. Glass in Building - Basic soda lime silicate glass products - Part 5: Patterned glass. European Committee for Standardization (CEN), 2012. 14 p.

68. EN 572-6:2012. Glass in building - Basic soda lime silicate glass products - Part 6: Wired patterned glass. European Committee for Standardization (CEN), 2012. 14 p.
69. EN 572-7:2012. Glass in Building - Basic soda lime silicate glass products - Part 7: Wired or unwired channel shaped glass. European Committee for Standardization (CEN), 2012. 14 p.
70. EN 61649:2008. Weibull analysis (IEC 61649:2008). European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), 2008. 72 p.
71. EN ISO 12543-1:2011. Glass in building - Laminated glass and laminated safety glass - Part 1: Definitions and description of component parts. European Committee for Standardization (CEN), 2011. 16 p.
72. EN ISO 12543-2:2011. Glass in building - Laminated glass and laminated safety glass - Part 2: Laminated safety glass. European Committee for Standardization (CEN), 2011. 16 p.
73. EN ISO 12543-3:2011. Glass in building - Laminated glass and laminated safety glass - Part 3: Laminated glass. European Committee for Standardization (CEN), 2011. 14 p.
74. EN ISO 527-1:2019. Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles. European Committee for Standardization (CEN), 2019. 34 p.
75. Eriksen R., Berggreen C., Boyd S.W., Dulieu-Barton J.M. Towards high velocity deformation characterisation of metals and composites using Digital Image Correlation. *EPJ Web of Conferences*. 2010. Vol. 6, Article № 31013. P.1-8.
76. Evasafe™ – уникальное архитектурное решение. *Стекло и Бизнес*. 2011. № 2. С. 22-24. URL: <http://www.glassbusiness.net/docs/gb-2011-02.pdf> (дата звернения: 10.12.2019).
77. Feldmann M., Kasper R., Abeln B., et al. Guidance for European Structural Design of Glass Components: Joint Research Centre (JRC) Scientific and

- Policy Report (JRC No: JRC86637). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. 208 p. DOI: 10.2788/5523.
78. Freddi A., Olmi G., Cristofolini L. Experimental Stress Analysis for Materials and Structures: Stress Analysis Models for Developing Design Methodologies. Springer, 2015. 498 p.
 79. Fröling M. Strength Design Methods for Glass Structures. 2013. URL: <https://lup.lub.lu.se/search/ws/files/3905499/4076692.pdf> (Last accessed: 10.12.2019).
 80. Galuppi L., Manara G., Royer Carfagni G. Practical expressions for the design of laminated glass. *Composites Part B: Engineering*. 2013. Vol. 45, Iss. 1. P. 1677-1688. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.09.073.
 81. Galuppi L., Royer Carfagni G. The effective thickness of laminated glass plates. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2012. № 7. P. 375-400. DOI: 10.2140/jomms.2012.7.375.
 82. Galuppi L., Royer Carfagni G. The effective thickness of laminated glass: Inconsistency of the formulation in a proposal of EN-standards. *Composites Part B: Engineering*. 2013. Vol. 55. P. 109-118. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.05.025.
 83. Garg N.K. Guidelines for Use of Glass in Buildings. New Age International (P) Ltd Publishers, 2007. 154 p.
 84. Glass in Nature. URL: <http://www.cmog.org/article/glass-nature> (Last accessed: 10.12.2019).
 85. Glass Timeline. URL: http://www.tangram.co.uk/TI-Glazing-Glass_Timeline.html (Last accessed: 10.12.2019).
 86. Glass. URL: <http://www.chemistryexplained.com/Ge-Hy/Glass.html> (Last accessed: 10.12.2019).
 87. Goebel H. Laminated safety glass with densely cross-linked EVA-based interlayer load-bearing capability. *Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro*. 2013. №2, Vol.43. P. 22-25 URL: <http://www.spevetro.it/ArchivioRSSV/RSSV%202%202013.pdf> (Last accessed: 10.12.2019).

88. Gong J. Correlation between Weibull moduli for tensile and bending strength of brittle ceramics: A numerical simulation analysis based on a three-parameter Weibull distribution. *Journal of Materials Science*. 2003. Vol. 38, Iss. 11. P. 2541–2545. DOI: 10.1023/A:1023933908454.
89. Grand Canyon Skywalk – The Glass Bridge Fact Sheet. URL: <http://www.grandcanyonskywalk.com/wp-content/uploads/2012/02/Skywalk-Facts-2012.pdf> (Last accessed: 10.12.2019).
90. Grand Canyon Skywalk. URL: <https://girouxglass.com/grand-canyon-skywalk-turns-8/j-autumn-fashion-show-grand-canyon-skywalk-2/> (Last accessed: 10.12.2019).
91. Grand Canyon West Rim Visitor Guide. URL: <https://paradisefoundtours.com/guides/grand-canyon-west-rim-visitor-guide/> (Last accessed: 10.12.2019).
92. Haldimann M., Luible A., Overend M. Structural Use of Glass: Structural Engineering Document SED. International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). Zürich: Forthcoming, 2008. 215 p.
93. Headley M. The Willis Tower's Skydeck Opens Its All-Glass Ledge to Rave Reviews. *US Glass, Metal & Glazing*. 2009. Vol. 44, Iss. 10. P.41-45. URL: <https://www.usglassmag.com/digital/2009/October09.pdf> (Last accessed: 10.12.2019).
94. Heat Tempering vs. Heat Strengthening. URL: <http://abrisatechnologies.com/wp-content/uploads/2016/04/Heat-Temper-vs-Heat-Strengthening.pdf> (Last accessed: 10.12.2019).
95. Highest and longest glass bridge opens over China's Zhangjiajie Grand Canyon. URL: <http://edition.cnn.com/travel/article/china-glass-bridge-zhangjiajie/index.html> (Last accessed: 10.12.2019).
96. History - The London Crown Glass Company. URL: <http://londoncrownnglass.com/History.html> (Last accessed: 10.12.2019).
97. History of Glass. URL: http://www.johnsonwindowfilms.com/dealer/articleView.php?ARTICLE_ID=170 (Last accessed: 10.12.2019).

98. Hongyagu glass bridge, world's longest, opens in Hebei, China.
URL: <https://edition.cnn.com/travel/article/hongyagu-glass-bridge-hebei-china/index.html> (Last accessed: 10.12.2019).
99. Impactites: Impact Breccia, Tektites, Moldavites ... URL: <http://geology.com/meteorites/impactites.shtml> (Last accessed: 10.12.2019).
100. Ivanov I., Velchev D., Sadowski T., Kne'c M. Computational models of laminated glass plate under transverse static loading. *Shell-Like Structures: Advanced Structured Materials Vol. 15* / H. Altenbach, V. Eremeyev (eds.). Berlin: Springer, 2011. P. 469-490. DOI: 10.1007/978-3-642-21855-2_30.
101. Klein C.A. Characteristic strength, Weibull modulus, and failure probability of fused silica glass. *Optical Engineering*. 2009. Vol. 48, Iss. 11. Article № 113401. DOI: 10.1117/1.3265716.
102. Kooymans J. The Ledge Structural Glass Observation Boxes at the Willis (Sears) Tower. *Glass, Facade, Energy: Engineered Transparency - International Conference at glasstec*: Conference proceedings, Düsseldorf, Germany, 29-30 September 2010 / Schneider J., Weller B. (eds.). Dresden: Technische Universität, 2010. 8 p.
103. Kuntsche J.K. Mechanisches Verhalten von Verbundglas unter zeitabhängiger Belastung und Explosionsbeanspruchung: Mechanical behaviour of laminated glass under time-dependent and explosion loading. Springer-Verlag, 2015. 254 p.
104. Laminated glass strength and clarity reach new heights at Skydeck Chicago. URL: https://www.trosifol.com/fileadmin/user_upload/The_Ledge_Willis_Tower_English_neu.pdf (Last accessed: 10.12.2019).
105. Lenk P. Hybrid Glass Structures. *GPD Glass Performance Days 2017*: Conference proceedings, Tampere, Finland, 28-30 June 2017. P. 90-94. URL: http://www.gpd.fi/GPD2017_proceedings_book/GPD2017_conference_book.pdf (Last accessed: 10.12.2019).

106. Life Data Analysis Reference - Synthesis Platform. URL: http://www.synthesisplatform.net/references/Life_Data_Analysis_Reference.pdf (Last accessed: 10.12.2019).
107. Manufacturing - London Crown Glass. URL: <http://londoncrownnglass.com/Manufacturing.html> (Last accessed: 10.12.2019).
108. McCormick N., Lord J. Digital image correlation. *Materials Today*. 2010. Vol. 13, № 12. P. 52–54.
109. Meeker Jr.W.Q. , Nelson W. Weibull Variances and Confidence Limits by Maximum Likelihood for Singly Censored Data. *Technometrics*. 1977. Vol. 19, Iss. 4. P. 473-476.
110. Miljojković J., Bijelić I., Vranić N., Radovanović N.N., Živković M. Determining Elastic Modulus of the Material by Measuring the Deflection of the Beam Loaded in Bending. *Technical Gazette*. 2017. Vol. 24, № 4. P. 1227-1234. DOI: 10.17559/TV-20170609133537.
111. Molnar G., Vigh L., Stocker G., Dunai L. Finite element analysis of laminated structural glass plates with polyvinyl butyral (PVB) interlayer. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2012. № 56. P. 35-42. DOI: 10.3311/pp.ci.2012-1.04.
112. NASA Spacecraft Detects Impact Glass on Surface of Mars. URL: <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-spacecraft-detects-impact-glass-on-surface-of-mars> (Last accessed: 10.12.2019).
113. Natural glass. URL: <http://www.historymuseum.ca/cmc/exhibitions/hist/verre/venat01e.shtml> (Last accessed: 10.12.2019).
114. Newman Jr.J.C., Raju I.S. An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for Surface Crack. *Engineering Fracture Mechanics*. 1981. Vol 15, Iss.1-2. P.185-192. DOI: 10.1016/0013-7944(81)90116-8.
115. Nwobi F.N., Ugomma C.A. A comparison of methods for the estimation of weibull distribution parameters. *Metodološki zvezki*. 2014. Vol 11,

- Iss. 1. P. 65-78. URL: <https://stat-d.si/mz/mz11.1/Nwobi2014.pdf> (Last accessed: 10.12.2019).
116. O'Regan C. Structural Use of Glass in Buildings: 2nd edition. London: The Institution of Structural Engineers (IStructE Ltd), 2014. 108 p.
117. 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.
118. Palanca M., Tozzi G., Cristofolini L. The use of digital image correlation in the biomechanical area: a review. *International Biomechanics*. 2015. Vol. 3, №1. P. 1-21.
119. Pankhardt K. Load-bearing glass structures: Doctoral (PhD) Thesis / Budapest University of Technology and Economics. Budapest, 2010. 181 p. URL: <https://repozitorium.omikk.bme.hu/bitstream/handle/10890/1041/ertekezes.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Last accessed: 10.12.2019).
120. Pariafsai F. A review of design considerations in glass buildings. *Frontiers of Architectural Research*. 2016. Vol. 5, Iss. 2. P. 171-193. DOI: 10.1016/j.foar.2016.01.006.
121. prEN 16612:2013. Glass in building - Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing. European Committee for Standardization (CEN), 2013. 45 p.
122. prEN 16613:2013. Glass in building - Laminated glass and laminated safety glass - Determination of interlayer mechanical properties. European Committee for Standardization (CEN), 2013. 24 p.
123. Quinn G.D. NIST Recommended Practice Guide: Fractography of ceramics and glasses (Special Publication 960-16e2): 2nd ed. Washington, DC: National Institute of Standards and Technology, 2016. 640 p. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/specialpublications/NIST.SP.960-16e2.pdf> (Last accessed: 10.12.2019).

124. Quinn G.D., Quinn J.B. A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*. 2010. Vol. 26, No. 2. P. 135–147. DOI: 10.1016/j.dental.2009.09.006.
125. Reliability Life Data Analysis (Weibull Analysis) – Statistical Analysis Using the Weibull Model and Other Lifetime Distributions. URL: <https://www.weibull.com/basics/lifedata.htm> (Last accessed: 10.12.2019).
126. Rigby R., Stasinopoulos M., Heller G., De Bastiani F. Distributions for Modelling Location, Scale and Shape: Using GAMLSS in R. 2017. URL: <http://www.gamlss.com/wp-content/uploads/2018/01/DistributionsForModellingLocationScaleandShape.pdf> (Last accessed: 10.12.2019).
127. Sable L., Japins G., Kalnins K. Evaluation of Glass in Design of Load Bearing Structures. *Civil Engineering '13: 4th International Scientific Conference, Vol. 4: Proceedings*, 16-17 May 2013, Jelgava, Latvia, 2013. Latvia: Latvia University of Agriculture, 2013. P. 46-52. URL: https://llufb.llu.lv/conference/Civil_engineering/2013/partI/Latvia_CivilEngineering2013Vol4PartI.pdf (Last accessed: 10.12.2019).
128. Sable L., Skukis E., Japins G., Kalnins K. Correlation between Numerical and Experimental Tests of Laminated Glass Panels with Visco-elastic Interlayer. *Procedia Engineering*. 2017. № 172. P. 945-952. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.107.
129. Saint-Gobain - 350 reasons to believe in the future. URL: https://www.saint-gobain.com/sites/sgcom.master/files/sg-plaquette2015-en_02_a1a.pdf (Last accessed: 10.12.2019).
130. Salamin E. The Weibull distribution in the strength of glass. URL: <https://wp.optics.arizona.edu/optomech/wp-content/uploads/sites/53/2016/10/SalaminTutorial1.pdf> (Last accessed: 10.12.2019).

131. Savić J., Đurić-Mijović D., Bogdanović V. Architectural glass: types, performance and legislation. *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering*. 2013. Vol.11, No. 1. P. 35–45. DOI: 10.2298/FUACE1301035S.
132. Scholz F. Inference for the Weibull Distribution. 2008. URL: <https://www.stat.washington.edu/people/fritz/DATAFILES498B2008/WeibullBounds.pdf> (Last accessed: 10.12.2019).
133. Scholze H. Glass: Nature, Structure, and Properties. Springer Science & Business Media, 2012. 454 p.
134. Schula S., Schneider J., Vandebroek M., Belis J. Fracture strength of glass, engineering testing methods and estimation of characteristic values. *COST Action TU0905 Mid-term Conference on Structural Glass: Conference proceedings*, Poreč, Croatia, 18-19 April 2013 / J. Belis, C. Louter, D. Mocibob (eds.). London: Taylor & Francis Group, 2013. P.223-234.
135. Science Meets Nature High Above the Grand Canyon. URL: https://www.trosifol.com/fileadmin/user_upload/Grand_Canyon_Skywalk_English.neu.pdf (Last accessed: 10.12.2019).
136. Sedlacek G., Blank K., Laufs W. and GÜsgen J. Glas im Konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Ernst & Sohn, 1999. 220 p.
137. Spaceship Apple. URL: <https://www.popsci.com/apple-campus-spaceship-tour-making-of> (Last accessed: 10.12.2019).
138. Stevels W., D'Haene P., Zhang P., Haldeman S. Comparison of Different Methodologies for PVB Interlayer Modulus Characterization. *Challenging Glass Conference Proceedings*. 2016. Vol 5. P. 399-410. DOI: 10.7480/cgc.5.2266.
139. Structures Data Book: 1999 Edition. Cambridge University Engineering Department (CUED), 1999. 25 p.
140. Terrified tour guide freaks out and crawls on a glass-bottomed walkway after it suddenly 'cracks' under his feet. URL: <https://www.dailymail.co.uk/>

- news/article-4962060/Tour-guide-freaks-glass-walk-cracks.html (Last accessed: 10.12.2019).
141. The Float Process. URL: <https://www.pilkington.com/en-gb/uk/architects/glass-information/about-glass/the-float-process> (Last accessed: 10.12.2019).
 142. The Grand Canyon Skywalk. URL: <https://www.canyontours.com/guides/the-grand-canyon-skywalk/> (Last accessed: 10.12.2019).
 143. The Ledge at Skydeck Chicago. URL: https://www.som.com/projects/the_ledge_at_skydeck_chicago (Last accessed: 10.12.2019).
 144. Tribe opens Grand Canyon Skywalk. URL: http://www.nbcnews.com/id/17707007/ns/travel-destination_travel/t/tribe-opens-grand-canyon-skywalk/ (Last accessed: 10.12.2019).
 145. Veer F.A., Rodichev Y.M. The relation between pre-stress and failure stress in tempered glass. *Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference «Structural Glass-Novel design methods and next generation products»*: Conference proceedings, Lausanne, Switzerland, 6-7 February 2014 / C. Louter, F. Bos, J. Belis, J.P. Lebet (eds.). Leiden, Netherlands: CRC Press, 2014. P. 731-738.
 146. Verbund-Sicherheitsglas mit einer Verbundfolie der Produktfamilie EVASAFE mit Ansatz eines Schubverbundes: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-70.3-197. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2014. 12 s. URL: https://www.mepla.net/media/medien/dibt_abz_evasafe_schubverbund_valid_20190327_7315a.pdf (Last accessed: 10.12.2019).
 147. Watch Apple's new 'spaceship' campus get built in just one minute. URL: <https://www.vox.com/2017/5/26/15693756/watch-video-apple-spaceship-campus-apple-park-built-one-minute> (Last accessed: 10.12.2019).
 148. Weibull distribution. URL: <http://www.math.wm.edu/~leemis/chart/UDR/PDFs/Weibull.pdf> (Last accessed: 10.12.2019).

149. Willis Tower Ledge Facts and Information.
URL: <http://theskydeck.com/the-tower/facts-about-the-ledge/> (Last accessed: 10.12.2019).
150. Woinowsky-Krieger S. Über ein Verfahren zur Bestimmung der Biegemomente von Platten unter Einzellasten. *Ingenieur-Archiv (Archive of Applied Mechanics)*. 1955. Vol. 23, Iss. 5. P. 349-353.
151. World's longest glass bridge ready to open.
URL: <http://www.chinadaily.com.cn/a/201712/22/WS5a3c419fa31008cf16da2bd1.html> (Last accessed: 10.12.2019).
152. Zemanová A., Zeman J., Sejnoha M. Finite element model based on refined plate theories for laminated glass units. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2015. Vol.12, № 6. P. 1158-1181. DOI: 10.1590/1679-78251676.
153. Zhangjiajie Glass bridge, China. URL: https://www.trosifol.com/fileadmin/user_upload/laminated_news/Zhangjiajie_glass_bridge/Zhangjiajie_E_A4_low.pdf (Last accessed: 10.12.2019).

**Додаток А. Схема-алгоритм методики чисельно-аналітичного
моделювання та розрахунку скляних багат шарових плит на основі
механіки руйнування, методу скінченних елементів та концепції
ефективної товщини**

Схема-алгоритм аналізу:

I. Створення нового інженерного аналізу. Команда: ANSYS Workbench, вікно інструментів проекту «Toolbox» (зліва), розділ «Analysis Systems» > Модуль «Static Structural» → блок інженерного аналізу «Static Structural» у головному вікні проекту «Project Schematic» (справа). Структура інженерного аналізу представлена на рис. А.1.

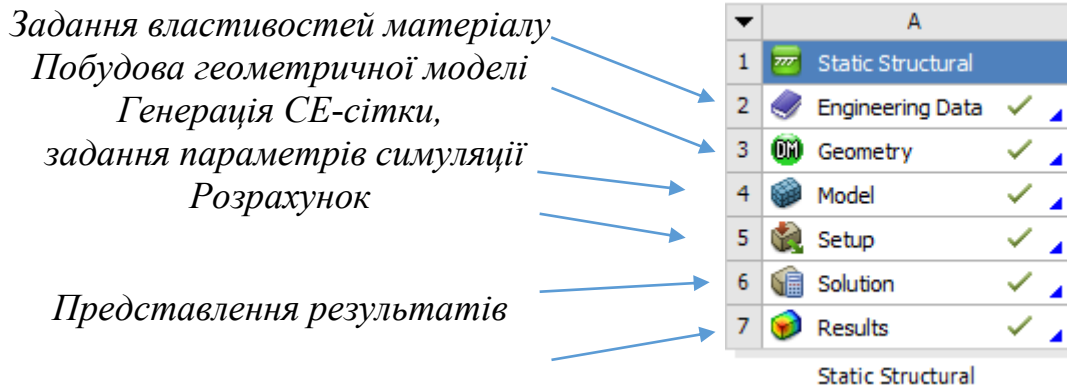


Рис. А.1. Елементи блоку інженерного аналізу «Static Structural»

II. Побудова геометричної моделі: Блок інженерного аналізу «Static Structural» (див. рис.А.1) > права кнопка миші у рядку «Geometry»: у контекстному меню обираємо «New Design Modeler Geometry» → додаток (модуль) «Design Modeler» (рис. А.2).

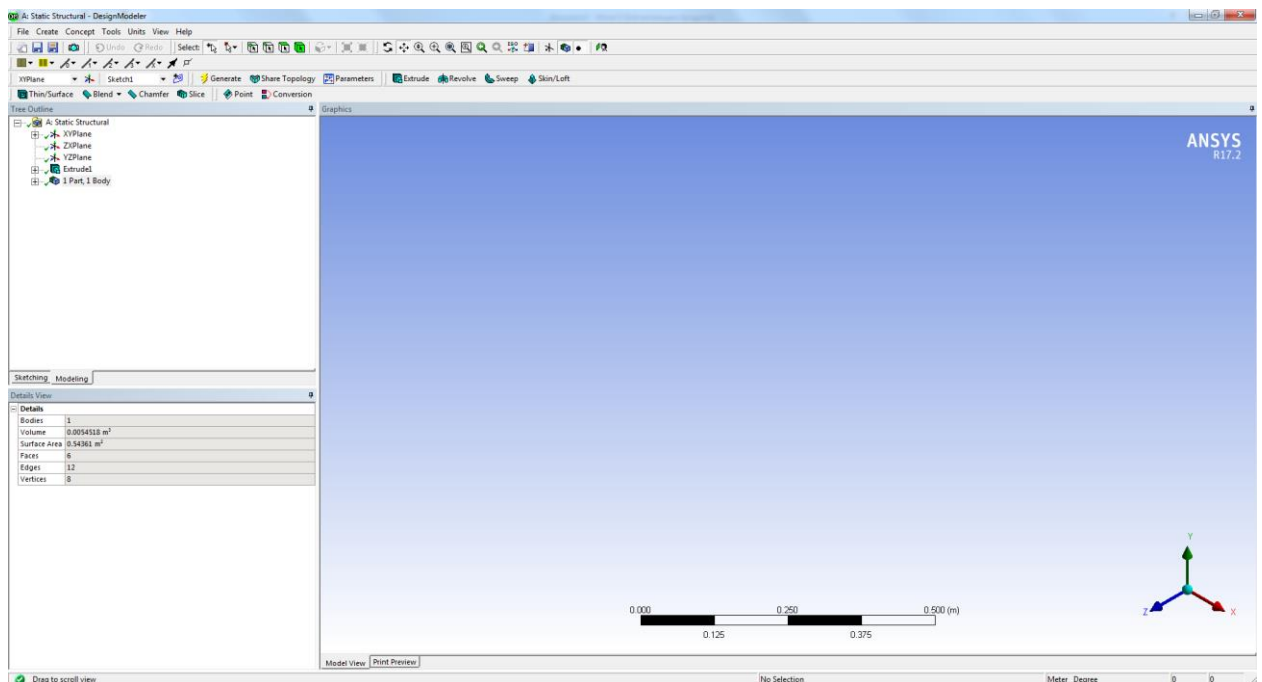


Рис. А.2. Графічний інтерфейс модуля геометричного моделювання «Design Modeler»

Створення ескізу геометричної моделі. Для створення ескізу обрали необхідну площину в дереві побудови «Tree Outline» та кнопку  («New Sketch») на панелі інструментів. В результаті отримали ескіз з іменем «Sketch 1», включений у дерево побудови, як об'єкт, що асоціюється з обраною площиною (рис.А.3). Вибір режиму «Рисування ескізу» обрали за допомогою вкладки «Sketching» внизу дерева побудови «Tree Outline». В режимі «Рисування ескізу» дерево побудови «Tree Outline» змінилося на вікно інструментів рисування ескізу «Sketching Toolboxes». Налаштування параметрів сітки для зручності рисування ескізу вказали у вкладці «Settings». Створення ескізу виконали за такою послідовністю: за допомогою інструментів рисування вкладки «Draw» та інструментів редагування вкладки «Modify» нарисували ескіз без врахування розмірів його елементів (рис.А.4); для створеного контура ескізу за допомогою інструменту «General» вкладки «Dimensions» призначили розміри, а у вікні «Details View» задали їх значення (рис.А.5, А.6). Для зручності перегляду розміри перенесли ближче до контура ескіза за допомогою інструмента «Move» вкладки «Dimensions» (рис.А.7).

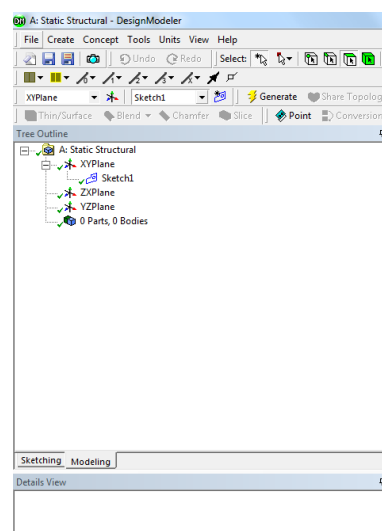


Рис. А.3. Створення нового ескізу (дерево побудови «Tree Outline»)

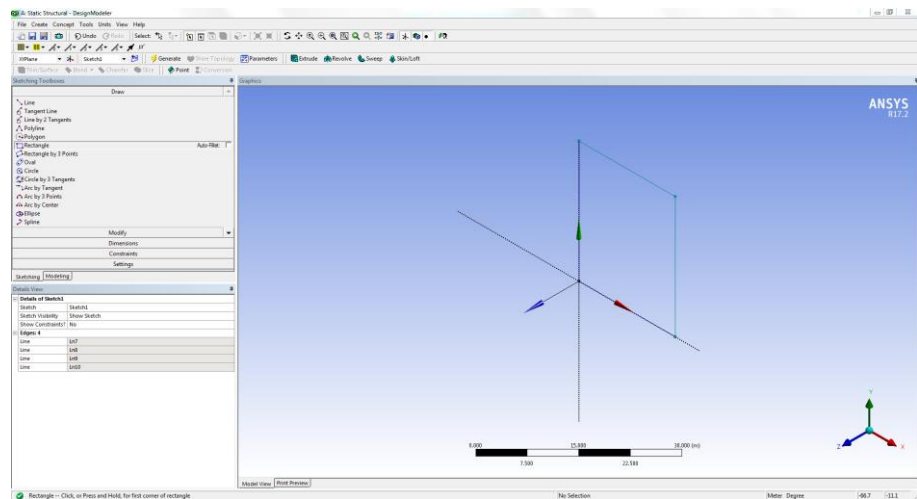


Рис. А.4. Рисування контура ескізу

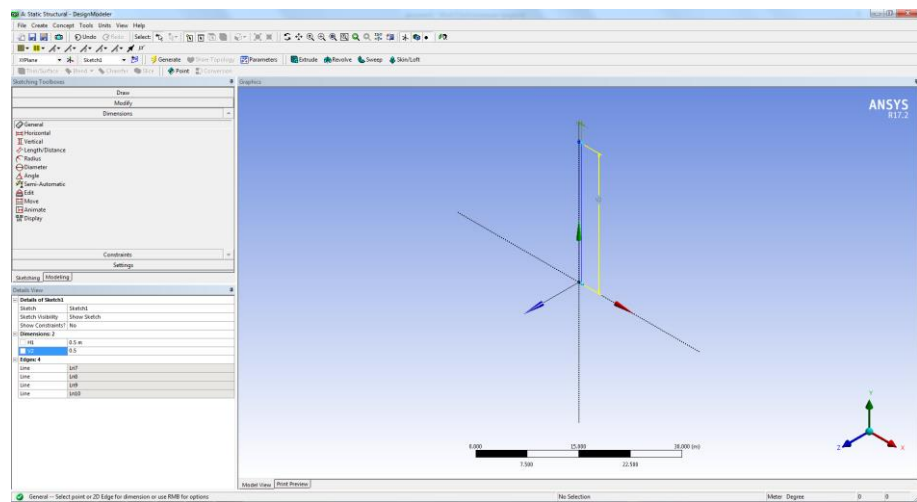


Рис. А.5. Задання розмірів контура ескізу

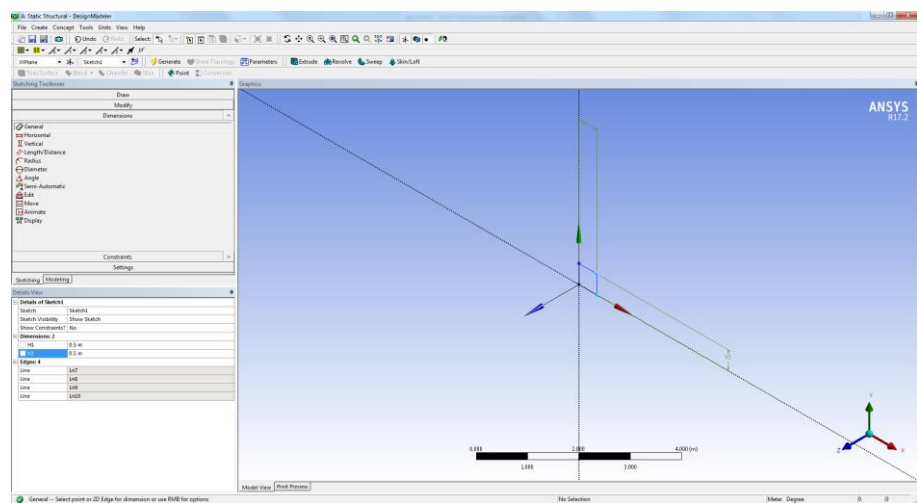


Рис. А.6. Результат оброзмірення ескізу

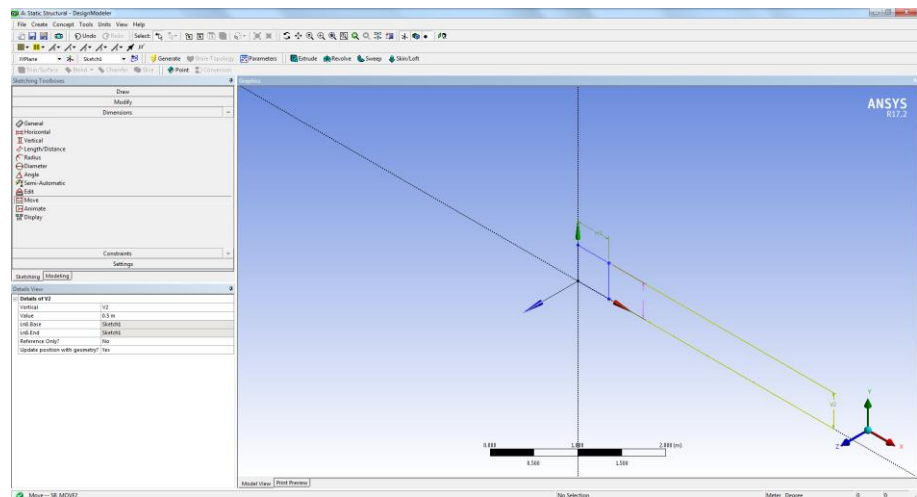


Рис. А.7. Перенесення розмірів для зручності читання ескізу (інструмент «Move» вкладки «Dimensions»)

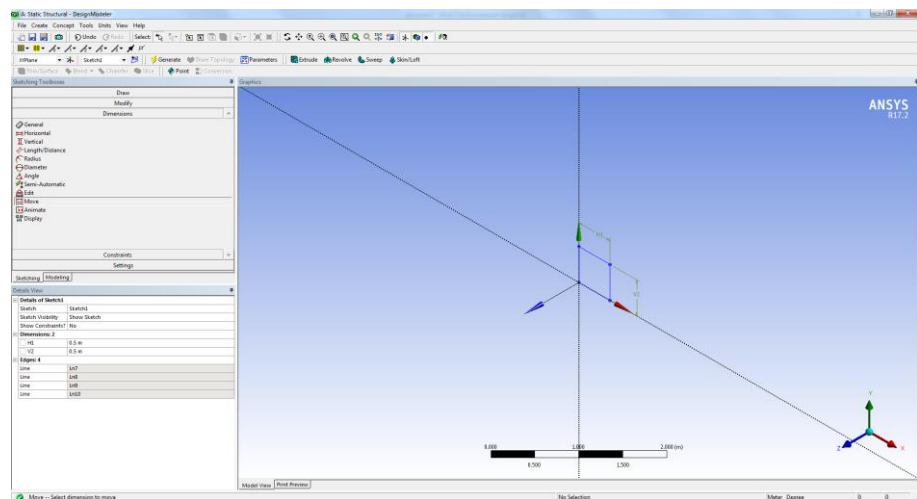
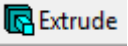
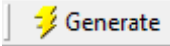


Рис. А.8. Вигляд робочого ескізу

Створення об'ємної моделі. Перехід в режим «Моделювання» – вкладка «Sketching» внизу дерева побудови «Tree Outline» > обираємо ескіз «Sketch 1» під обраною площиною в дереві побудови «Tree Outline» та кнопку  («Extrude») на панелі інструментів, вказуючи напрямок лінійного видавлювання > далі знову «Sketch 1» та у вікні «Details View» команди Extrude» (назва пункту «Details of Extrude 1») у рядку «Geometry» тиснемо «Apply» (рис.А.9). Глибину видавлювання (додатне значення) вказуємо у рядку «Depth» (рис.А.10, А.11). Створюємо об'ємну модель тіла – тиснемо  («Generate») на панелі інструментів (рис.А.12). Якщо базовий ескіз

містить одну точку, то в результаті отримують лінійне тіло (Line Body), якщо відрізок або незамкнений контур – то оболонку (Surface Body).

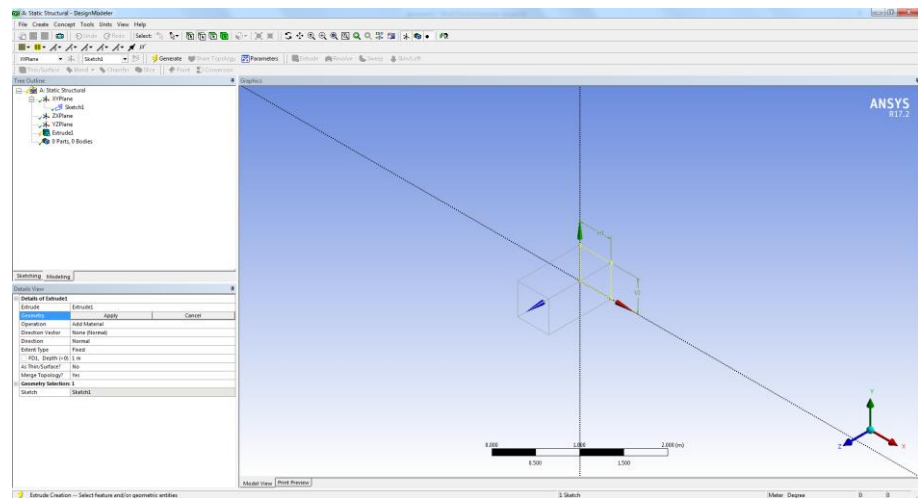


Рис. А.9. Видавлювання ескізу

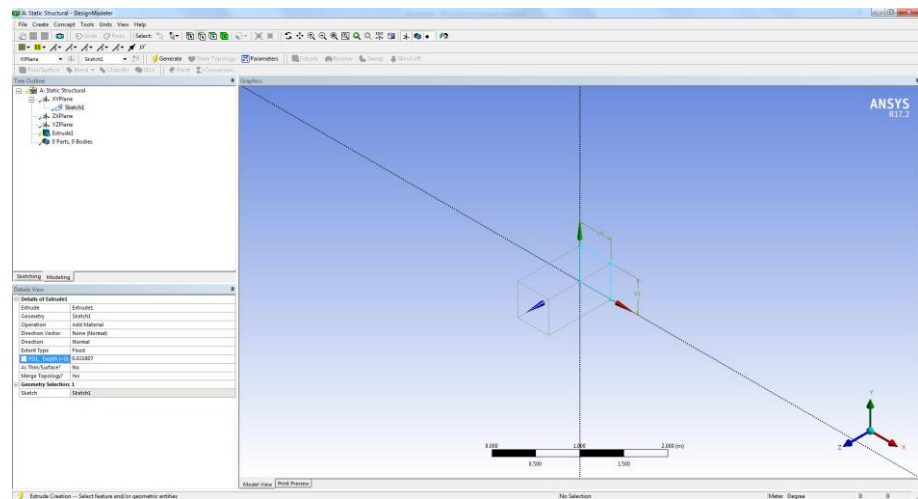


Рис. А.10. Задання глибини видавлювання

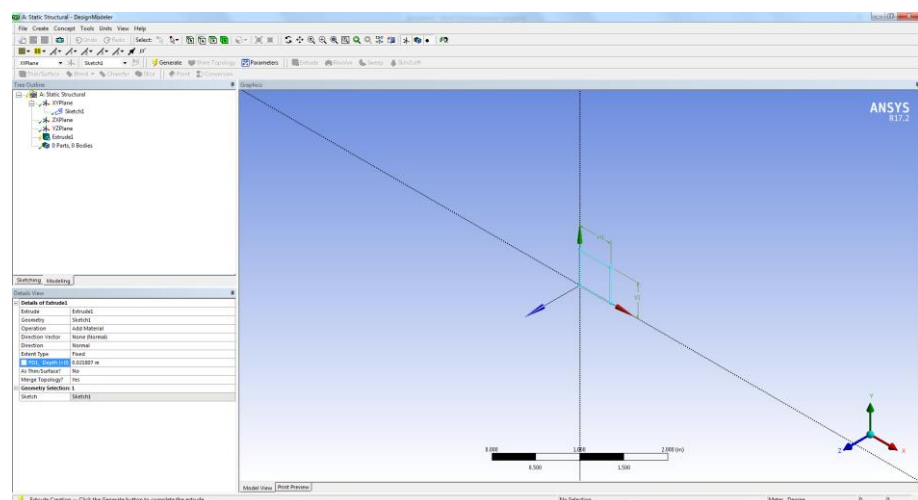


Рис. А.11. Результат лінійного видавлювання

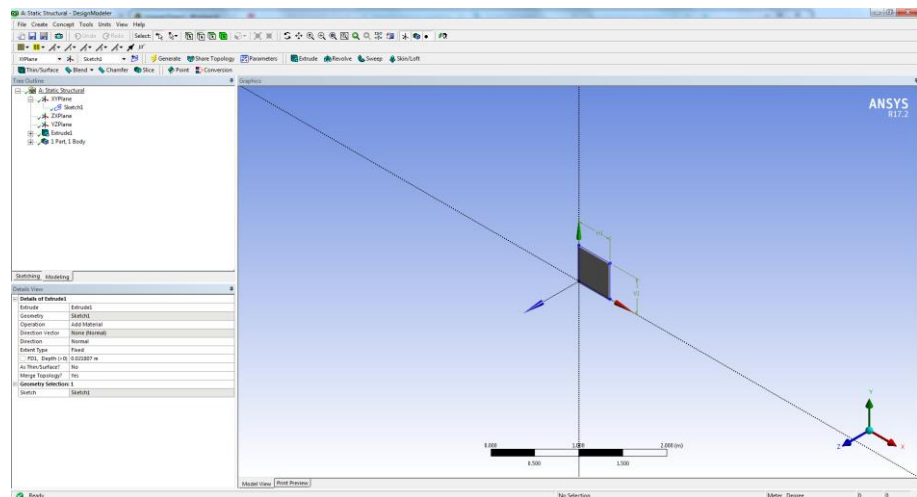


Рис. А.12. Об'ємна модель тіла

III. Генерація SE-сітки: Відкриваємо модуль симуляції «Mechanical» (рис.А.13): Блок інженерного аналізу «Static Structural» у вікні проекту «Project Schematic» > двічі тиснемо у рядку «Model».

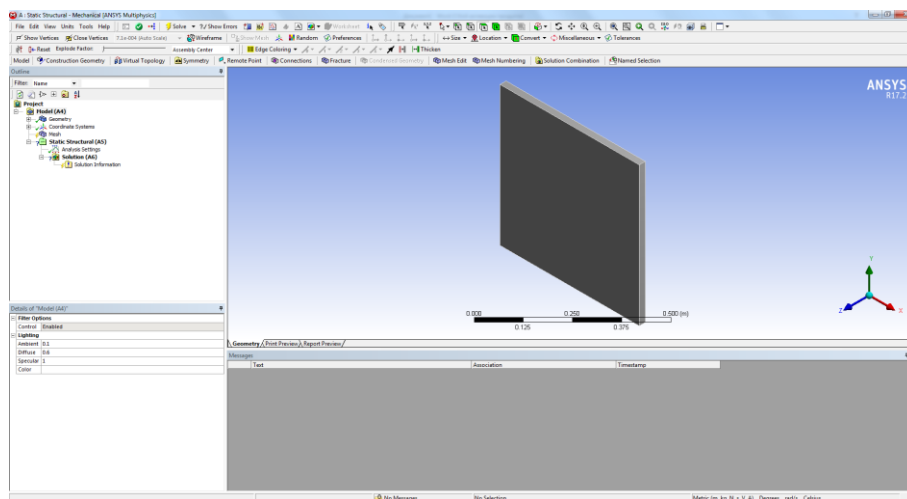
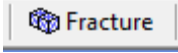
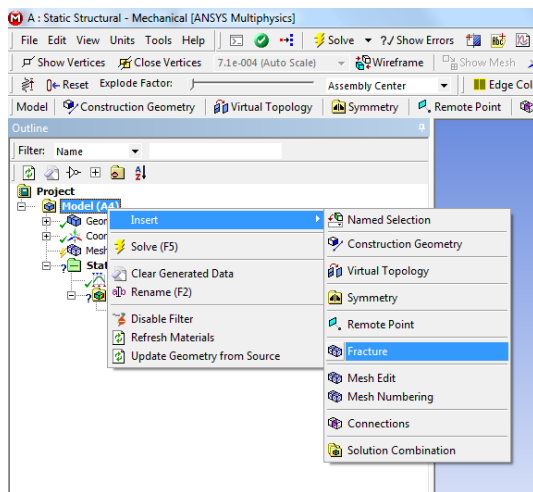
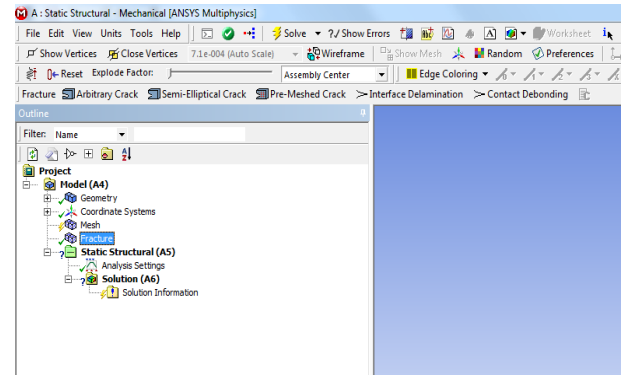


Рис. А.13. Модуль симуляції «Mechanical»

Виклик модуля «Fracture» (рис.А.14): Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > об'єкт «Model (A4)», права кнопка миші > Insert > модуль «Fracture» з контекстного меню. Альтернатива: кнопка  на панелі інструментів.



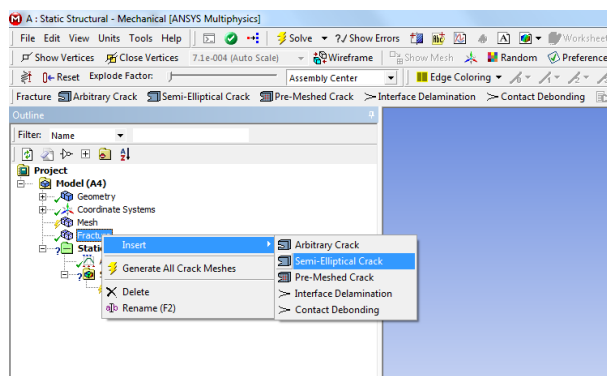
а)



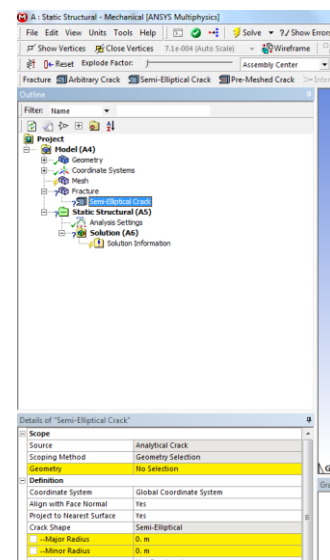
б)

Рис. А.14. Модуль «Fracture»: а) додання модуля;
б) розміщення в дереві проекту

Створення об'єкта «Semi-Elliptical Crack» (рис.А.15): Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > об'єкт «Model (A4)» > модуль «Fracture», права кнопка миші > Insert > об'єкт «Semi-Elliptical Crack» з контекстного меню. Альтернатива: кнопка  Semi-Elliptical Crack на панелі інструментів.



а)



б)

Рис. А.15. Об'єкт «Semi-Elliptical Crack»:
а) додання об'єкта; б) розміщення в дереві проекту

Вибір геометричного об'єкта для розташування тріщини: Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > об'єкт «Model (A4)» > модуль «Fracture» > об'єкт «Semi-Elliptical Crack» > кнопка  («Body») на панелі інструментів > у графічному вікні вказуємо тіло > у вікні «Details of Semi-Elliptical Crack» у рядку «Geometry» тиснемо «Apply».

Створення координатної системи для орієнтації центра напівеліптичної тріщини (рис. А.16): Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > об'єкт «Model (A4)» > список «Coordinate Systems» > кнопка  («Face») на панелі інструментів > у графічному вікні обираємо грань (поверхню) тіла, на якій розміщуватиметься тріщина > кнопка  («Create Coordinate System») на панелі інструментів.

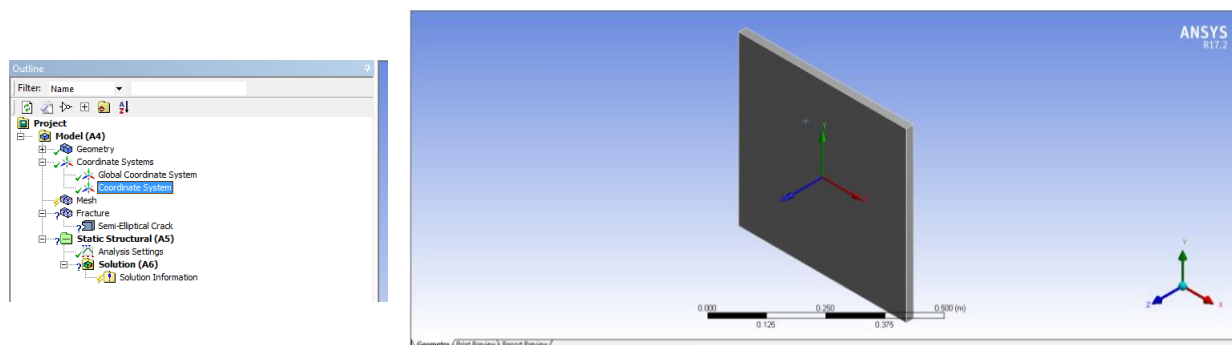


Рис. А.16. Координатна система для орієнтації центра напівеліптичної тріщини

Для того, щоб напрямок тріщини відповідав осі X, вісь Z була перпендикулярною до берегів тріщини, а сама тріщина розміщувалась всередині тіла, створену координатну вісь необхідно повернути навколо осі Y на 90^0 (рис. А.17): Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > об'єкт «Model (A4)» > список «Coordinate Systems» > створена координатна система (наприклад – «Coordinate System») > кнопка  («Rotate Y») на панелі інструментів > вікно «Details of Coordinate System», рядок «Rotate Y» → « 90^0 ».

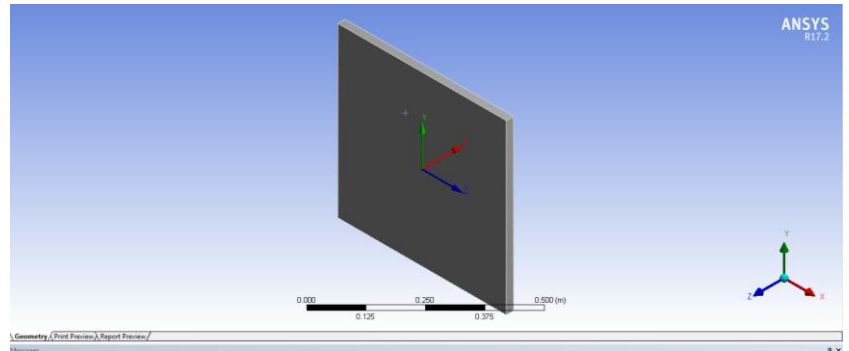
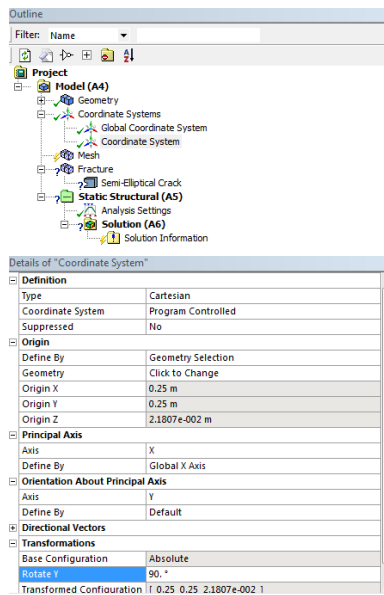


Рис. А.17. Редагування координатної системи для орієнтації центра напівеліптичної тріщини

Прив'язуємо створену координатну систему до тріщини (рис.А.18): Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > об'єкт «Model (A4)» > модуль «Fracture» > об'єкт «Semi-Elliptical Crack» > вікно «Details of Semi-Elliptical Crack», рядок «Coordinate System» → вибираємо по назві створену координатну систему (наприклад – «Coordinate System»).

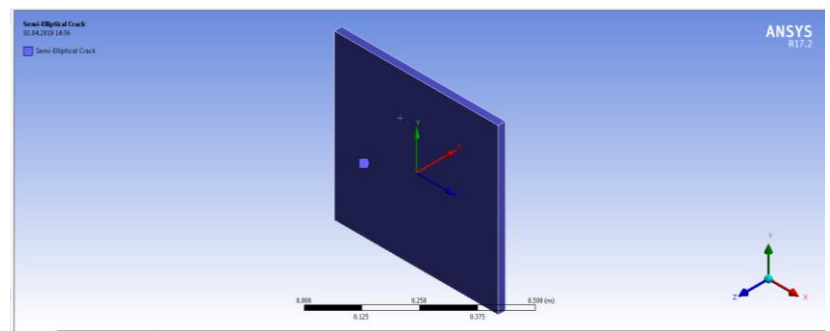
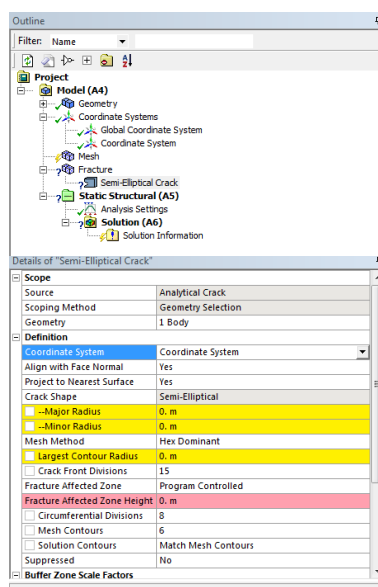


Рис. А.18. Прив'язка координатної системи для орієнтації центра напівеліптичної тріщини в об'єкті«Semi-Elliptical Crack»

Задаємо властивості тріщини: Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > об'єкт «Model (A4)» > модуль «Fracture» > об'єкт «Semi-Elliptical Crack» > вікно «Details of Semi-Elliptical Crack»:

- Major Radius (рис.А.19): розмір форми тріщини вздовж осі Z (ширина тріщини). Вказане значення повинне бути > 0 .
- Minor Radius (див. рис.А.19): розмір форми тріщини вздовж осі X (тобто глибина тріщини). Вказане значення повинне бути > 0 .

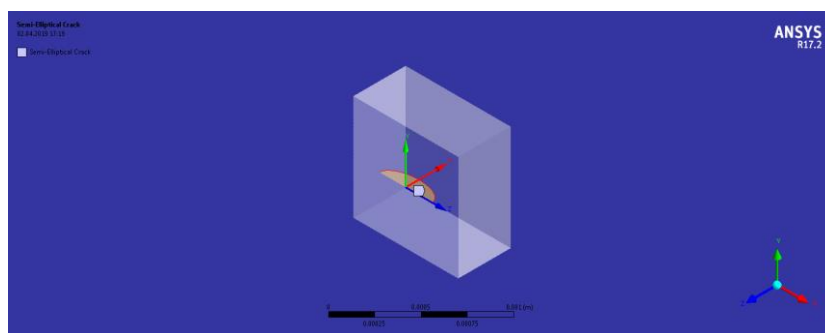
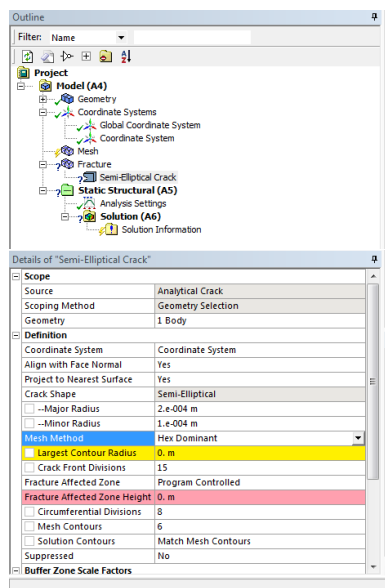


Рис. А.19. Геометричні параметри тріщини

• Рядок «Mesh Method» (рис.А.20): ця властивість дозволяє вибрати метод сітки, який буде використовуватися для напів-еліптичної тріщини. Серед варіантів: Гексаедри (Hex Dominant) (за замовчуванням) і Тетраедри (Tetrahedrons):

- Largest Contour Radius (див. рис.А.20): визначає найбільший радіус контуру для форми тріщини. Значення повинне бути > 0 .
- Crack Front Divisions (тільки якщо «Mesh Method» встановлений на «Hex Dominant») (див. рис.А.20): визначає кількість поділок для фронту тріщини. Значення повинне бути рівним або більшим, ніж 3. Значення за замовчуванням - 15. Вікно геометрії може відображати лише максимум 999 фронтів підрозділів, хоча можна вказати більш високе значення, яке враховуватиметься під час розрахунку.

Details of "Semi-Elliptical Crack"	
Scope	
Source	Analytical Crack
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Coordinate System	Coordinate System
Align with Face Normal	Yes
Project to Nearest Surface	Yes
Crack Shape	Semi-Elliptical
--Major Radius	2.e-004 m
--Minor Radius	1.e-004 m
Mesh Method	Hex Dominant
Largest Contour Radius	5.e-005 m
Crack Front Divisions	15
Fracture Affected Zone	Program Controlled
Fracture Affected Zone Height	1.3007e-004 m
Circumferential Divisions	8
Mesh Contours	6
Solution Contours	Match Mesh Contours
Suppressed	No
Buffer Zone Scale Factors	
X Scale Factor	2.
Y Scale Factor	2.
Z Scale Factor	2.
Named Selections Creation	
Crack Front Nodes	NS_SECrack_Front
Crack Faces Nodes	Off
Contact Pairs Nodes	Off

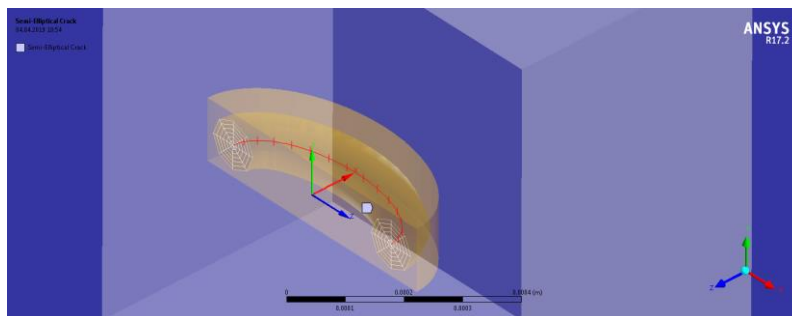


Рис. А.20. Параметри сітки СЕ та перехідної зони тріщини

Таблиця А.1.

Параметри об'єкта «Semi-Elliptical Crack»
(витяг із звіту у ANSYS Workbench)

Model (A4) > Fracture > Semi-Elliptical Crack

Object Name	<i>Semi-Elliptical Crack</i>
State	Fully Defined
Scope	
Source	Analytical Crack
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Coordinate System	Coordinate System
Align with Face Normal	Yes
Project to Nearest Surface	Yes
Crack Shape	Semi-Elliptical
--Major Radius	2.e-004 m
--Minor Radius	1.e-004 m
Mesh Method	Hex Dominant
Largest Contour Radius	5.e-005 m
Crack Front Divisions	15
Fracture Affected Zone	Program Controlled
Fracture Affected Zone Height	1.3007e-004 m
Circumferential Divisions	8
Mesh Contours	6
Solution Contours	Match Mesh Contours
Suppressed	No
Buffer Zone Scale Factors	
X Scale Factor	2.
Y Scale Factor	2.
Z Scale Factor	2.
Named Selections Creation	
Crack Front Nodes	NS_SECrack_Front
Crack Faces Nodes	Off
Contact Pairs Nodes	Off

Задаємо метод для сітки СЕ тіла (рис.А.21): Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > об'єкт «Model (A4)» > модуль «Mesh», права кнопка миші > Insert > об'єкт «Method» з контекстного меню > кнопка  («Body») на панелі інструментів > у графічному вікні вказуємо тіло > у вікні «Details of Automatic Method» у рядку «Geometry» тиснемо «Apply» (рис.А.21, а) > у рядку «Method» вказуємо «Тетраедри» («Tetrahedrons») > вікно «Details of Automatic Method» стає «Details of Patch Conforming method» (рис.А.21, б).

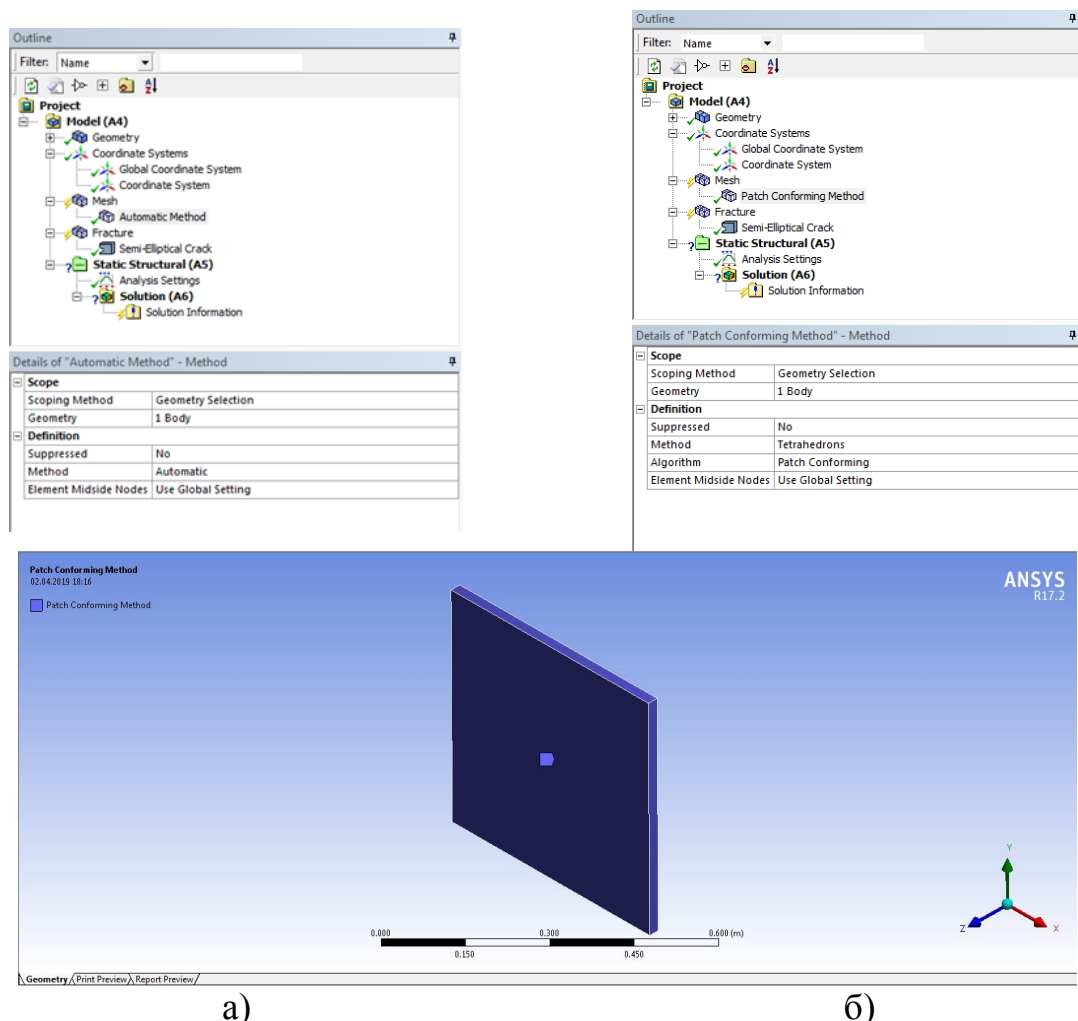


Рис. А.21. Вибір методу для сітки СЕ тіла: а) вибір геометричного об'єкта;
б) вибір методу сітки СЕ

Задаємо розмір для сітки СЕ тіла (рис.А.22): Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > об'єкт «Model

(A4)) > модуль «Mesh», права кнопка миші > Insert > об'єкт «Size» з контекстного меню > кнопка  («Body») на панелі інструментів > у графічному вікні вказуємо тіло > у вікні «Details of Sizing» у рядку «Geometry» тиснемо «Apply» > вікно «Details of Sizing» стає «Details of Body Sizing», у рядку «Element Size» вказуємо розмір сітки.

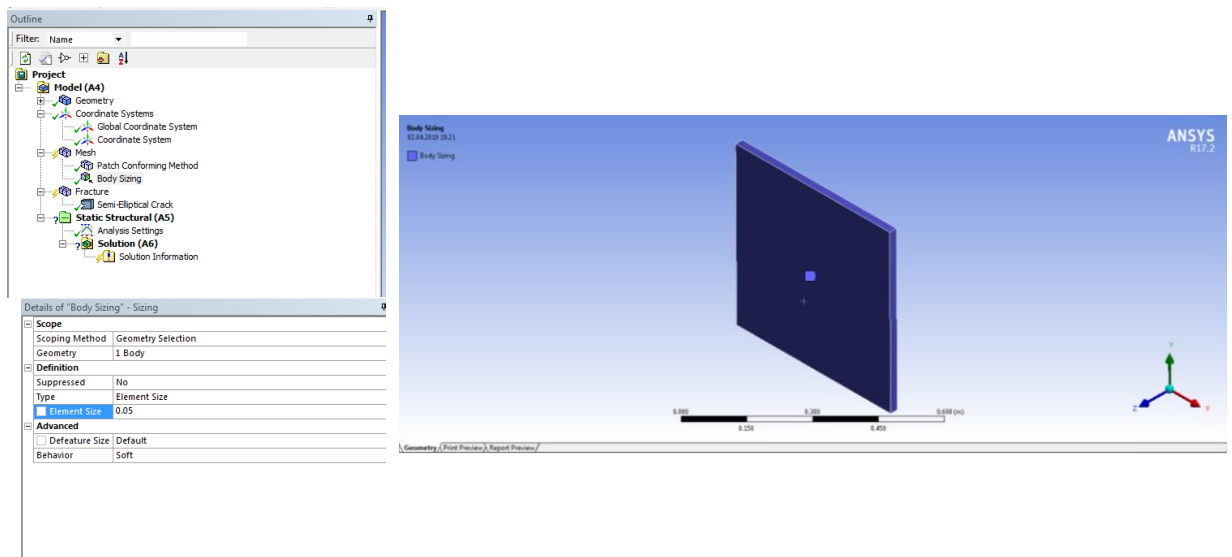


Рис. А.22. Задання розміру сітки СЕ тіла: а) вибір геометричного об'єкта;
б) задання розміру сітки СЕ

Генеруємо сітку СЕ для тіла (рис.А.23): Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > об'єкт «Model (A4)» > модуль «Mesh», права кнопка миші > «Generate Mesh» з контекстного меню.

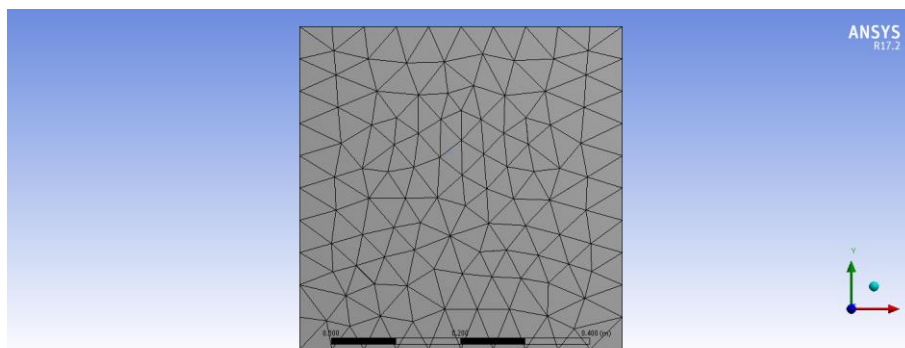


Рис. А.23. Сітка СЕ тіла

Вставляємо область тріщини у сітку SE тіла (рис.А.24): Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > об'єкт «Model (A4)» > модуль «Fracture» > права кнопка миші > «Generate All Crack Meshes» з контекстного меню.

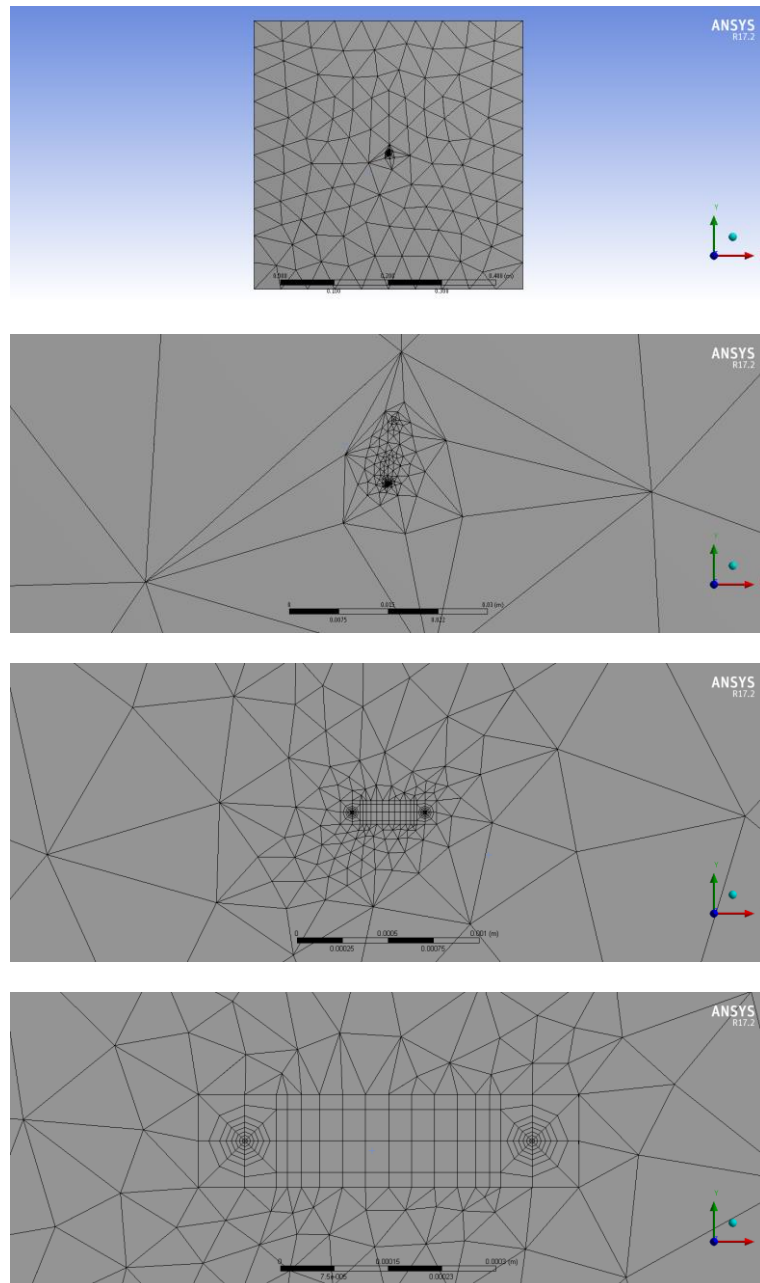


Рис. А.24. Сітка SE із вставленою областю тріщини

Відзначаємо вузол на сітці SE для задання вузлового навантаження (рис.А.25): кнопка  («Node») на панелі інструментів > у графічному вікні вказуємо на вузол по центру верхньої грані (поверхні) тіла, права кнопка миші

> «Create Named Selection» з контекстного меню > діалогове вікно «Selection Name», вказуємо ім'я (наприклад – «force node (tope surface)») (рис.А.25, а) > ОК (рис.А.25, б).

Іменовані набори (Named Selection) дозволяють присвоєння імен окремим елементам моделі для подальшого визначення граничних умов.

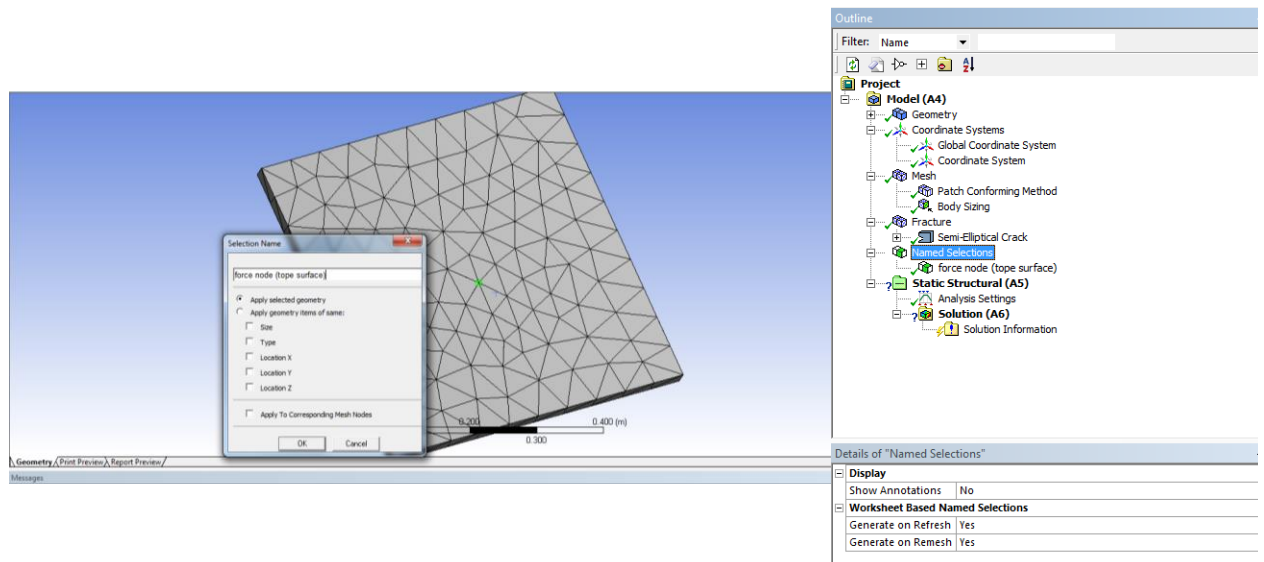


Рис. А.25. Іменованій набір визначеного вузла для вузлового навантаження: а) задання іменованого набору;
б) розміщення у дереві проекту

Задаємо вузлове навантаження (рис.А.26): Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > об'єкт «Static Structural (A5)», права кнопка миші > Insert > об'єкт «Nodal Force» з контекстного меню > у вікні «Details of Nodal Force» у рядку «Named Selection» обираємо «force node (tope surface)», у рядку «Z component» вказуємо величину навантаження.

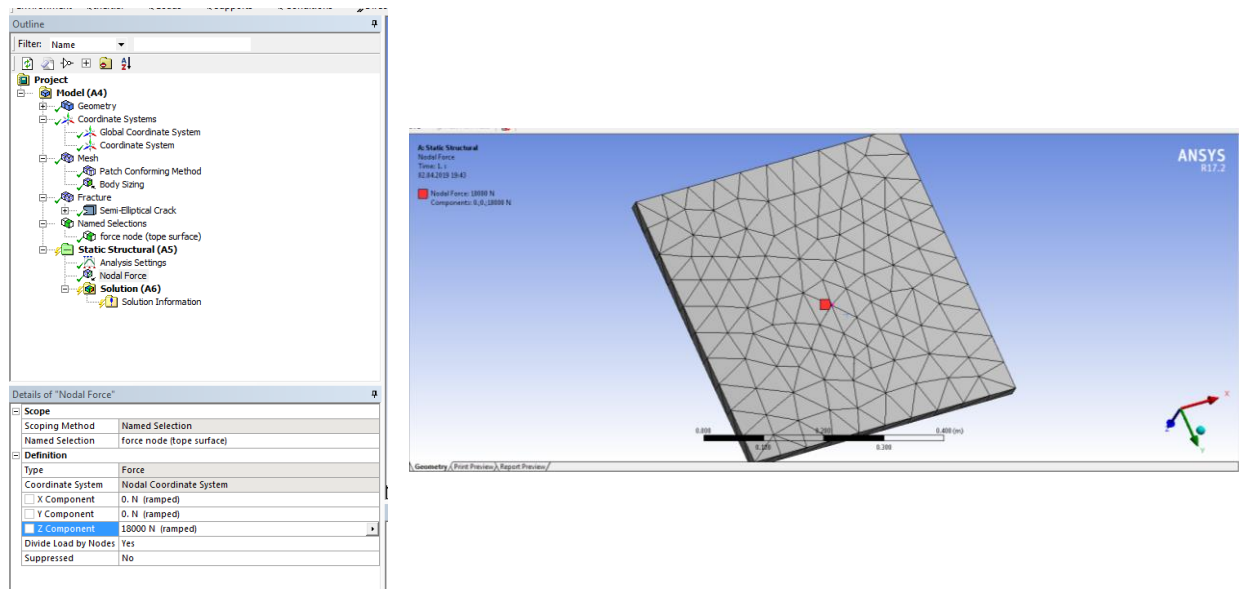


Рис. А.26. Задання вузлового навантаження

Задаємо шарнірне опирання у кутовому вузлі (рис.А.27): Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > об'єкт «Static Structural (A5)», права кнопка миші > Insert > об'єкт «Переміщення з поворотом» («Remote Displacement») з контекстного меню > кнопка  («Vertex») на панелі інструментів > у графічному вікні вказуємо на вершину у куті нижньої грані (поверхні) тіла > у вікні «Details of Remote Displacement» у рядку «Geometry» тиснемо «Apply», у рядках «X component»...«Z component» вказуємо «0» (закріплення елемента у відповідному напрямку), у рядках «Rotation X» ... «Rotation Z» – «Free» (вільний рух елемента у вказаному напрямку).

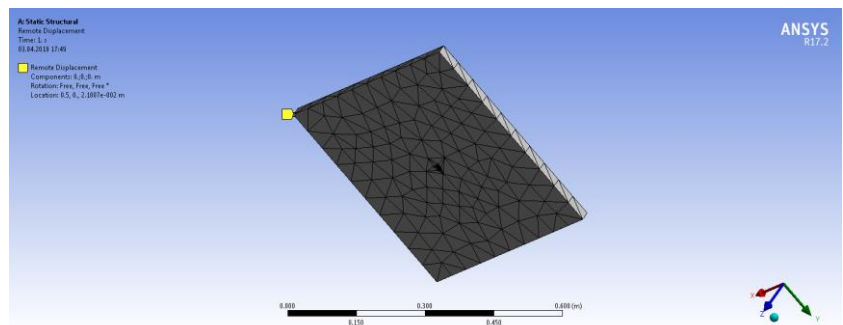
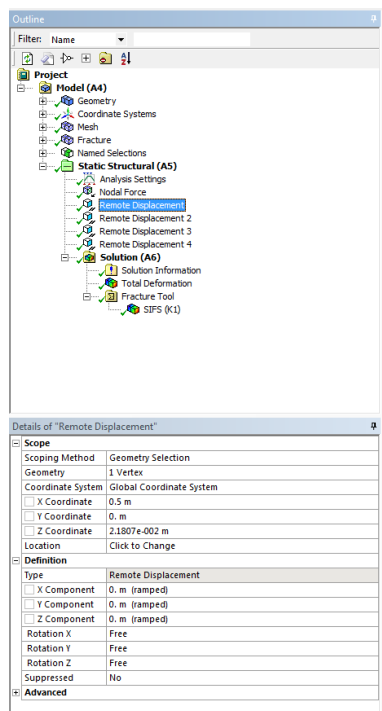


Рис. А.27. Задання шарнірного опирання у кутовому вузлі (вершині)

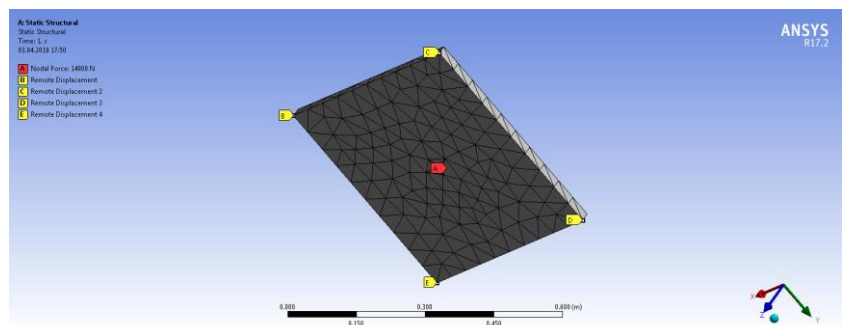
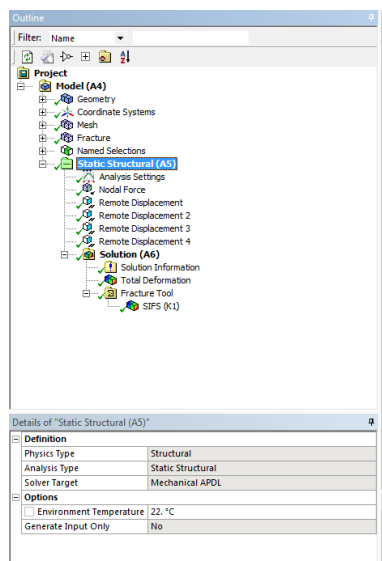


Рис. А.28. Розрахункова схема плити

Додаємо у список майбутніх результатів:

- повні переміщення (рис. А.29, а): Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > дерево проекту «Project» > «Solution (A6)», права кнопка миші > Insert > «Деформації» («Deformation») з контекстного меню > об'єкт «Повні» («Total») з контекстного меню.

- Інструмент «Fracture Tool» (рис.А.29, б): Модуль симуляції «Mechanical» > дерево проекту «Project» > вікно «Outline» > «Solution (A6)», права кнопка миші > Insert > «Fracture Tool» з контекстного меню > вікно «Details of Fracture Tool»: рядок «Crack Selection» – обираємо «Semi-Elliptical Crack».
- Коефіцієнт інтенсивності напружень (рис.А.29, в): Модуль симуляції «Mechanical» > дерево проекту «Project» > вікно «Outline» > «Solution (A6)» > «Fracture Tool», права кнопка миші > Insert > «SIFS Results» з контекстного меню > SIFS (K1) з контекстного меню.

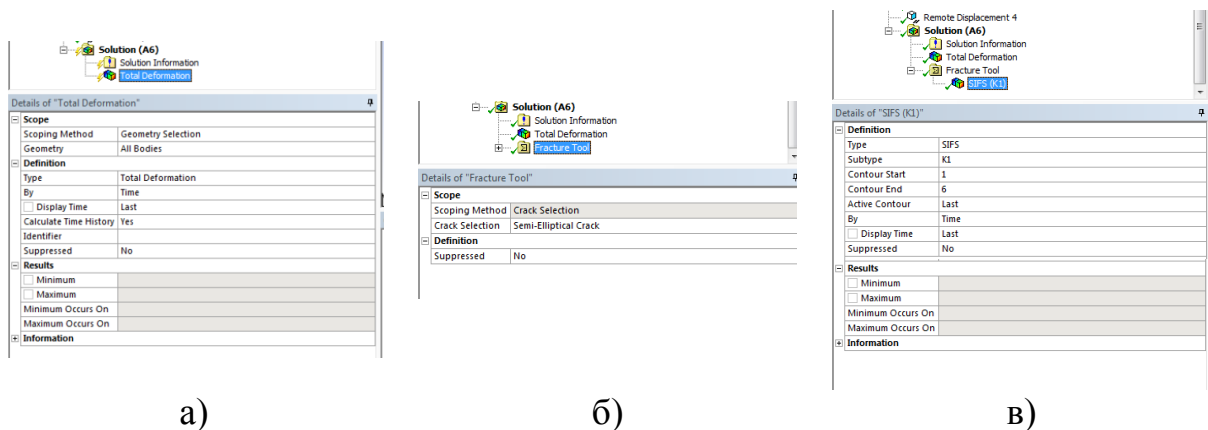


Рис. А.29. Вибір результатів розрахунку:

- а) повні переміщення; б) Інструмент «Fracture Tool»;
в) коефіцієнт інтенсивності напружень

Перегляд результатів розрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень активується вибором об'єкта «SIFS (K1)» з набору об'єктів «Fracture Tool» у постпроцесорі «Solution (A6)»: Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > «Solution (A6)» > «Fracture Tool» > «SIFS Results» > SIFS (K1).

Інформація про СЕ доступна при виконанні наступних команд:

- перегляд ID та заданого методу для вибраного елемента: кнопка  «Selection Information» на панелі інструментів > у графічному вікні вказуємо СЕ > вікно «Selection Information» (зліва) – стовпчики «Element ID» і «Element type», відповідно.

- перегляд автоматично призначених в ANSYS Workbench типів елементів: Модуль симуляції «Mechanical» > вікно «Outline» > «Static Structural (A5)» > Solution Information > вкладка «Worksheet» графічного вікна > таблиця «ELEMENT MATRIX FORMULATION TIMES», стовпець «ENAME».

Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



**Товариство з обмеженою відповідальністю
«Торгово-виробнича компанія «РАДО»**

Україна, 79021, м. Львів, вул. Кульпарківська, 93
п/р 26005000026967 в Львівська філія АТ «Укресімбанк», МФО 322313
ЄДРПОУ 35009929, Свідоцтво пл. ПДВ № 200110152 від 11.02.2013р.
Інд. под. №350099213050

тел./факс (032) 295-67-75/76 e-mail: tvkrado@i.ua www.tvk-rado.com.ua

Вих. №0308/01
від 03.08.2018р.

**Акт
впровадження результатів дисертаційної роботи**

Результати дисертаційного дослідження Осадчука Тараса Юрійовича за темою «Міцність та деформативність скляних багатошарових плит» були впроваджені в практичну діяльність Торгово-Виробничої Компанії «Радо». Основні положення роботи сприяли підвищенню економічності при варіантному проектуванні та дозволили вдосконалити процес проектування скляних конструкцій.

Зокрема, згідно завдання на проектування, виданого ТзОВ ТВК «Радо», виконано розрахунок та запроектовано скляні багатошарові плити для влаштування конструкцій сходів. Були запроектовані сходи з розмірами 0.300 м (ширина перерізу сходинки), $h = 0.030$ м (висота перерізу сходинки: скло звичайне - 10 мм × 3шт.; 2-шарова плівка типу EVASAFE × 2шт), $l = 1.000$ м (довжина сходинки). Застосування запропонованої автором методики розрахунку дозволило зменшити витрати матеріалів, а саме скла та полімерної плівки на одних сходах до 5,5 тис. грн. Окрім цього, сходи отримали оригінальну архітектурну форму.

Директор ТзОВ ТВК «РАДО»



Дац А.З.

**Рис. Б.1. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи
у ТзОВ ТВК «Радо»**

NEW GLASS



Товариство з обмеженою відповідальністю

«НЮ ГЛАС»

79495, Львівська обл., м. Львів, м. Винники, вул. Любич-Парахоняк, б.17, кв.73

п/р 26009011083083 у ПАТ «КРЕДОБАНК», МФО 325365

ЄДРПОУ 41761004, ІПН № 417610013067

+38 (066) 452-77-79, +38 (068) 07-77-195

e-mail: volodymyr17@gmail.com

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційного дослідження Осадчука Тараса Юрійовича «Міцність та деформативність скляних багатошарових плит» були використані під час проектування скляної багатошарової підлоги 1-го поверху виставкового залу адміністративно-побутового корпусу ТОВ «Швидкий світ» на вул. Конюшинній, 4 в м. Львові.

Було виконано розрахунки та конструювання шістьох скляних тришарових плит з окремих секцій 1м×1м – двох фрагментів підлоги розмірами по 2м×3м під корисне навантаження 4 кН/м² (рис. 1.)

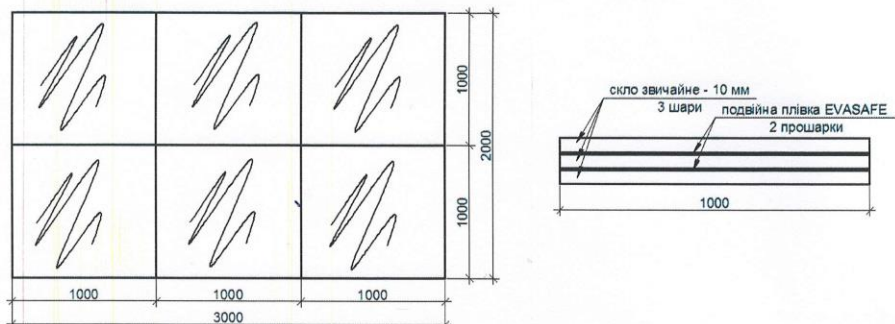


Рис. 1. Схема запроєктованої скляної багатошарової підлоги

В розрахунках було використано чисельно-аналітичний метод на основі концепції ефективної товщини (prEN 16612: 2013) та нелінійного розрахунку за допомогою МСЕ (ЛІРА-САПР). Це принесло суттєвий економічний ефект (зменшення вартості скляних фрагментів підлоги на 20%) у порівнянні із існуючими традиційними конструктивними рішеннями, згідно з якими рекомендована товщина скла повинна була становити 12-15мм.

Директор ТЗОВ «New Glass»



Лучкевич В.В.

Рис. Б.2. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи
у ТЗОВ «Ню Глас» (ТЗОВ «New Glass»)

ФІЗИЧНА ОСОБА-ПІДПРИЄМЕЦЬ
ПЕЛЕХ АНДРІЙ БОГДАНОВИЧ
80100, Львівська область, м. Червоноград, вул. Сокальська, 18/159
р/р 26001260706 в АТ "Райффайзен Банк Аваль", м.Київ
МФО 380805, ЄДРПОУ 2829604776
Тел.: (097) 947-27-86, e-mail:andriypele@gmail.com

№ 14/07/2019

Від "14" липня 2019 р.

ДОВІДКА
про впровадження результатів

щодо використання скляних конструкцій
при проектуванні готельного комплексу
в с. Поляниця Івано-Франківської обл.

При проектуванні житлового комплексу готельного типу в ур. Вишні, с. Поляниця Івано-Франківської області, для влаштування стінки консольного басейну була застосована багатошарова скляна плита, розміром 10,5х1,75 м, товщиною 140 мм. Рішення щодо розрахунку та проектування даної конструкції було прийнято за результатами дисертаційного дослідження Тараса Юрійовича Осадчука "Міцність та деформативність скляних багатошарових плит", а саме використана теорія розрахунку багатошарових скляних плит.

За результатами запропонованих рішень було запроектовано скляну конструкцію стінки консольного басейну, що дозволяє реалізувати концепцію басейну із скляним бортом запропоновану архітекторами.

З повагою,



Пелех А.Б.

Рис. Б.3. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи
у ФОП Пелех А.Б.

**Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості
про апробацію результатів 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).

Відомості про апробацію 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.).