

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ГУЛА ВАСИЛИНА ОЛЕГІВНА

УКД 624.012.616.6

ДИСЕРТАЦІЯ

**НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ, ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ
СКЛЯНИХ ПЛИТ ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ НА ЗГИН**

Спеціальність 192 – будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань 19 – архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ В. О. Гула

Науковий керівник Демчина Богдан Григорович, доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Гула В.О. Тема дисертації: «Несуча здатність, деформативність та довговічність скляних плит які працюють на згин». Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – будівництво та цивільна інженерія. Галузі знань 19 – архітектура та будівництво – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2023.

Дисертація присвячена експериментальним та теоретичним дослідженням несучої здатності, деформативності та довговічності скляних плит в лабораторних умовах. Дослідні зразки відрізнялися розміром та кількістю шарів скла відповідно до серії зразків та розробленої методики експериментальних досліджень. Методика випробування скляних плит для визначення несучої здатності та деформативності полягала у випробуванні скляних плит з різною кількістю шарів скла, які були оперті по чотирьох кутах та працювали на згин від зосередженого навантаження штампом. Розроблено методику випробування скляних балочних плит на довговічність, згідно якої скляні балочні плити працювали як шарнірно оперті однопролітні балки, навантажені статичним вантажем протягом певного періоду часу. Також було досліджено фізико-механічні характеристики скла з тієї ж партії з якої було виготовлено всі дослідні зразки. Під час проведення експериментальних випробувань скляних плит, було використано та удосконалено сучасний оптичний метод кореляції цифрових зображень для заміру деформацій на поверхні скляних плит. В результаті проведених наукових досліджень було розроблено методику розрахунку скляних плит з різною кількістю шарів скла що працюють на згин, а також рекомендації щодо їх проектування які були застосовані на реальних об'єктах.

У першому розділі проведено огляд наукових джерел за темою дисертаційного дослідження. Подано існуючий стан досліджень та проектування скляних плит, а також проаналізовано існуючі методики розрахунку зокрема довговічності на основі лінійно-пружної механіки руйнування. В результаті проведеного огляду літератури було вибрано основні напрямки та сформовано

завдання наукового дослідження несучої здатності, деформативності та довговічності скляних плит які працюють на згин.

Скло, як природній матеріал, відоме людству більше 75 тисяч років. Однак стародавнє скло зазвичай було кольоровим і непрозорим через наявність в ньому різних домішок, тоді як майже все сучасне скло має корисну властивість – прозорість. В 19 столітті було удосконалено та механізовано технологію виготовлення листового скла, що значно збільшило швидкість виробництва скляних виробів та знизило їх вартість. У 1959 році компанія Pilkington Glass Works у Великобританії запровадила технологію виготовлення флоат-скла, яке і зараз виготовляється за цією технологією і є найбільш поширеним видом скла. Флоат-скло має однакову товщину без спотворень та хвиль, а його поверхню не потрібно додатково шліфувати чи полірувати.

Основним недоліком використання звичайного скла є крихка природа його руйнування, тобто воно руйнується миттєво. Для плитних конструкцій проблема крихкого руйнування може бути вирішена виготовленням багатошарових скляних плит з триплексованого скла. Триплексоване скло — це комбінація двох або більше органічних чи силікатних скляних шарів, з'єднаних проміжним шаром з полімерної плівки під дією температури. Полімерна плівка стримує частинки уламків скла під час руйнування, таким чином конструкція з триплексу є більш надійна та не руйнується раптово. В даному дисертаційному дослідженні було випробувано одношарові та багатошарові плити виготовлені зі звичайного флоат-скла шляхом триплексації.

Несуча здатність скла характеризується значною мінливістю, що в основному залежить від стану його поверхні. Однак, для застосування скла в несучих конструкціях необхідно мати гарантоване значення несучої здатності скляних конструкцій. Тому, крім експериментального визначення міцності скла на згин, актуальним є виконання перевірки стану поверхні скла та встановлення взаємозв'язку між дефектами та параметрами несучої здатності та довговічності скла на основі лінійно-пружної механіки руйнування.

На основі проведеного огляду літературних джерел можна зробити висновки, що скляні плити характеризуються високою несучою здатністю, прозорістю та естетичним виглядом, проте в Україні скляні конструкції практично не застосовують через відсутність узгоджених методик розрахунку та рекомендацій з проектування, тому дослідження скляних плит на сьогоднішній день є актуальною тематикою.

У *другому розділі* наведено обсяг та методики які були застосовані для експериментальних досліджень скляних зразків та плит різних серій. Щоб дослідити міцність скла на розтяг при згині, було виготовлено серію I з двадцяти дослідних зразків зі звичайного флоат-скла з тієї ж партії що і всі плити для даного дисертаційного дослідження. Схему випробування цих дослідних зразків скла було прийнято як для керамічних балок, на трьохточковий згин відповідно до ASTM C158-02.

Для проведення експериментів на довговічність скляних балочних плит було виготовлено серію II з двадцяти дослідних зразків, а також розроблено спеціальну методику випробувань. Матеріал дослідних зразків – листове флоат-скло марки М4, згідно з ДСТУ Б В.2.7-122:2009. Згідно даної методики, скляна плита працювала як шарнірно обперта однопролітна балка, навантажена статичним вантажем. Величина постійного статичного навантаження на плиту приймалася як частина від руйнуючого навантаження отриманого експериментальним шляхом для аналогічних зразків за такою ж схемою завантаження, згідно ASTM C158-02.

Щоб дослідити несучу здатність та деформативність скляних плит при згині, згідно поставлених завдань, було виготовлено три серії скляних плит в залежності від кількості шарів скла: одношарові, двохшарові та трьохшарові. Всі плити були виготовлені зі звичайного листового флоат-скла, товщиною 10 мм і розміром в плані 500x500 мм. Двохшарові і трьохшарові плити були виготовлені за допомогою технології триплексування: між шарами скла вкладали полімерну плівку EVASAVE товщиною 0,38 мм, після цього плити під тиском витримували в термокамері при температурі 130°C протягом 30 хв. Плити були оперті по чотирьох

кутах та працювали на згин від зосередженого навантаження від штампів посередині.

Було застосовано та удосконалено методику вимірювання деформацій поверхні скляних плит за допомогою оптичного методу кореляції цифрових зображень (КЦЗ). Окрім високої точності вимірювань, метод КЦЗ має ряд інших переваг, які включають: відносно просту експериментальну установку, нескладну підготовку дослідних зразків, а також можливість вимірювати деформації аж до руйнування плити без ризику пошкодити обладнання.

Для розрахунку критеріїв тріщиностійкості було застосовано методику фрактографічного аналізу. Для цього були проведені вимірювання параметрів на поверхні руйнування дослідних зразків серії I за допомогою цифрового USB мікроскопа та ПК.

Після випробування скляних зразків на міцність при згині, для аналізу міцності скла використовували двопараметричний розподіл Вейбулла. Характеристична міцність скла була визначена при 5% ймовірності руйнування та нижній межі надійності на рівні 95%.

У *третьому розділі* представлено результати проведених експериментальних досліджень, зокрема фізико-механічні характеристики скляних зразків, несуча здатність скляних плит на згин, параметри тріщиностійкості та довговічності скляних зразків, а також аналіз отриманих результатів. Наведені основні параметри та рекомендації щодо використання методу КЦЗ для точних вимірювань деформацій на поверхні скляних плит.

Характер та схема руйнування дослідних зразків що були випробувані на розтяг при згині, відповідали схемі руйнування як для керамічних зразків. Всі дослідні зразки зруйнувалися більше ніж на дві частини, а початок руйнування у всіх чотирьох зразків був від краю грані. Руйнування дослідних зразків при випробуванні на довговічність, характеризувалось утворенням тріщини по середині прольоту яка розвивалась від верхнього краю грані. Характер руйнування усіх скляних плит, незалежно від кількості шарів скла, відповідав утворенню перехресних тріщин які поширювалися від середини до країв плити, з утворенням

гострих уламків. У всіх двошарових і трьохшарових плитах послідовність руйнування шарів відбувалася від нижнього шару до верхнього: «нижній – верхній» - для серії IV та «нижній – середній – верхній» - для серії V.

Порівняльний аналіз несучої здатності скляних плит серій III, IV та V в момент руйнування першого шару, дозволяє встановити цілком логічну залежність – зі збільшенням кількості шарів триплексу (товщини плит) - зростає несуча здатність плит. Проте, така залежність не є прямо пропорційною. Використання двошарових плит порівняно з одношаровими забезпечує у 1,92 рази більшу несучу здатність; застосування трьохшарових плит порівняно з одношаровими забезпечує у 4,28 рази більшу несучу здатність та у 2,21 рази більшу несучу порівняно з двошаровими плитами.

Прогини плит також зменшуються із застосування двох або більше шарів скла. У двошарових плитах прогин у 1,69 рази менший порівняно з одношаровими плитами. Прогин трьохшарових плит всього у 1,56 рази менший порівняно з одношаровими плитами.

Для плит серій III, IV та V було виконано порівняльний аналіз значень відносних деформацій на кожному етапі завантаження, які були отримані за допомогою механічних мікроіндикаторів та цифрового екстензометра КЦЗ. В результаті проведеного аналізу можна прослідкувати високу збіжність результатів. Це свідчить зокрема про правильний підбір параметрів під час роботи з програмним забезпеченням та відповідним влаштуванням фотокамери

Характеристичне значення міцності скла на розтяг при згині визначали за допомогою квартильної функції залежно від параметрів η і β для межі відмови 5% та з нижнім рівнем довірчого інтервалу 95%. Таким чином, характеристичне значення міцності скла на розтяг при згині склало $f_{gk,5\%} = 40,4$ МПа.

У четвертому розділі подано три методики розрахунку скляних плит, а саме: аналітична методика розрахунку скляних плит на основі концепції ефективної товщини та теорії пружності пластин (I методика); чисельно-аналітичний розрахунок на основі методу скінчених елементів в ПК Dlubal RFEM (II методика);

розрахунок тріщиностійкості та довговічності скла на основі лінійно-пружної механіки руйнування (III методика);. Представлено результати та порівняльний аналіз розрахунків теоретичних та експериментальних даних для скляних плит з різною кількістю шарів.

В результаті проведеного чисельно-аналітичного розрахунку скляних плит за допомогою методу кінцевих елементів у програмному комплексі Dlubal RFEM були отримані значення руйнівних навантажень, прогинів, а також максимальних моментів, мембранних зусиль, нормальних та дотичних напружень. Подано порівняння результатів розрахунку отриманих за допомогою двох чисельно-аналітичних методик (нелінійного розрахунку та лінійного розрахунку на основі теорії міцності Губера-Мізеса) з експериментальними значеннями для плит з різною кількістю шарів скла (II методика).

Проведений аналіз даних свідчить про високу збіжність отриманих результатів розрахунку за допомогою програмного забезпечення Dlubal RFEM з експериментальними даними з достатнім запасом несучої здатності скляних плит та може бути рекомендований для подальших розрахунків скляних плит з різною кількістю шарів скла. Також дані методики розрахунку дають можливість з високою достовірністю порахувати прогини скляних плит, що робить такі конструкції більш прогнозованими. Представлено аналітичну методику розрахунку напружено-деформованого стану скляних плит з різною кількістю шарів звичайного флоат-скла на основі концепції ефективної товщини та теорії пружності пластин Тимошенка Войновського-Кригера. (I методика).

В результаті проведеного розрахунку довговічності на основі лінійно-пружної механіки руйнування було отримано значення часу до руйнування. Даний розрахунок показав високу збіжність з результатами які були отримані під час проведення випробувань на довговічність скляних балочних плит. Таким чином дана методика розрахунку на довговічність на основі лінійно-пружної механіки руйнування може бути рекомендована для розрахунку часу до руйнування для скляних плит. (III методика).

Отримані результати дисертаційного дослідження були використані на практиці. Про це свідчать акти впровадження результатів досліджень при проектуванні: скляної багатошарової стінки консольного басейну в СПА-зоні житлового комплексу готельного типу в ур. Вишні, с. Поляниця Яремчанського району, Івано-Франківської області від ТзОВ «ПЕЛЕ-ІНЖИНІГІНГ»; скляного покриття перголи на приватному об'єкті у м. Львів на вул. Ярославенка від ТзОВ «Компанія ландшафтної архітектури Розквіт»

Ключові слова: скляна плита, кореляція цифрових зображень, несуча здатність скляних плит на згин; двох-параметричний розподіл Вейбулла, фрактографічний аналіз, фізико-механічні характеристики скла, довговічність скла.

ABSTRACT

Hula V.O. Dissertation topic: "Load-bearing capacity, deformability and durability of bending glass plates". Submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 - Civil and Environmental Engineering. Field of knowledge 19 - Architecture and Construction - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2023.

The thesis is devoted to experimental and theoretical studies of the bearing capacity, deformability, and durability of glass plates in the laboratory. The test specimens differed in size and number of glass layers in accordance with the series of samples and the developed experimental research methodology. The methodology for testing glass plates for strength and deformability consisted of testing glass plates with different numbers of glass layers, which were supported at four corners and worked in bending from a concentrated load with a stamp. A methodology for testing glass beam slabs for durability was developed, according to which glass beam slabs worked as hinged single-span beams loaded with a static load for a certain period of time. The physical and mechanical characteristics of the glass from the same batch from which all the prototypes were made were also investigated. During the experimental testing of glass plates, a modern optical method of Digital Image Correlation (DIC) was used and improved to measure deformations on the surface of glass plates. As a result of the research, a methodology for calculating glass plates with different numbers of bending glass layers was developed, as well as recommendations for their design, which were applied to real objects.

The first chapter reviews scientific sources on the topic of the dissertation. The current state of research and design of glass plates is presented, and existing methods for calculating, in particular, durability based on linear-elastic fracture mechanics are analyzed. As a result of the literature review, the main directions were selected and the tasks of scientific research on the strength, deformability, and durability of glass plates working in bending were formed.

Glass, as a natural material, has been known to mankind for more than 75,000 years. However, ancient glass was usually colored and opaque due to the presence of

various impurities, while almost all modern glass has the useful property of transparency. In the 19th century, the technology for making sheet glass was improved and mechanized, which significantly increased the speed of glass production and reduced its cost. In 1959, Pilkington Glass Works in the UK introduced the technology of float glass production, which is still manufactured using this technology and is the most common type of glass. Float glass has the same thickness without distortion and waves, and its surface does not need to be further ground or polished.

The main disadvantage of using ordinary glass is the fragile nature of its destruction, i.e. it breaks instantly. For slab structures, the problem of brittle fracture can be solved by manufacturing laminated glass slabs using triplex glass. Triplex glass is a combination of two or more organic or silicate glass layers bonded by an intermediate layer of polymer film under the influence of temperature. The polymer film holds back glass fragments during fracture, so a triplex structure is more reliable and does not collapse suddenly. In this thesis research, single-layer and laminated plates made of conventional float glass by triplex were tested.

The strength of glass is characterized by significant variability, which mainly depends on the condition of its surface. However, in order to use glass in load-bearing structures, it is necessary to have a guaranteed value of the load-bearing capacity of glass structures. Therefore, in addition to the experimental determination of the bending strength of glass, it is important to check the condition of the glass surface and establish the relationship between defects and the parameters of glass strength and durability based on linear-elastic fracture mechanics.

Based on the literature review, it can be concluded that glass slabs are characterized by high load-bearing capacity, transparency, and aesthetic appearance, but glass structures are practically not used in Ukraine due to the lack of agreed calculation methods and design recommendations, so the study of glass slabs is a relevant topic today.

Chapter 2 describes the scope and methods used for the experimental studies of the glass specimens and slabs of different series. To investigate the tensile strength of glass in bending, Series I of twenty test specimens were made of conventional float glass from the same batch as all the plates for this thesis. The test scheme for these glass prototypes

was adopted as for ceramic beams, for three-point bending in accordance with ASTM C158-02.

To conduct experiments on the durability of glass beam plates, a series II of twenty prototypes was manufactured, and a special test procedure was developed. The material of the prototypes was M4 float glass, according to DSTU B V.2.7-122:2009. According to this methodology, the glass slab was treated as an articulated single-span beam loaded with a static load. The value of the constant static load on the slab was taken as a fraction of the destructive load obtained experimentally for similar specimens under the same loading scheme, according to ASTM C158-02.

In order to study glass plates for strength and bending deformability, three series of glass plates were manufactured according to the tasks set, depending on the number of glass layers: single-layer, two-layer, and three-layer. All the plates were made of ordinary float glass sheets, 10 mm thick and 500x500 mm in size. The two-layer and three-layer plates were made using triplex technology: 0.38 mm thick EVASAVE polymer film was placed between the glass layers, and then the plates were kept under pressure in a thermal chamber at 130°C for 30 minutes. The plates were supported at the four corners and worked in bending from the concentrated load from the die in the middle.

The method of measuring the surface deformations of glass plates using the optical method of digital image correlation (DIC) was applied and improved. In addition to high measurement accuracy, the ODC method has a number of other advantages, including: a relatively simple experimental setup, simple preparation of test samples, and the ability to measure deformations up to plate fracture without the risk of damaging equipment.

The fractographic analysis technique was used to calculate the crack resistance criteria. For this purpose, parameters were measured on the fracture surface of the I series prototypes using a digital USB microscope and a PC.

After testing the glass specimens for bending strength, a two-parameter Weibull distribution was used to analyze the glass strength. The characteristic value of the glass tensile strength in bending was determined using a quartile function depending on the parameters η and β for a failure limit of 5% and with a lower confidence level of 95%.

Thus, the characteristic value of the glass tensile strength in bending was $f_{gk,5\%} = 40,4$ MPa.

Chapter 4 presents three methods for calculating glass plates, namely: an analytical method for calculating glass plates based on the concept of effective thickness and plate elasticity theory (Method I); numerical and analytical calculation based on the finite element method in the Dlubal RFEM software (Method II); calculation of glass crack resistance and durability based on linear elastic fracture mechanics (Method III). The results and comparative analysis of the calculations of theoretical and experimental data for glass plates with different numbers of layers are presented.

As a result of the numerical and analytical calculation of glass plates using the finite element method in the Dlubal RFEM software package, values of destructive loads, deflections, as well as maximum moments, membrane forces, normal and tangential stresses were obtained. A comparison of the calculation results obtained using two numerical-analytical methods (nonlinear calculation and linear calculation based on the Huber-Mises theory of strength) with experimental values for slabs with different numbers of glass layers (Method II) is presented.

The data analysis shows a high convergence of the calculation results obtained using the Dlubal RFEM software with the experimental data with a sufficient safety margin for glass slabs and can be recommended for further calculations of glass slabs with different numbers of glass layers. Also, these calculation methods make it possible to calculate the deflections of glass plates with high reliability, which makes such structures more predictable. The paper presents an analytical methodology for calculating the stress-strain state of glass plates with different numbers of layers of ordinary float glass based on the concept of effective thickness and the Timoshenko-Voynovsky-Krieger theory of plate elasticity (I methodology).

As a result of the durability calculation based on linear-elastic fracture mechanics, the time to failure was obtained. This calculation showed a high agreement with the results obtained during the durability tests of glass beam plates. Thus, this method of

calculating durability based on linear-elastic fracture mechanics can be recommended for calculating the time to failure for glass beam slabs (Method III).

The results of the dissertation research were used in practice. This is evidenced by the acts of implementation of research results in the design of: a glass multilayer wall of a cantilever pool in the spa area of a hotel-type residential complex in the Vyshnia River, Polyanytsia village, Yaremche district, Ivano-Frankivsk region by PELE-ENGINEERING LLC; glass covering of a pergola at a private facility in Lviv on Yaroslavenko Street by Rozkvit Landscape Architecture Company LLC.

Key words: glass plate, digital image correlation, glass bending strength, two-parameter Weibull distribution, fractographic analysis, physical and mechanical characteristics of glass, glass durability.

Список публікацій здобувача за темою дисертаційної роботи в яких опубліковано основні наукові результати:

Статті в наукових фахових виданнях України:

1. Демчина Б. Г., Сурмай М. І., Ткач Р.О., Гула В. О., Визначення фізико-механічних властивостей скла на згин за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла, *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. Київ: КНУБА, 06/2020. №6. С94-113. DOI: 10.32347/2522-4182.6.2020.94-113.

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

2. Demchyna B., Surmai M., Tkach. R., Hula. V., Kozak. R. An analysis of using the method of two-dimensional digital image correlation in glass column research // *Eastern-European J. Enterp. Technol. Technology Center*, 4/12 (106) 2020, P52-59. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209761. (НМБД: SCOPUS, CrossRef, Index Copernicus, Scilit та ін.).

3. Демчина Б. Г., Гула В. О., Осадчук Т. Ю., Немец Я. Тріщиностійкість скла на основі концепцій механіки руйнування // *Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України. Прикладна механіка*, 58/68 (3) 2022, С102-115. (НМБД: Google Scholar, та ін.).

4. Hula V, Demchyna B. Methodology and results of the series p-2 glass slabs durability test // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. №86 2022 С. 15–23. DOI: 10.31650/2415-377X-2022-86-15-23 (НМБД: Index Copernicus, Google scholar).

5. Demchina, B. G., Gula, V. O., Osadchuk, T. Y., Nemets, Y. Cracking Resistance of Glass in Terms of the Principles of Fracture Mechanics // *International Applied Mechanics*, 58 (3) 2022, P336-347. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10778-022-01159-w>. (НМБД: SCOPUS, Google Scholar).

Тези доповідей за темою дисертаційної роботи на міжнародних конференціях:

1. Демчина Б.Г., Гула В.О., Козак Р.П. Методика проведення фактографічного аналізу поверхні зруйнованих скляних зразків, *Interaction of society and science: prospects and problems. Abstracts of XXII International Scientific and Practical Conference*. London, England, april 20-23, 2021. P33-36.

2. Bohdan Demchyna, Janusz Niemec, Hula V.O., Kozak R.P. Metoda badania próbek szkła na wytrzymałość na zginanie, *Інтелектуальні конструкції та інноваційні будівельні матеріали: зб. наук. пр.: Вип.2.* – Херсон: ХДАЕУ, 15 квітня 2021. С5-8.

3. Surmai M., Tkach R., Hula V, Kozak R., Glass as a material of bearing columns, *9-th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”*, Proceedings. – Lviv, Ukraine: Lviv Polytechnic National University, november 21-23-th 2019, P96-98.

4. Surmai M., Tkach R., Hula V., Kozak R., The Experimental Research of Glass Multilayer Columns with a Central Compression, *8-th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”*, Proceedings. – Lviv, Ukraine: Lviv Polytechnic National University, november 22-24-th 2018, P55-60.

5. Демчина Б.Г., Гула В.О., Немец Я, Дослідження міцності скла на згин з використанням статистичного розподілу Вейбулла, *VII Міжнародна науково-технічна конференція “Нові технології в будівництві”* – Київ, Україна: Київський національний університет будівництва та архітектури, 19 листопада 2020, С78-79.

6. Демчина Б.Г., Гула В.О., Методика дослідження скляних плит на довговічність, *Science, innovations and education: problems and prospects*.

Proceedings. – VII international scientific and practical conference, february 9-11, 2022. Tokyo, Japan, P301-307.

Список публікацій здобувача за темою дисертаційної роботи, які додатково відображають основні наукові результати:

1. Демчина Б.Г., Гула В.О., Осадчук Т.Ю. (2022) «Комбінована скляна плита», Патент України на корисну модель №150703, E04B 1/28, E04C 2/54, заява № u202106289 від 08.11.2021, опубліковано 16.03.2022, бюл. №11.
2. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Гула В.О. (2022) «Установка для випробування скляних плит на довговічність», Патент України на корисну модель №151488, G01N 3/00, E04C 2/54, заява № u202107242 від 14.12.2021, опубліковано 03.08.2022, бюл. №31.

Відомості, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

Основні результати дисертаційного дослідження були оприлюднені та обговорені на:

9-му Міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus» (м. Львів, 21-23 листопада 2019 р., НУЛП);

VII Міжнародній науково-технічній конференції «Нові технології в будівництві» (м. Київ, 19 листопада 2020р., КНУБА)

Міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні конструкції та інноваційні будівельні матеріали» (м. Херсон, 15 квітня 2021р., ХДАЕУ);

XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Interaction of society and science: prospects and problems» (м. Лондон, Великобританія, 20-23 квітня 2021р.);

VII Міжнародній науково-практичній конференції «Science, innovations and education: problems and prospects» (м. Токіо, Японія, 9-11 лютого 2022р.);

Наукових семінарах Національного університету «Львівська політехніка» кафедри «Будівельні конструкції та мости» (2019-2023.).

ЗМІСТ

Анотація	2
ABSTRACT	9
Зміст.....	16
Вступ.....	20
Розділ 1. Вибір напрямків досліджень та стан наукової проблеми	26
1.1 Історія виникнення та технологія виробництво скла.	26
1.2 Види скла. Загальні відомості про триплекс	29
1.2.1 Класифікація і основні види скла.	29
1.2.2 Загальні відомості про триплекс.	30
1.3 Фізико-механічні характеристики скла.	32
1.4 Критерії тріщиностійкості та довговічності скла на основі лінійно-пружної механіки руйнування.	36
1.5 Приклади застосування скляних несучих конструкцій у сучасних будівлях і спорудах.	45
1.6 Існуючі методики розрахунку скляних плит.	50
1.7 Висновки до розділу 1	52
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄМИ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. КОНСТРУКЦІЯ СКЛЯНИХ ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ.	54
2.1 Об'єм експериментальних досліджень.	54
2.1.1. Зразки для дослідження фізико-механічних характеристик скла на розтяг при згині.	55
2.1.2. Зразки для дослідження на довговічність.	56
2.1.3. Зразки скляних плит для дослідження на згин.	58

2.2. Методики експериментальних досліджень.	59
2.2.1. Методика випробування міцності скла на розтяг при згині.....	59
2.2.2. Методика випробування скляних зразків балочних плит на довговічність.....	61
2.2.3. Методика визначення несучої здатності та деформативності скляних одношарових та багатошарових плит які працювали на згин.....	65
2.2.4. Методика вимірювання деформацій скляних плит з використанням методу кореляції цифрових зображень (КЦЗ).....	68
2.2.5. Методика аналізу міцності скла на розтяг при згині за допомогою ймовірно-статистичного методу на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла.....	72
2.2.6. Методика проведення фрактографічного аналізу дослідних зразків. Визначення критеріїв тріщиностійкості скляних зразків з випробувань міцності скла на розтяг при згині.....	74
2.3 Висновки до розділу 2	75
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	77
3.1. Серія I. Фізико-механічні характеристики скляних зразків	77
3.2. Серія II. Довговічність скляних зразків.....	80
3.3. Несуча здатність та деформативність скляних плит.....	84
3.3.1. Серія III. Скляні одношарові плити.	84
3.3.2. Серія IV. Скляні двошарові плити.	87
3.3.3. Серія V. Скляні трьохшарові плити.....	90
3.4. Результати вимірювання деформацій скляних плит з використанням методу кореляції цифрових зображень.....	94
3.5. Критерії тріщиностійкості скляних зразків отримані з випробувань міцності скла на розтяг при згині.	98

3.6. Висновки до розділу 3	102
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ	
СКЛЯНИХ ПЛИТ які працюють на згин. Аналіз результатів експериментальних	
досліджень та рекомендації з проектування.	
104	
4.1. Аналітичний метод розрахунку скляних плит на основі концепції	
ефективної товщини та теорії пружності пластин. I методика.	104
4.2. Чисельно-аналітичний метод розрахунку скляних плит. II методика.	
.....	108
4.2.1. Нелінійний розрахунок скляних плит.....	109
4.2.2. Лінійний розрахунок скляних плит.....	119
4.2.3. Аналіз та порівняння результатів чисельно-аналітичних методик	
розрахунку скляних плит.....	125
4.3. Розрахунок довговічності одношарових скляних плит на основі	
лінійно-пружної механіки руйнування.	128
4.4. Рекомендації щодо проектування скляних плит	130
4.5. Впровадження результатів досліджень.	132
4.6. Висновки до розділу 4	135
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	137
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	140
ДОДАТОК А. Акти про впровадження результатів дисертаційних досліджень	
.....	152
ДОДАТОК Б. Протоколи дослідження деформацій скляних плит з	
використанням методу кореляції цифрових зображень.....	155
ДОДАТОК В. Публікації здобувача та апробація результатів за темою	
дисертаційного дослідження.....	167

ДОДАТОК Г. Рекомендації щодо застосування методики 2D КЦЗ на поверхні скляних плит із використанням цифрового без дзеркального фотоапарату SONY a6000	172
---	-----

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Скло – це один з найбільш поширених матеріалів, який використовується в промисловості та побуті: для застосування будівель, споруд, а також транспортних засобів. Звичайне використання скла не розкриває в повній мірі його потенціалу, а сучасна тенденція використання скла в елементах несучих конструкцій змушує проводити все більше досліджень його фізико-механічних властивостей. На відміну від широко використовуваних традиційних в будівництві матеріалів, скло завдяки своїм оптичним властивостям дозволяє створювати сучасні споруди, забезпечуючи прозорість та легкість архітектурних форм.

Основним недоліком використання звичайного скла є крихка природа його руйнування, тобто воно руйнується миттєво. Враховуючи, що монолітне скло, аналогічно бетону, має значно більшу міцність на стиск у порівнянні з міцністю на розтяг, воно може використовуватись у центральних стиснутих елементах, таких як колони. Для плитних конструкцій проблема крихкого руйнування може бути вирішена виготовленням багатошарових скляних плит з триплексованого скла.

Багатошарові скляні конструкції останнім часом застосовують при проектуванні нових споруд різного призначення, мостах, в сходових клітках, покриття, перекриття та інших сучасних об'єктах по всьому світу.

Одним із основних критеріїв використання матеріалу у конструкціях є наявність розрахункових методик та норм проектування, які встановлюють граничні умови для роботи матеріалу під навантаженням та терміну його експлуатації. В Україні скло в основному використовується як огорожувальний матеріал або оздоблювальний елемент, а наукові дослідження скляних несучих конструкцій та методики їх розрахунку практично відсутні. Це в черговий раз підтверджує необхідність вивчення конструкцій зі скла таких як плити та їх довговічності.

Проведення комплексних наукових досліджень скляних плит дозволить вирішити актуальну проблему та сприятиме появі нових типів конструкцій, які продовжать розвиток інженерно-будівельного ремесла як такого.

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

Об'єкт дослідження – міцність нормальних перерізів, деформативність та довговічність скляних одно та багатошарових плит, що працюють на згин.

Предмет дослідження – скляні плити з різною кількістю шарів скла.

Відповідно до предмету та об'єкту дослідження було сформульовано мету та завдання дослідження..

Мета – встановити несучу здатність нормальних перерізів та деформативність скляних плит опертих по чотирьох кутах, що працюють на згин під дією короткочасного статичного навантаження, прикладеного через штамп посередині дослідних зразків, і довговічність скляних плит під дією довготривалого статичного навантаження та розробити рекомендації з їх проектування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- обґрунтувати доцільність застосування скляних плит в якості несучих конструкцій у проектуванні та будівництві;

- розробити експериментальну методику та провести випробування скляних плит, виготовлених з різною кількістю шарів скла, які шарнірно оперті по чотирьох кутах та працюють на згин під дією короткочасного статичного навантаження, прикладеного посередині дослідних зразків через металевий штамп;

- удосконалити методику застосування кореляції цифрових зображень для визначення деформацій на зовнішніх поверхнях скляних плит;

- визначити фізико-механічні характеристики скла використаного у дослідних зразках плит;

- розробити методику та дослідити довговічність дослідних зразків скляних балочних плит, а також проаналізувати отримані результати досліджень;

- розробити методику досліджень тріщиностійкості скла та визначити параметри розгалуження тріщин в скляних конструкціях;

- виконати аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень несучої здатності та деформативності скляних плит на згин;

- розробити рекомендації з проектування скляних плит з різною кількістю шарів скла що працюють на згин та методику прогнозування їх довговічності
- впровадити результати досліджень.

Методи дослідження:

- експериментальні дослідження несучої здатності та деформативності скляних плит, виготовлених з різної кількості шарів скла, що працюють на згин, за спеціально розробленою методикою та експериментальні дослідження фізико-механічних характеристик скла на згин;
- визначення довговічності скляних балочних плит у процесі проведення експериментів за допомогою механічних (мікроіндикаторів годинникового типу) та оптичних приладів (прилади фото- та відеофіксації);
- фрактографічний аналіз скляних зразків з використанням цифрової оптичної мікроскопії для визначення критеріїв тріщиностійкості і розгалуження тріщин в склі;
- статистичний аналіз отриманих експериментальних даних з випробувань скляних плит, виготовлених з різної кількості шарів скла;
- статистично-ймовірнісний аналіз даних експериментальних досліджень з визначенням характеристичної міцності скла на розтяг при згині за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла, характеристичних значень тріщиностійкості і розгалуження тріщин в склі.

Наукова новизна отриманих результатів:

- отримано нові експериментальні дані з випробування несучої здатності та деформативності скляних плит, опертих по чотирьох кутах, що працюють на згин під дією статичного навантаження різних серій в залежності від кількості шарів скла.
- отримано експериментальні результати фізико-механічних характеристик скла з використанням ймовірнісно-статистичного методу оцінки даних;
- розроблено нову методику дослідження скляних балочних плит на довговічність та отримано і проаналізовано результати цих досліджень;

- удосконалено методику визначення деформацій на поверхні скляних плит за допомогою кореляції цифрових зображень, запропоновано удосконалену методику проведення оптичних замірів та підготовки поверхні скляних дослідних плит.

- набула подальшого розвитку методика фрактографічного аналізу за допомогою цифрової оптичної мікроскопії для дослідження тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі. Було визначено критерії тріщиностійкості та розгалуження тріщин у склі;

- набули подальшого розвитку методики розрахунків скляних плит з використанням теорії пружності пластин, методу скінченних елементів (МСЕ) та лінійно-пружної механіки руйнування для розрахунку несучої здатності скляних плит, що працюють на згин.

Особистий внесок здобувача:

Усі основні результати дисертаційного дослідження та наукові розробки одержані автором самостійно. У співавторстві автору належать публікації: [1] - визначення фізико-механічних властивостей скла на згин за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла; [2] - аналіз використання методу двовимірної цифрової кореляції зображень у дослідженнях скляних колон; [3] - методологія та результати випробування серії П-2 скляних плит на довговічність; [4,5] - тріщиностійкість скла на основі концепцій механіки руйнування.

Апробація матеріалів дисертації:

Основні результати дисертаційної роботи були оприлюднені та обговорені на: 9-му міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus» (м. Львів, 21-23 листопада 2019 р., НУЛП) [6,7]; VII міжнародній науково-технічній конференції «Нові технології в будівництві» (м. Київ, 19 листопада 2020р., КНУБА) [8]; міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні конструкції та інноваційні будівельні матеріали» (м. Херсон, 15 квітня 2021р., ХДАЕУ) [9]; XXII міжнародній науково-практичній конференції «Interaction of society and science: prospects and problems» (м. Лондон, Великобританія, 20-23 квітня 2021р.) [10]; VII міжнародній науково-практичній конференції «Science,

innovations and education: problems and prospects» (м. Токіо, Японія, 9-11 лютого 2022р.) [7,11]; 11-тій міжнародній науковій сесії з прикладної механіки (м. Бидгощ, Польща, 18 листопада 2022) [12], наукових семінарах Національного університету «Львівська політехніка» кафедри «Будівельні конструкції та мости» (2019-2023.).

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається з таких елементів: анотація; зміст; вступ; основна частина (складається з чотирьох розділів); загальні висновки; список використаних джерел із 126 найменувань; 4 додатки. Загальна кількість аркушів становить 174, з яких 151 основного тексту, 89 рисунків, 23 таблиці, 12 сторінок списку виконаних джерел, 23 сторінок додатків.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Тема дисертації «Несуча здатність, деформативність та довговічність скляних плит які працюють на згин» відповідає науковому напряму кафедри будівельних конструкцій та мостів «Теоретичні та експериментальні дослідження звичайних та попередньо напружених залізобетонних, металевих, дерев'яних та інших конструкцій будівель, споруд, мостів і фундаментів та методів їх підсилення з врахуванням різних видів армування, бетонування, способів та інтенсивності навантаження, дії агресивного середовища, підвищених температур», дата затвердження на Вченій раді Інституту будівництва та інженерних систем - 08.10.2019, протокол № 3 та уточнена на Вченій раді Інституту будівництва та інженерних систем - 02.02.2023, протокол № 6.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні методик дослідження несучої здатності, деформативності та довговічності скляних зразків та плит. Отримані результати досліджень фізико-механічних характеристик скла, розроблені рекомендації з проектування несучої здатності та довговічності скляних плит можуть бути застосовані в будівництві та при проектуванні скляних перекриттів і покриттів, а також у програмах навчальних курсів для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Отримано Висновки Державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент) про видачу патенту на корисну модель

№150703 «Комбінована скляна плита», заява № u202106289 від 08.11.2021 [13], опубліковано 16.03.2022; та патенту на корисну модель №151488 «Установка для випробування скляних плит на довговічність, заява № u202107242 від 14.12.2021, опубліковано 03.08.2022 [14].

Отримано акти про впровадження результатів досліджень (Додаток А) при проектуванні: скляної багаточарової стінки консольного басейну в СПА-зоні житлового комплексу готельного типу в ур. Вишні, с. Поляниця Яремчанського району, Івано-Франківської області від ТзОВ «ПЕЛЕ-ІНЖИНІГІНГ»; скляного покриття перголи на приватному об'єкті у м. Львів на вул. Ярославенка від ТзОВ «Компанія ландшафтної архітектури Розквіт».

РОЗДІЛ 1. ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СТАН НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ

1.1 Історія виникнення та технологія виробництва скла.

Скло - це тверда речовина, що утворюється шляхом охолодження розплавленого матеріалу таким чином, що внутрішнє розташування атомів залишається у випадковому або неупорядкованому стані, подібному до розташування в рідині. Таку тверду речовину називають аморфною або склоподібною. Звичайні тверді тіла навпаки мають регулярні кристалічні структури [15], різниця представлена на рис.1.1.

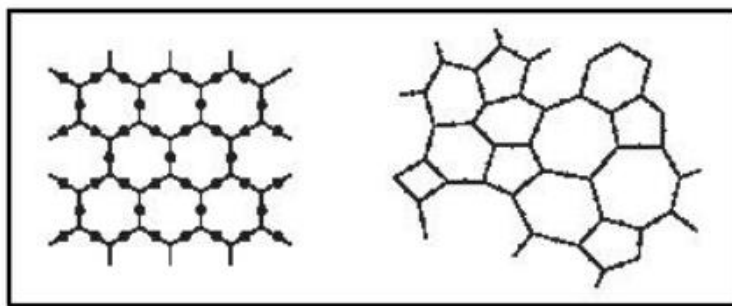


Рис. 1.1 Структури типового твердого тіла (ліворуч) і скла (праворуч) [15]

Скло, як природній матеріал, відоме людству більше 75 тисяч років. У природі скло утворюється, коли пісок та/або каміння, часто з високим вмістом в ньому кремнезему, нагріваються до високих температур, а після цього швидко охолоджуються. Інтенсивна спека та удари метеоритів об землю та атмосферних вибухів мільйони років тому створили природне скло, відомі людству як тектити та лівійське пустельне скло [16].

Природне скло може утворюватися в результаті виверження вулканів, таке скло відоме як обсидіан - утворюється коли лава швидко охолоджується, перетворюючись у склоподібний стан. Природне скло також може утворюватися під впливом погоди, коли блискавка влучає в пісок, через вплив температури пісок плавиться та утворює склоподібну трубку. Ці склоподібні трубки називаються фюльгуритами і вони зустрічаються всюди. [16].

Найдавніші зразки скла були знайдені в Єгипті. В Індії, Кореї, Японії були виявлені скляні вироби, які були виготовлені близько 2 тис. до н.е. Одним з

прикладів застосування первісними людьми природнього скла, є наконечники з обсидіану що були знайдені на території сучасної Вірменії (рис.1.2) [17]



Рис. 1.2 Вістря з обсидіану знайдені археологами на території сучасної Вірменії [17]

Початок виготовлення скла відносять до четвертого тисячоріччя до нашої ери в Месопотамії. Існує версія, що люди почали виготовляти глазуровану кераміку для підвищення водонепроникності глечиків, пляшок і ваз [18].

В складі всіх знайдених стародавніх виробів зі скла був кремнезем (пісок), модифікований значною кількістю різних оксидів металів, головним чином соди (Na_2O) і вапна (CaO). Це все ще найпоширеніше скло, яке використовується і сьогодні. Воно відоме як вапняно-натрієве скло. Однак стародавнє скло зазвичай було кольоровим і непрозорим через наявність в ньому різних домішок, тоді як майже все сучасне скло має корисну властивість – прозорість [15].

Формування гарячого розплавленого скла в корисні вироби вже в давнині було проблемою. Розплавлене скло надзвичайно гаряче, липке і з ним важко працювати. У період приблизно з 2000 року до н.е. до 50 року до н.е існувало три основні методи формування скла. Одним із найперших і найбільш широко використовуваних було формування скляних виробів за допомогою керна. Другий метод передбачав «провисання» та «сплавлення». Третім способом було лиття, яке передбачало заливання гарячого розплавленого скла у форму. Усі три методи були повільними і вони давали змогу виробляти невеликі предмети, які були досить товстими. Скляні вироби, як правило, були досить дорогими і в давнину були

доступні лише дуже багатим людям [15]. В 19 столітті було удосконалено та механізовано технологію виготовлення листового скла, що значно збільшило швидкість виробництва скляних виробів та знизило їх вартість (рис.1.3) [19].

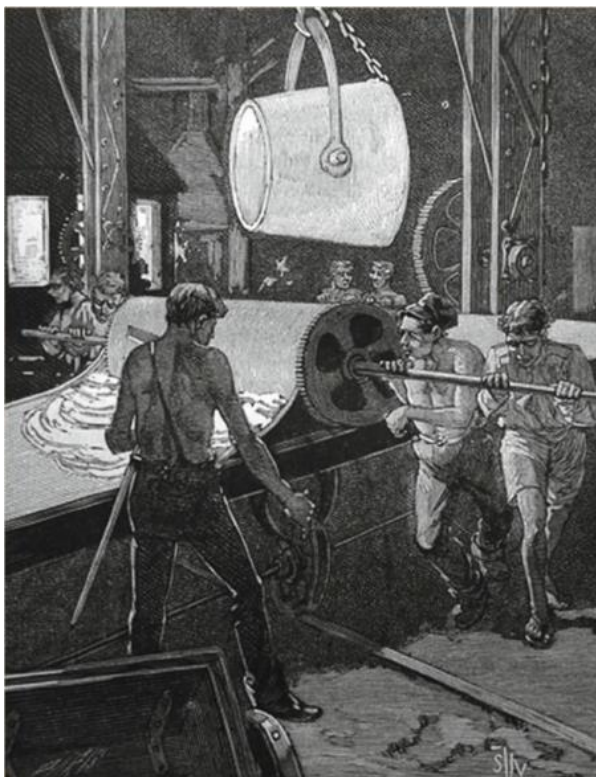


Рис. 1.3. Процес виготовлення листового скла, 1870 рік

У 1959 році компанія Pilkington Glass Works у Великобританії запровадила технологію виготовлення флоат-скла (рис.1.4). У процесі флотації розплавлене скло безперервно ллється на дзеркальну поверхню розплавленого олова при температурі 1000°C (1832°F). При цій температурі скло розтікається шаром товщиною близько 6 міліметрів. Якщо шар розтягнути під час охолодження, можна досягти товщини 2 мм. Скло просувається по гарячому рідкому олові та охолоджується до температури 600°C (1112°F), і тоді воно стає досить твердим щоб його можна було підняти з поверхні розплавленого олова. Після чого поверхню скла випалюють (нагрівають щоб зняти напруження) перед розрізанням на листи бажаної довжини. Метод виготовлення флоат-скла є стандартним методом виробництва скла, і понад 90% світового виробництва листового скла є флоат-склом [18]. Великий сучасний завод з виготовлення флоат-скла може виробляти 5000 тон листового скла на тиждень, і він може працювати 24 години на добу, 365

днів на рік, протягом кількох років перш ніж знадобиться капітальний ремонт. Флоат-скло має однакову товщину без спотворень та хвиль, а його поверхню не потрібно додатково шліфувати чи полірувати. Технологічна лінія виготовлення флоат-скла подана на рис. 1.4 [15].

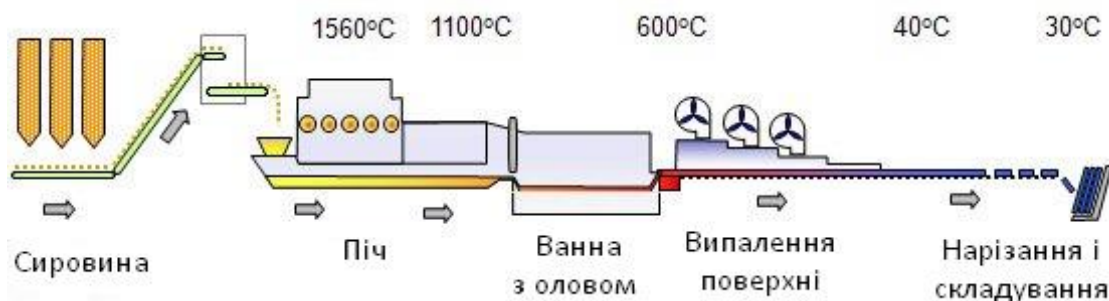


Рис.1.4 Технологічна лінія виготовлення флоат-скла

Через те що флоат-скло є найбільш поширеним видом листового скла у промисловості та будівництві, дослідні зразки та плити для даного дисертаційного дослідження було виготовлено саме з цього матеріалу.

1.2 Види скла. Загальні відомості про триплекс

1.2.1 Класифікація і основні види скла.

Згідно ДСТУ Б В.2.7-122:2009 [20] листове скло класифікується наступним чином:

- за видами (марками):
 - листове флоат-скло (ФС);
 - витягнуте листове скло (ВС), у тому числі: скло листове "під старовину" (ВС "під старовину"); скло листове для реставрації (ВС "реставрація");
- за кольором:
 - кольорове (за позначенням виробника);
 - безкольорове;
- за розміром скла:
 - "джамбо" (3210x6000 мм);
 - "спліт" (3210x2550 мм);
 - "інвентарний розмір" (1300÷2250x1600÷3600);

- поставки (скло вільних розмірів СВР);
- остаточної прирізки (скло твердих розмірів ТР);
- за товщиною скла.

Скло листове відповідно до наявності оптичних та візуальних дефектів може додатково класифікуватися за марками: М0, М1, М2, М3, М4, М5, М6, М7. Допускається у класифікації видів витягнутого скла (ВС) позначення способу виробництва: скло вертикального витягування (ВВС); скло вертикально-горизонтального витягування (ВГВС).

Відповідно до EN 12758:2019 [21] скло поділяють на такі види:

- базове скло (натрієво-силікатне скло, зокрема: флоат-скло, витягнуте листове скло, поліроване армоване скло, армоване візерункове скло, скляні блоки та плити);
- спеціальне базове скло (боросилікатне скло, лужноземельне силікатне скло, склокераміка, алюмосилікатне скло);
- оброблене скло: зміцнене (термічним або хімічним методом), гартоване безпечне скло, багатошарове скло, склопакети, скло з покриттям.

1.2.2 Загальні відомості про триплекс.

Відповідно до ДСТУ Б В.2.7 - 123 - 2004 [22] багатошарове скло являє собою 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.

Триплексоване скло — це комбінація двох або більше органічних чи силікатних скляних шарів, з'єднаних проміжним шаром з полімерної плівки під дією температури [23]. Полімерна плівка стримує частинки уламків скла під час руйнування, таким чином конструкція з триплексу є більш надійна та не руйнується раптово. Така технологія виготовлення безпечних скляних конструкцій була винайдена для автомобільної промисловості, проте після детального аналізу і вдосконалення, триплекс почали широко використовувати і для інших скляних

конструкцій, в тому числі для будівництва [19,23,24]. Загальний вигляд триплексу наведено на рис.1.5.

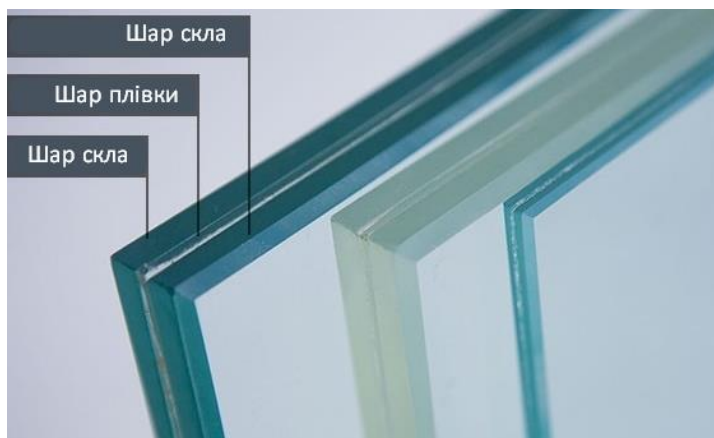


Рис.1.5 Загальний вигляд триплексу

Залежно від складу триплексу, він характеризується цілим рядом властивостей, наприклад [23]:

- вогнестійкість;
- ударостійкість;
- звукоізоляція;
- безпека (протизламне скло).

Конструкції зі скла отримують важливі властивості, які має безпечне скло, а саме: прилипання уламків скла, залишковий опір, мінімалізація ризику травмування. Стандартним матеріалом проміжного шару є полімерна плівка PVB (полівінілбутираль) із в'язко-пружними властивостями. Проте жорсткість цієї плівки сильно залежить від тривалості навантаження та температури, особливо при температурах вище 25°C, модуль зсуву її різко падає. Звичайний PVB-прошарок має товщину 0,38 мм. Також можна комбінувати два шари (0,76 мм), чотири шари (1,52 мм) або для спеціального призначення шість шарів (2,28 мм)[23].

В якості проміжного шару також використовуються інші матеріали: литі смоли (зазвичай поліметилметакрилат або поліестер), EVA, поліуретан та іономер. Іономерні проміжні шари, розроблені спеціально для протиураганного скління, вони характеризуються додатковими властивостями несучої здатності багатошарового скла завдяки високій жорсткості та міцності на зсув, особливо при

температурах між 25°C і 50°C, що забезпечує дуже хорошу залишкову стійкість. Зараз на ринку пропонують більш жорсткі проміжні шари полімерної плівки PVB, характеристики цих плівок можна порівняти за жорсткістю з іономерними прошарками, особливо в діапазоні нижчих температур [23].

Для застосування скляних конструкцій (плит, колон або балок) важливим показником є жорсткість проміжного шару. Дослідження характеристик проміжного шару та зчеплення скляних пластин між собою, виготовлених технологією триплексування та клеючих матеріалів подано у роботі [25].

Випробування безпекових параметрів скла описано у стандартних методиках [21,26–30], залежно від застосування скляного елемента.

Оскільки триплекс виготовлений з флоат-скла є найбільш поширеним для використання у несучих конструкціях, важливим фактором у проектуванні таких конструкцій є залежність несучої здатності від кількості шарів скла. Тому дослідження скляних плит з різною кількістю шарів скла є актуальним питанням на сьогоднішній день.

1.3 Фізико-механічні характеристики скла.

Властивості скла поділяють на: фізичні, механічні, хімічні, оптичні, електричні [31]. Розглянемо основні властивості скла які мають практичне значення для використання скла в якості несучих конструкцій.

Механічні властивості скла – це стійкість до механічних впливів, до яких відносять: міцність, твердість, крихкість та щільність.

Міцність скла залежить від його хімічного складу, якості відпалу, стану поверхні, температури, навколишнього середовища [32].

Твердість скла – це властивість матеріалу яка характеризує його стійкість до стирання, подряпин, фізичному впливу інших матеріалів, і залежить в основному від його складу. Твердість скла по шкалі Мооса знаходиться в межах від 5 до 7 [32].

Крихкість скла – це характеристика матеріалу руйнуватися раптово під дією удару без пластичної деформації. На ударну міцність скла впливає його товщина, хімічний склад, якість відпалу, а також його однорідність [32]. Важливим фактором

є термічна обробка. Міцність скла на удар більша в 5-7 разів у тих зразків що загартовувалися.

Щільність скла – це фізична властивість яка характеризує теплові, оптичні та ряд інших властивостей скла. Щільність скла зменшується з підвищенням температури.

Основні властивості натрієвого-кальцієвого силікатного скла подано у EN 572-1 [33], зокрема цей стандарт дає вимоги до хімічних, фізичних та механічних властивостей скла які приймаються до розрахунку листового флоат-скла. Основні фізико-механічні властивості наведено у табл.1.1 і табл.1.2.

Таблиця 1.1

Фізико-механічні властивості натрієвого-кальцієвого силікатного скла
(листового флоат-скла) згідно [33]

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

Таблиця 1.2

Характеристична міцність флоат-скла на згин згідно [30]

Звичайне скло [34]	Термозміцнене скло [26]	Гартоване скло [35]
45 МПа	70 МПа	120 МПа

Хімічна стійкість – це властивість матеріалу витримувати дію хімічних реагентів. Скло належить до стійких матеріалів, оскільки не втрачає своїх властивостей при дії дощу, снігу, сонця, агресивних луг та кислот [32]. Хімічний склад листового флоат-скла наведено у табл. 1.3 [33].

Таблиця 1.3

Хімічний склад вапняно-натрієвого силікатного скла [33]

Найменування	Формула	Вміст, %
Оксид кремнію	SiO ₂	69-74
Оксид кальцію	CaO	5-12
Оксид натрію	Na ₂ O	12-16
Оксид магнію	MgO	0-6
Оксид алюмінію	Al ₂ O ₃	0-3
Інші складові	-	0-5

Оскільки скло є аморфний матеріалом, поведінка скла під навантаженням дуже крихка. Залежність деформації від напруження має лінійну залежність, тобто пружну стадію деформування з раптовим руйнуванням (рис. 1.6) [23].

На підставі розрахунків теоретична міцність скла на розтяг при згині становить від 5000 МПа до 8000 МПа. Однак через структурні дефекти на поверхні (дефекти Гріффіта) реальна міцність набагато нижча. Через концентрати напруження, що виникають у мікротріщинах і дефектах, та неможливості перерозподілити напруження через відсутність пластичної стадії, фактична

міцність скла на згин знижується приблизно до 30-80 МПа. Залежно від розміру поверхневої тріщини міцність на розтягнення при згині контролюється початком гіперкритичного зростання тріщини без будь-яких пластичних деформацій [23]. На рис. 1.6 подано для порівняння залежності відносних деформацій від напруження для сталі та скла.

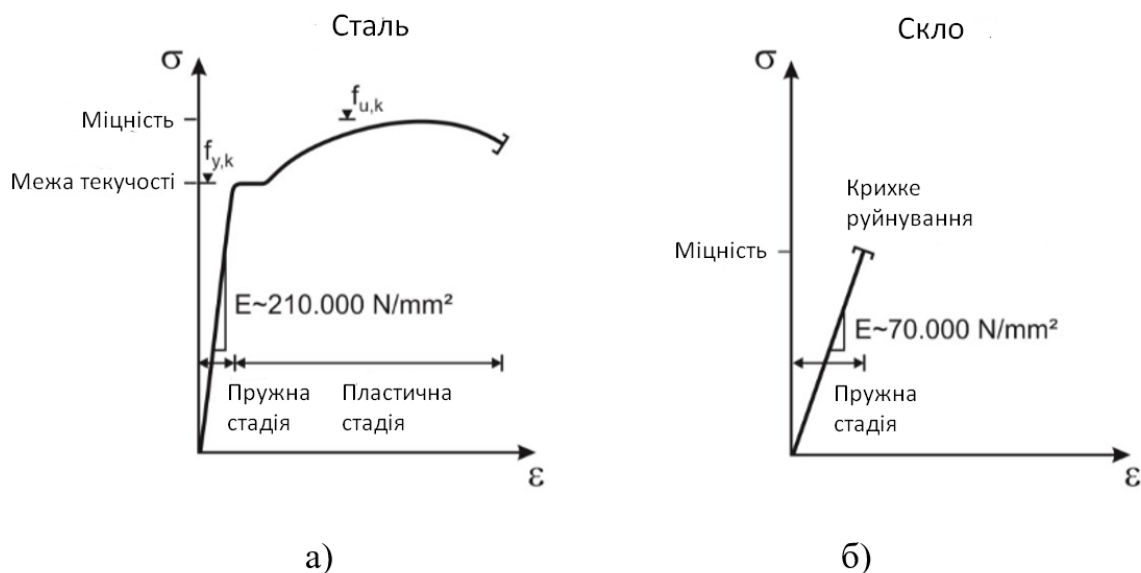


Рис. 1.6 Графіки залежності відносних деформацій від напруження:

а) - сталі; б) – скла

Таким чином, для підвищення міцності скла, необхідно додатково шліфувати і обробляти краї скла після різання його на необхідні розміри.

В Україні дослідження скляних конструкцій виконували у Національному університеті «Львівська політехніка» на кафедрі Будівельних конструкцій та мостів, під керівництвом проф. д.т.н. Демчини Б.Г. Проводили зокрема дослідження: скляних балок [36], скляних плит [37–41], скляних колон [2,42–48], та окремих скляних дослідних зразків [25,49–51]. Дослідженню міцності та деформативності скляних багатошарових плит була присвячена дисертаційна робота Осадчука Т.Ю. [52], а дослідженню несучої здатності та деформативності скляних багатошарових колон робота Ткача Р.О. [53].

Також застосування методу кореляції цифрових зображень для дослідження залізобетонних конструкцій описано у роботах Бліхарського Я.З. [54–56].

До скляних, або скловолокнистих виробів можна також віднести скляну та базальтову арматуру яку використовують для армування бетонних конструкцій. Дослідженню такої арматури та конструкцій з її використанням присвячені роботи вчених Гомона С., Поліщука М [57–60] та Клімова Ю. [61,62].

Також метод кореляції цифрових зображень (КЦЗ) було застосовано для дослідження деформацій на поверхні скляних плит та висвітлено у роботі Осадчука Т.Ю. [52]. Проте, для визначення «реальних» відносних деформацій поверхні скла на основі значень відносних деформацій, отриманих за допомогою методу КЦЗ, останні, рекомендовано, перемножувати на перевідний коефіцієнт який становить: $k_c = 6,20 \times 10^{-3}$ [52]. Оскільки перевідний коефіцієнт має високе значення, необхідні додаткові дослідження з використанням методу КЦЗ для удосконалення даної методики під час випробування скляних плит.

1.4 Критерії тріщиностійкості та довговічності скла на основі лінійно-пружної механіки руйнування.

Несуча здатність скла характеризується значною мінливістю, що в основному залежить від стану його поверхні [63]. Однак, для застосування скла в несучих конструкціях необхідно мати гарантоване значення несучої здатності скляних конструкцій. Тому, крім експериментального визначення несучої здатності скла на згин, актуальним є виконання перевірки стану поверхні скла та встановлення взаємозв'язку між дефектами (мікротріщинами на поверхні) та параметрами несучої здатності та довговічності скла [4].

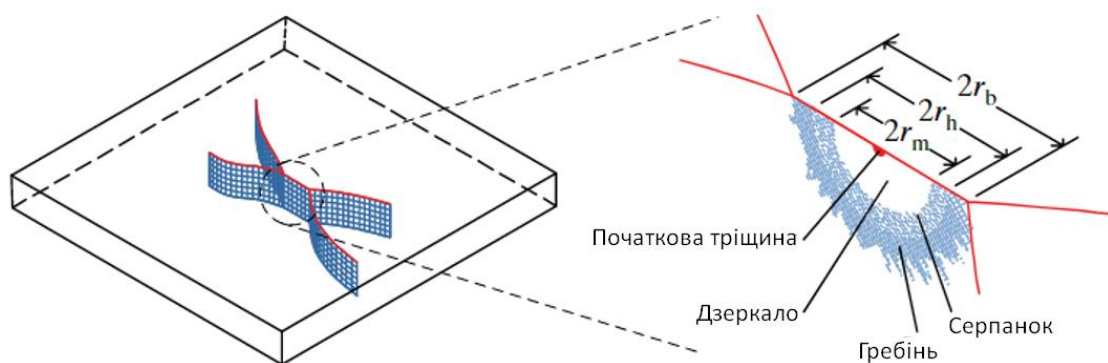


Рис. 1.7 Схематичне зображення тріщини скла [64]

Фрактографічний аналіз площини зламу скляних зразків може надати інформацію як про розтягуючі напруження, так і про місце росту тріщини. Цей аналітичний метод дає важливу інформацію при визначенні механізму руйнування, таку як: напрямок розповсюдження тріщини, напруження, напрямок удару та тертя, місце зародження. Цю інформацію можна отримати після випробування скляних зразків на міцність шляхом фрактографічного аналізу поверхні зламу за допомогою мікроскопа [65]. Після цього необхідно виконати розрахунок критеріїв тріщиностійкості скла та розгалуження тріщин на основі положень механіки руйнування. Такий підхід представлений був у роботах Оверенда [64], Періса [66], Квінна [67,68] та ін.

У своїй фундаментальній роботі Гріффіт [69] показав, що міцність натрієво-вапняного силікатного скла обернено пропорційна квадратному кореню з довжини тріщин на поверхні скла. Він зробив висновок, що площинні дефекти, такі як тріщини, є основними факторами, що впливають на міцність скла [70]. Ця залежність міцності від довжини тріщини згодом трансформувалася в науку про руйнування, яка на сьогоднішній день є частиною загальноприйнятої методології, що використовується для забезпечення надійності конструктивних матеріалів. Хоча теорія Гріффіта дала великий поштовх інженерній практиці та розумінню процесу руйнування конструктивних матеріалів, ця теорія не дає розуміння з точки зору молекулярних основ процесу руйнування. Ці основи є важливими, оскільки саме на молекулярному рівні, визначаються механізми втоми та докритичного росту тріщин у конструктивних матеріалах [70–72].

Важливими факторами є форма вершини тріщини, чи є вона атомарно гострою, чи була затуплена пластичною деформацією матеріалу, що оточує вершину тріщини, або хімічною корозією, спричиненою навколишнім середовищем. З часів Гріффіта були розроблені експериментальні методи, такі як трансмісійна електронна мікроскопія та атомно-силова мікроскопія, які дозволяють виявити деталі структури вершини тріщини майже на молекулярному рівні. Ці деталі можуть бути використані для розуміння та покращення поведінки конструкційних матеріалів під дією прикладених навантажень [70].

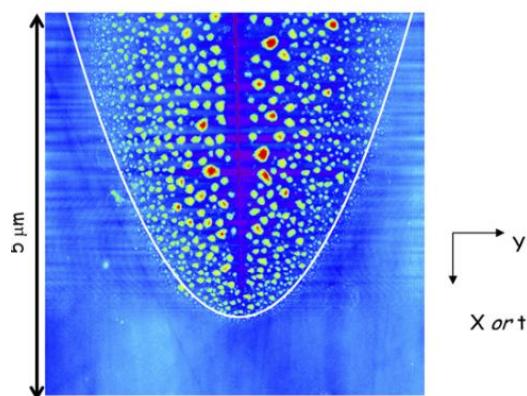


Рис. 1.8 Типове зображення вершини тріщини, отримане за допомогою атомно-силової мікроскопії [72]

Схема поверхні руйнування для скла представлена у нормах – в ASTM C1256-93(2013) [73]. Основні маркування параметрів поверхні руйнування, які використовують у фрактографії, представлені на рис. 1.9.

Дзеркало руйнування (1) – це гладка ділянка на поверхні зламу, яка є навколо початкової точки руйнування. Серпанок (2) – параметр на поверхні швидкісного росту тріщини, який починається із розмитої непрозорої ділянки, а при збільшенні швидкості росту тріщини набуває волокнистої структури, яка витягнута в напрямку росту тріщини. Гребінь (3) – це лінії що паралельні до напрямку росту тріщини, які також є некомпланарні (ті, що лежать в різних площинах), (4) - Розгалуження [52].

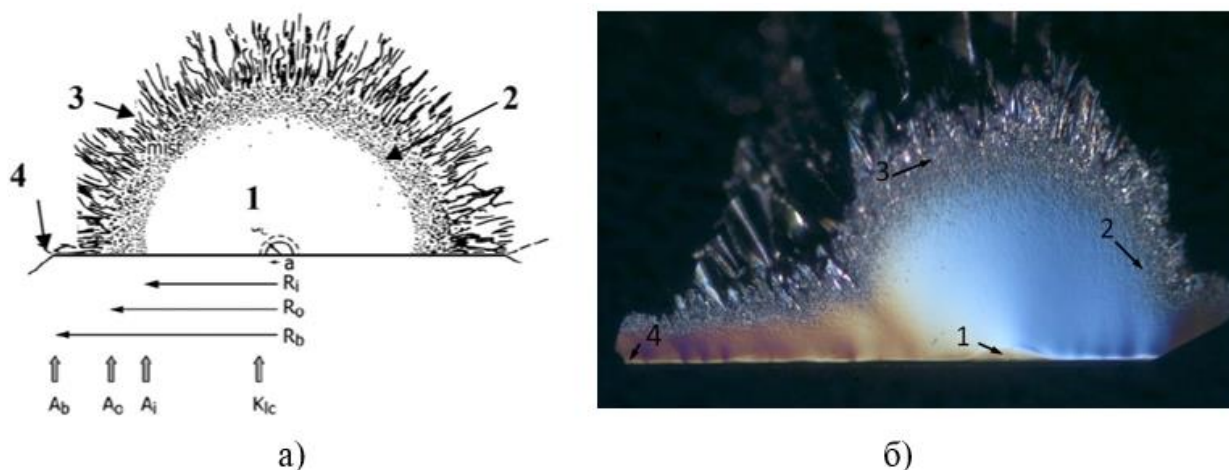


Рис. 1.9 Основні маркування параметрів поверхні руйнування:
а) – схематичне зображення згідно норм [73]; б) – фото під мікроскопом

Залежність міцності скла від часу внаслідок зростання тріщини під впливом певного середовища називають статичною втомою скла [74,75]. Механіка руйнування, що вивчає докритичне зростання тріщини (ДКЗТ), називається механікою руйнування від втоми або докритичною механікою руйнування (ДКМР) [52]. Для аналізу даних використовують положення лінійно-пружної механіки руйнування (ЛПМР) [76]. Відповідно до ЛПМР критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} знаходять за формулою:

$$K_{IC} = \sigma Y \sqrt{a} \quad (1.1)$$

де, K_{IC} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (в'язкість руйнування), МПа $\sqrt{м}$;

σ – руйнуючі напруження (або короткочасна міцність σ_{IC}), МПа;

Y – коефіцієнт форми початкової тріщини;

a – розмір початкової тріщини (радіус або глибина тріщини).

Для натрієво-кальцієвого силікатного скла $K_{IC} = 0,72 \cdot 0,82$ МПа $\sqrt{м}$. Під дією середовища або різних чинників, початкова тріщина у склі a може поширюватися до критичного значення a_{IC} , що в результаті досягає значення K_{IC} , навіть за умови що прикладені напруження менші ніж σ_{IC} [64]. Проте, нижче порогового значення інтенсивності напружень $K_{th} = K_{ISCC}$ ріст тріщини не відбувається, незалежно від часу прикладання навантаження. Для натрієво-кальцієвого силікатного скла порогове значення інтенсивності становить приблизно: $0,3K_{IC} = 0,2 \cdot 0,27$ МПа $\sqrt{м}$ [4].

Після початкового прискорення тріщини та її подальшого розповсюдження при майже сталій швидкості в області дзеркала, перехід до гребеня відбувається з дуже різким збільшенням швидкості від $0,3V_t$ до $0,5V_t$ (V_t – це швидкість поперечної пружної хвилі). Згідно [77], поки значення G не перевищує значення G_B , швидкість поширення тріщини V збільшується та зменшується разом з G . Коли тріщина прискорюється до порогової швидкості $V_{lim} = 0,5V_t$, а рушійна сила наближається до необхідного значення G_B для розгалуження тріщини, в цей момент утворюються численні розгалуження тріщини в зоні гребеня.

Також, для фіксації моменту, коли тріщина досягає кінцевої (порогової) швидкості, можна використовувати лінії Уоллнера на поверхні зламу (рис.1.10). Лінії Уоллнера – це хвилеподібний слід, що виникає внаслідок тимчасового відхилення фронту тріщини від площини, в результаті нахилу осі головних напружень.

Вперше Гельмут Уоллнер показав зображення зламів скляних стрижнях у 1939 р. Зразки випробовувалися на згин і мали характерні лінії в площині зламу.

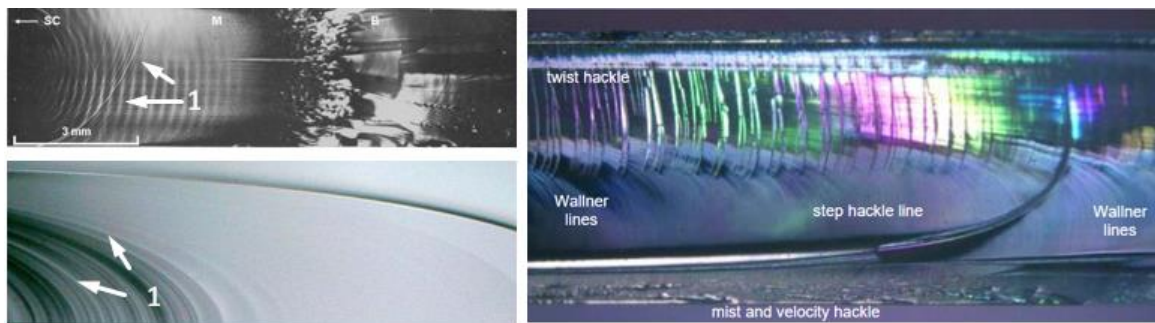


Рис. 1.10 Поверхні зламу скла під мікроскопом [67];
де 1 – лінії Уоллнера (Wallner lines)

Лінії Уоллнера є місцем перетину пружної хвилі і фронту тріщини. Форма лінії залежить від відповідних форм і швидкостей пружної хвилі та фронту тріщини, а також від напрямку наближення хвилі до фронту тріщини. Лінії Уоллнера мають неоціненне значення для визначення напрямку поширення тріщин і їх дуже легко побачити на поверхні зламу після регулювання освітлення [67].

Відповідно до п.7.2.4.7 ASTM C1322-15 [78], при відсутності початкового розміру тріщини, руйнуючі напруження неможливо знайти за допомогою рівняння (1.1). Тому оцінку руйнуючих напружень можна зробити на основі радіусу дзеркала, згідно рівняння:

$$\sigma = A/\sqrt{R} \quad (1.2)$$

де, σ – руйнуючі напруження МПа; R – радіус дзеркала, мм; A – константа дзеркала чи розгалуження МПа $\sqrt{м}$.

Згідно норм [78] у рівнянні (1.2) потрібно використовувати відповідний радіус R та відповідну константу A для кожної зони: для області дзеркало – серпанок R_i або R_m – внутрішню константу дзеркала A_i ; для області серпанок -

гребінь R_0 – зовнішню константу дзеркала A_0 ; для відстані в місці розгалуження тріщини на кілька основних R_b – константу розгалуження A_b . Відповідні константи дзеркала та розгалуження наведено у нормах [78].

Частина механіки руйнування, що стосується тріщин називається докритичною механікою руйнування (ДМР). При докритичному зростанні тріщини кількість пластичної деформації при розтріскуванні є дуже малою, тому, як правило, для аналізу зростання тріщини використовують лінійно-пружну механіку руйнування [76].

Для скла докритичне зростання тріщини (ДЗТ) є наслідком корозії під напруженням або стрес-корозії, коли вода або інший чинник середовища в хімічній реакції руйнує молекулярний зв'язок Si-O [71,79]. Загалом, руйнування може бути викликане впливом навколишнього середовища, хімічної реакції, осколків, що затискаються біля кінця тріщини, тощо. Для скла ріст тріщини, в основному, залежить від навколишнього середовища та хімічного складу [70,74]. Це пояснює, чому тріщини на поверхні скла можуть зростати за певних умов, особливо під дією води, при напруженнях, навіть, менших, ніж міцність скла. Залежність міцності скла від часу внаслідок росту тріщини під впливом середовища називають статичною втомою [74,75]. Явище статичної втоми при постійному навантаженні представлено на рис.1.11.

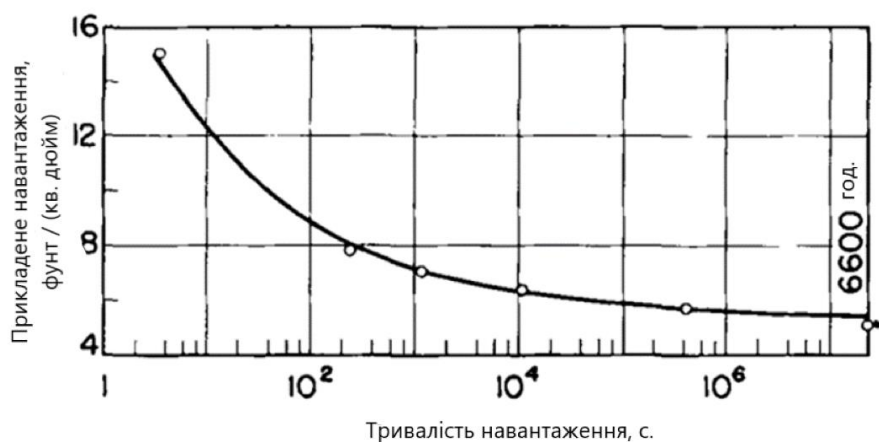


Рис. 1.11. Залежність міцності скла від часу (статична втома скла) на основі даних випробувань на згин стержнів із звичайного кальцій-натрій силікатного скла [80].

Явище докритичного зростання тріщини (ДЗТ) моделюють за допомогою силового закону П. Періса і закону К. Уолкера [65,79]. Силовий закон Е. Еванса і Ш. Вейдерхорна описує функцію швидкості росту тріщини v від коефіцієнта інтенсивності напруження K_I для статичної, динамічної та циклічної втоми [70,71,81]. Схема типових графіків залежності $v - K_I$ представлені на рис.1.12.

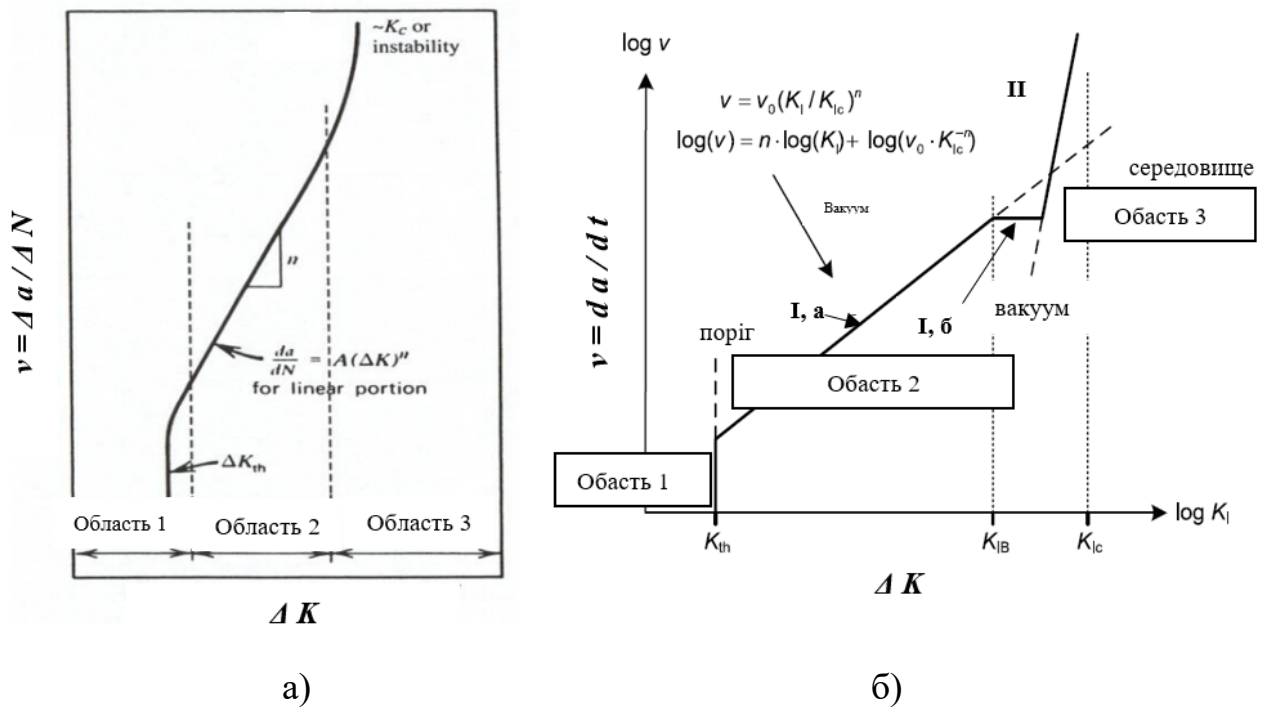


Рис. 1.12. Схема типових графіків росту тріщини при втомі $v - K_I$; а) – для абстрактного матеріалу [82]; б) – для скла [83].

На рис. 1.12 область 1 – це порогова область (ΔK -область) $\Delta K < \Delta K_{th} = \Delta K_{ISCC}$, в якій не спостерігається ріст тріщини, оскільки рівень інтенсивності напружень ΔK не досягає порогового значення інтенсивності напружень $\Delta K_{th} = \Delta K_{ISCC}$ [84]. Межа порогової області 1, в якій v різко зростає при досягненні значення $\Delta K \approx \Delta K_{th}$ представляє собою повільний докритичний ріст тріщини. Область 2 – в загальному, умовно стаціонарна область, що відповідає ділянці кривої на етапі I а, в якій при проміжному рівні напружень $\Delta K_{th} < \Delta K < K_c$ швидкість розповсюдження тріщини v наближається до деякої постійної швидкості, яка практично не залежить від ΔK . В області 3 швидкість росту тріщини v перевищує швидкість в області 2, оскільки рівень інтенсивності напружень ΔK

наближається до критичного значення K_{IC} . При досягненні $K_{max} = K_{IC}$ виникає остаточне нестабільне руйнування [84].

Область 2 є лінійною на ділянці (I, а) та має просте рівняння (див. рис 1.12, б), яке можна інтегрувати для отримання терміну експлуатації, а ріст тріщини в області 2 є найпоширенішим представленням графіка $v - K_I$.

Силова функція залежності росту тріщини $v = da/dt$ від коефіцієнта інтенсивності напружень K_I згідно з Ш. Вейдерхорном [63,74], Т. Мічальське [85]:

$$v = \frac{da}{dt} = A \cdot K_I^n \quad \text{або} \quad \log v = \log A + n \cdot \log K_I, \quad (1.3)$$

де v – швидкість росту тріщини розміром a за час t [63];

A і n – експериментально встановлені константи поширення тріщини для конкретного матеріалу за певних умов; параметр n – відповідає нахилу кривої графіку $v - K_I$ (див. рис. 1.12); константу A – знаходять з рівняння кривої (1.3) при відповідних значеннях v та K_I .

Також силову функцію $v - K_I$ згідно М. Віенса можна представити у вигляді рівняння (1.4)

$$v = v_0 \cdot (K_I/K_{IC})^n \quad (1.4)$$

де v_0 – експериментально отриманий параметр швидкості поширення тріщини, який залежить від матеріалу та умов експлуатації. Швидкість v_0 пов'язана із параметром A через залежність: $A = v_0 \cdot K_{IC}^{-n}$ [83].

Об'єднавши рівняння (1.3) та (1.4), отримаємо розширений вигляд силової функції (1.5) згідно з М. Оверендом [86]:

$$v = \frac{da}{dt} = A \cdot K_I^n = v_0 \left(\frac{K_I}{K_{IC}} \right)^n = v_0 \left(\frac{Y \cdot \sigma_a \cdot \sqrt{\pi a}}{K_{IC}} \right)^n \quad (1.5)$$

При значенні інтенсивності напруження, меншому ніж $K_{th} = K_{ISCC} = 0,3K_{IC}$, незалежно від тривалості навантаження ріст тріщини в склі не відбувається [64]. Для натрієво-кальцієвого силікатного скла, в залежності від середовища при кімнатній температурі $K_{th} = K_{ISCC} = 0,20 \div 0,27 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Якщо інтенсивність

напружень на кінці однієї тріщини K_I досягає або перевищує критичну величину K_{IC} , яку для натрієво-кальцієвого силікатного скла приймають як $0,75 \text{ МПа} \times \text{м}^{0,5}$, виникає миттєве руйнування [64].

Параметр тріщини n – це показник протяжності процесу корозії під напруженням. Чим більше значення n , тим довговічнішим є скло. Для розрахунків, в залежності від умов експлуатації, для натрієво-кальцієвого силікатного скла можна приймати значення $n = 12 \div 16$.

Довговічність скла t_f – це час до руйнування, при якому інтенсивність напружень досягає критичного значення K_{IC} . Проінтегрувавши рівняння (1.4) від початкової довжини тріщини a_i , коли $K = K_I$, до кінцевої критичної довжини тріщини a_c , коли $K = K_{IC}$, отримуємо час до руйнування в інтегральній формі:

$$t_f = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{v} = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{A \cdot (Y \cdot \sigma_a \cdot \sqrt{a})^n} \quad (1.6)$$

Згідно з М. Віенсом [87] та Н. Неметом [79] час до руйнування скла, як функція із силового закону, може бути записана у вигляді рівняння:

$$t_f = B \cdot \sigma_{IC}^{n-2} \cdot \sigma_a^{-n} \quad (1.7)$$

де σ_{IC} – критичні напруження при початковій довжині тріщини, або інертна міцність [63] (при відсутності докритичного зростання тріщини) [87];

B – експериментально встановлений параметр росту тріщини та обчислюється за середнім часом до руйнування при відповідних прикладених напруженнях σ_a :

$$B = \frac{2}{v_0 \cdot Y^2 \cdot (n-2) \cdot K_{IC}^{-2}} \quad (1.8)$$

Таким чином, рівняння (1.7) можна представити у розширеній формі згідно з Х. Шольцем [88]:

$$t_f = \frac{2 \cdot \sigma_{IC}^{n-2} \cdot \sigma_a^{-n}}{Y^2 \cdot (n-2) \cdot A \cdot K_{IC}^{n-2}} \quad (1.9)$$

де Y – коефіцієнт, що рівний $\sqrt{\pi}$, згідно [88].

Час до руйнування, згідно з Т. Мічальске [85] визначають за формулою:

$$t_f = \frac{2 \left[\left(\frac{K_{IC}}{K_{Ii}} \right)^{n-2} - 1 \right]}{(n-2) \cdot A \cdot Y^2 \cdot \sigma_a^2} \quad (1.10)$$

Оскільки дефекти на поверхні скла впливають на несучу здатність конструкцій зі скла, виникає необхідність проведення детальних досліджень поверхні скла, зокрема дослідження поверхні зламу після руйнування скляного зразка.

1.5 Приклади застосування скляних несучих конструкцій у сучасних будівлях і спорудах.

Скляні конструкції використовуються в якості несучих під час будівництва різноманітних будівель, оскільки скло має високу несучу здатність, а проблему крихкого руйнування можна вирішити застосуванням триплексованого скла. У світовій практиці все частіше використовують такі конструкції у сучасних будівлях та спорудах. Нижче розглянуто деякі з них.

Скляні сходи Apple West Manhattan, NY, USA.

Прозорі двоповерхові сходи, центральний несучий барабан та балки які перетинаються в центрі, було виконано з триплексу (рис. 1.13) [89]. Реконструкція старої будівлі дала можливість інженерам запроектувати нові скляні сходи, які в свою чергу не були ядром жорсткості та на які не передавалося навантаження від основних конструкцій будівлі. Центральне ядро підтримувало консольні скляні балки, які в свою чергу підтримували зовнішнє кільце з вигнутих скляних листів. Несучі елементи сходової клітки були виконані з трьох шарів триплексованого хімічно загартованого скла.



Рис. 1.13 Скляні сходи Apple West Manhattan, NY, USA [89]

Glass Atrium Hungarian Academy of Arts

Скляний атриум з двома скляними фасадами і покрівлею, був виконаний без використання металевих чи бетонних елементів, що робило його повністю прозорим (рис. 1.14). Атриум служив вхідним фойє, яке перекривало простір між двома існуючими історичними будівлями які є частиною академії мистецтв. Фасад мав висоту 12 метрів і складався з комбінації прямих та вигнутих багатошарових ребер та балок, таким чином було забезпечено горизонтальну та вертикальну жорсткість [90]. Такі інноваційні архітектурні проекти дозволяють виконати мінімальний дизайн і скло ідеально підходить для таких рішень в якості основних несучих елементів.



Рис. 1.14 Скляний атриум Hungarian Academy of Arts [90].

Grand Hall PVM (Place Ville Marie), Montreal

Павільйон відновленого підземного ресторану у Монреалі був виготовлений зі скляного даху площею 630 кв. м і прольотом 15 м, що стало рекордним розміром у всьому світі для такої конструкції (рис.1.15). Дах був виконаний з 18 скляних панелей, кожна з яких була розміром 15 на 2,5 м і вагою до 5,6 тонн. Панелі опираються на восьмишарові балки з триплексованого скла, причому з'єднання панелей не було видно, тому конструкція даху здається «плаваючою». Головна особливість покрівлі полягала у розмірі скла та товщині балок, які раніше ніколи не встановлювалися таким чином. Для транспортування, встановлення та герметизації панелей на вузькій і вітряній ділянці використовували спеціальне обладнання, виготовлене на замовлення в Німеччині [91].

Для прозорості та легкості покрівлі, несучі кронштейни були попередньо засклені і приховані в стіні, а опори плит і розпірки закриті окантовкою по периметру. Козирки на торцях даху виступали консольно до 4,2 м за межі вхідного фасаду на опорних 14-шарових скляних балках. Закладні деталі з нержавіючої сталі всередині балок були одними з найбільших, які коли-небудь триплексували в такі масивні балки. Розширений аналіз розрахунків підтвердив, що дах витримає навантаження взимку.

Проект був одним з капітальних оновлень в існуючому офісному комплексі PVM в центрі міста. За словами команди інженерів, цей проект створює новий ринок для великогабаритного скла і є великим кроком вперед у будівництві та проектуванні таких конструкцій [91].

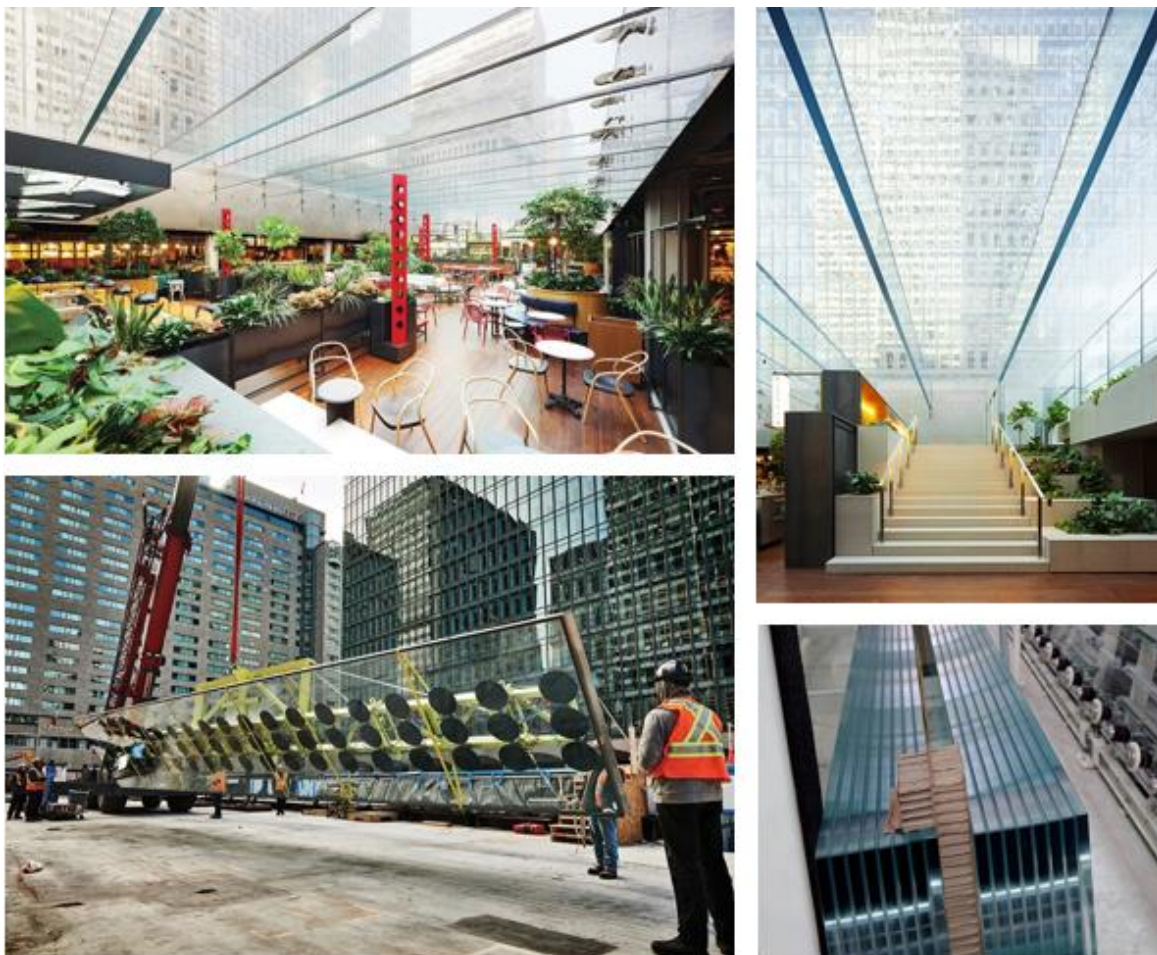


Рис. 1.15. Павільйон підземного ресторану Grand Hall PVM, Montreal [91]

The Crystal Houses facade, Amsterdam

Новий фасад зі скляної цегли був спроектований і розроблений спеціально щоб відтворити оригінальний цегляний фасад колишнього таунхаусу в Амстердамі (рис.1.6. Базуючись на оригінальному фасаді, новий фасад розміром 10 на 12 м., складався з понад 6500 масивних скляних цеглин кожна з яких мала товщину 210 (± 1) мм і висоту 65 ($\pm 0,25$) мм, а також перемичок з литого скла для віконних і дверних прорізів. Щоб досягти повної прозорості фасаду зі скляних цеглин в якості клеючого матеріалу було використано прозорий клей високої міцності, що твердів

під дією УФ-променів. Експериментальна робота над елементами прототипами, показала що міцнісні характеристики системи скляної кладки, а також однорідний оптичний ефект досягаються лише тоді, коли вибраний клей наноситься шаром товщиною 0,2–0,3 мм [92].

У міру підйому по висоті, теракотова цегла змішувалася зі скляною, поступово перетворюючи скляний фасад на традиційний цегляний фасад в межах верхнього поверху. Фасадна стіна була повністю самонесучою системою зі скляної цегли що було унікальним рішенням. Чотири контрафорси, зведені всередину приміщення за допомогою переплетених скляних цеглинок, створювали додаткову жорсткість конструкції.

Ще однією цікавою особливістю даної конструкції був клей. Завдяки міцнісним властивостям клею, скляна цегла і клей працювали як одна жорстка система під навантаженням, що дозволює рівномірно розподіляти навантаження. Розширені дослідження та випробування даного клею показали що він має високу жорсткість на зсув, хорошу міцність на стиск при тимчасовій та тривалій дії навантаження, а також високу вологостійкість. Іншою важливою особливістю клею було його фотокаталітичне затвердіння, що забезпечувало швидкий монтаж конструкції стін: клей міг повністю затвердіти щонайменше за 40 с, після затвердіння він набирав повну міцність і ставав волого- та водостійким.[92].

Скляні цеглини виготовляла італійська компанія Roesia. Кожну цеглину відливали вручну шляхом заливання розплавленого скла у високоточні відкриті сталеві форми. Для високої оптичної якості використовували скло з низьким вмістом заліза. [92].



Рис. 1.16 Скляна кладка The Crystal Houses facade, Amsterdam

1.6 Існуючі методики розрахунку скляних плит.

Методики розрахунку скляних плит поділяють на такі основні методи [93]:

- аналітичні методи розрахунку на основі концепції ефективної товщини;
- чисельне моделювання методом кінцевих елементів з використанням програмних комплексів.

Аналітичний розрахунок скляних багатошарових плит виконується відповідно до європейського проекту норм prEN 16612: 2013 [94] та методу ефективної товщини. У випадку застосування методики prEN 16612, багатошарова плита приводиться до «монолітної – одношарової» плити з так званою ефективною товщиною. Окремо виконується розрахунок нормальних напружень та розрахунок прогинів j -го шару скла [93,95].

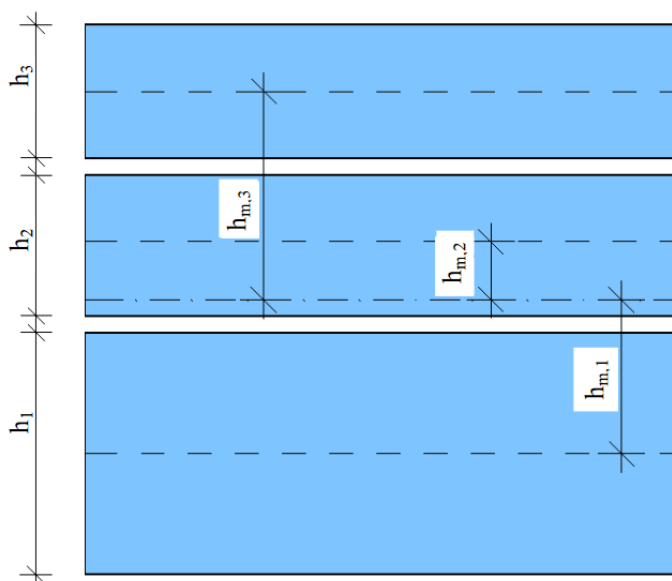


Рис.1.17 Принципові розміри для розрахунку ефективної товщини [94]

Дане приведення ефективної товщини залежить від складу багатошарової плити (тобто від товщини скла та полімерної плівки (див. рис. 1.17)), а також від жорсткості проміжної полімерної плівки через коефіцієнт передачі зсувних зусиль ω . Цей коефіцієнт можна приймати від 0 (без передачі зсуву) до 1 (повна передача зсуву), визначається відповідно до prEN 16613: 2013 [30].

Ефективна товщина для розрахунку нормального напруження j -го шару визначається відповідно до рівняння 1.11, а ефективна товщина для прогину j -го шару – рівняння 1.12 [94]:

$$h_{ef;\sigma;j[ULS]} = \sqrt{\frac{h_{ef,w}^3}{h_j + 2\omega h_{m,j}}} ; \quad (1.11)$$

$$h_{ef,w[SLS]} = \sqrt[3]{\sum_k h_k^3 + 12\omega(\sum_i h_k h_{m,k}^2)} ; \quad (1.12)$$

де ω – коефіцієнт передачі зсуву, залежно від типу проміжного шару [94];

h_k, h_j – товщина окремих шарів скляної плити (див. рис.1.17) [94];

$h_{m,k}, h_{m,j}$ – відстань від центру k - та j - шарів скла до осі багатошарової скляної плити (див. рис.1.17) [94];

Недоліком цього методу є його спрощений спосіб, який нехтує різними граничними умовами та розподілом навантаження на багатошарову скляну плиту.

Чисельне моделювання передбачає створення 2D або 3D моделі кінцевих елементів відповідними інструментами в програмному забезпеченні (наприклад модуль RFEM 4-RF Glass) [23,24,93].

При використанні 2D розрахунку, скляна плита моделюється в розрахунковому комплексі як поверхня, таким чином побудова скінчених елементів заснована на теорії пластин, наприклад Міндліна–Рейсснера (являє собою розширення теорії пластин Кірхгофа–Лява, яка враховує зсувні напруження та деформації по товщині пластини [96–98]).

Чисельне 3D моделювання передбачає побудову моделі скляної плити та її шарів в перерізі. Методика чисельного моделювання в програмному комплексі ANSYS представлено в роботах [99,100].

В Україні наявні на сьогодні розрахункові методики багат шарових скляних плит необхідно уточнювати через невелику кількість проведених досліджень, а їх наявність має несистемний характер, тому необхідні додаткові дослідження скляних плит на згин для можливості отримання нових методик їх розрахунків.

1.7 Висновки до розділу 1

На основі проведеного огляду літературних джерел в розділі 1, можна зробити наступні висновки:

1. Особливістю скляних плит є їх висока несуча здатність, прозорість та естетичний вигляд, тому у світі зростає тенденція до застосування такого типу скляних конструкції в якості несучих. Проте широкого застосування в Україні скляні конструкції не отримали через відсутність загальноприйнятих методик розрахунку, а наявні дослідження мають несистемний характер, тому дана робота є актуальною.

2. Несуча здатність та надійність скла залежить від його виду, технології виготовлення, якості відпалу, стану поверхні, наявності дефектів, а також величини зовнішнього навантаження та тривалості його дії. Великий вплив наявних у склі дефектів отриманих під час його виготовлення, порізки та шліфування на процес тріщиноутворення, а також вплив величини зовнішнього навантаження і наявний

досвід експлуатації скляних конструкцій вказує на необхідність дослідження довговічності їх експлуатації. Тому дослідження довговічності скляних плит на основі лінійно-пружної механіки руйнування дозволить гарантувати їх надійну експлуатацію протягом необхідного часу.

3. Використання методу кореляції цифрових зображень (КЦЗ) в дослідженнях деформацій скляних багатошарових плит показало свою велику ефективність та можливість спостереження за плитами аж до моменту їх руйнування, але отримані в попередніх дослідженнях коефіцієнти приведення мають високі значення. Тому необхідні додаткові дослідження з використанням методу КЦЗ для удосконалення методики випробування із застосуванням цього методу.

4. Наявні на сьогодні рекомендації з розрахунку багатошарових скляних плит побудовані на використанні аналітичних та чисельних методик які необхідно уточнювати через невелику кількість проведених досліджень, тому необхідні додаткові дослідження скляних плит на згин для більш надійної статистики, а також можливості отримання нових підходів до їх розрахунків

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄМИ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. КОНСТРУКЦІЯ СКЛЯНИХ ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ.

2.1 Об'єм експериментальних досліджень.

Згідно поставлених завдань та мети дослідження було розроблено програму досліджень та проведено натурні випробування дослідних зразків скла та скляних плит різних серій (табл.2.1).

Таблиця 2.1

Серії, опис та завдання досліджень

Серія, № п/п	Опис	Завдання дослідження
I	Випробування зразків скла на розтяг при згині.	Визначити міцність на розтяг при згині скла; дослідити поверхню зламаних зразків методом фрактографічного аналізу.
II	Випробування скляних дослідних зразків (балочних плит) на довговічність.	Дослідити скляні балочні плити на довговічність під дією сталого статичного навантаження; отримати залежності між прикладеним зусиллям, часом його дії та деформаціями.
III	Випробування одношарових скляних плит	Дослідити несучу здатність та деформативність скляних плит з різною кількістю шарів; отримати залежності між прикладеним зусиллям та деформаціями плити; отримати залежності між несучою здатністю плит та кількістю шарів скла.
IV	Випробування двохшарових скляних плит	
V	Випробування трьохшарових скляних плит	

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

Для того щоб дослідити міцність скла на розтяг при згині, було виготовлено серію I з двадцяти дослідних зразків зі звичайного флоат-скла з тієї ж партії що і всі плити для даного дисертаційного дослідження. Схему випробування цих дослідних зразків скла було прийнято як для керамічних балок, на трьохточковий згин відповідно до ASTM C158-02 [101]. Схематичне зображення дослідного зразка та схему завантаження показано на рис.2.1.

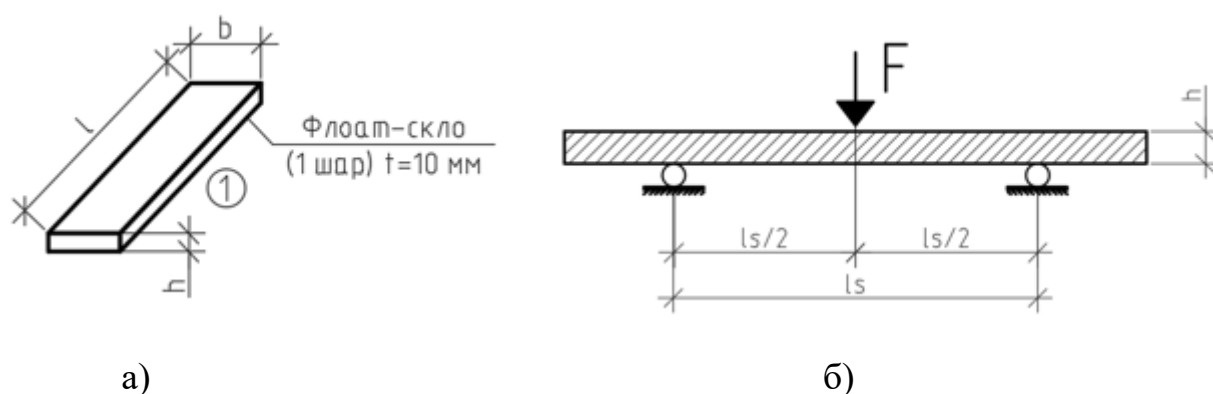


Рис.2.1. Дослідні зразки скла серії I:

а) схематичне зображення дослідного зразка; б) схема випробування скляних зразків на розтяг при згині

Розміри зразків були прийняті відповідно до норм EN 1288-1:2000 [102] та подано у табл. 2.2. Розміри кожної з граней було визначено як середнє арифметичне з трьох замірів, з точністю вимірювань 0,05 мм.

Відповідно до норм [102], зразки серії I були виготовлені з паралельними гранями. Всі дослідні зразки витримувалися в лабораторних умовах перед експериментом не менше ніж 24 год, а підготовка зразків відбувалася відповідно до норм [103].

Також, відповідно до [103], зразки виготовлялися таких розмірів щоб відстань між опорами була меншою від загальної довжини мінімум на 12.7 мм, а співвідношення ширини до товщини була в межах 2:1.. 10:1.

Оскільки зразки були виготовлені одношаровими, для того щоб утримати уламки скла, зразки були загорнуті плівкою перед проведенням експерименту.

Таблиця 2.2

Геометричні розміри скляних зразків. Серія І.

Марка зразка	Ширина b , мм	Довжина l , мм	Товщина h , мм
ПС-1.1	40,05	200,00	9,85
ПС-1.2	40,15	200,00	9,80
ПС-1.3	40,20	200,00	9,80
ПС-1.4	40,35	200,00	9,90
ПС-1.5	40,10	200,00	9,80
ПС-1.6	40,45	200,00	9,90
ПС-1.7	40,50	200,00	9,95
ПС-1.8	40,10	200,00	9,80
ПС-1.9	40,20	200,00	9,80
ПС-1.10	40,45	200,00	9,90
ПС-1.11	40,40	200,00	9,90
ПС-1.12	40,80	200,00	10,10
ПС-1.13	40,90	200,00	10,00
ПС-1.14	40,40	200,00	9,95
ПС-1.15	40,55	200,00	9,90
ПС-1.16	40,40	200,00	9,90
ПС-1.17	40,50	200,00	10,05
ПС-1.18	40,20	200,00	10,05
ПС-1.19	40,50	200,00	10,05
ПС-1.20	41,25	200,00	10,00

2.1.2. Зразки для дослідження на довговічність.

Для проведення експериментів на довговічність скляних балочних плит було виготовлено серію ІІ з двадцяти дослідних зразків. Матеріал дослідних зразків – листове флоат-скло марки М4, згідно з ДСТУ Б В.2.7-122:2009 [20] з наступними рекомендованими фізико-механічними характеристиками: міцність на стиск -700 МПа, міцність на розтяг – 30 МПа, на згин – 15 МПа (характеристична гранична міцність на згин, на яку впливає якість кромки і тип скла – $f_{g.k} = 45$ МПа), густина – 2500 кг/м³ [3,104].

Для визначення експериментального руйнуючого навантаження під час роботи дослідних зразків на згин, попередньо було відібрано чотири дослідних плити з цієї ж серії (ПС-2.1... ПС-2.4) [3], та випробувано їх на трьохточковий згин згідно з ASTM C158-02(2017) [103]. Зразки випробовували на згин під зосередженим навантаженням що рівномірно зростало з певною швидкістю аж до

моменту руйнування. Швидкість прикладання навантаження не перевищувала нормативних значень, що для звичайного скла становило: $1,1 \pm 0,2$ МПа/с згідно з п. 13.2 [103]. Схематичне зображення та схему завантаження дослідного зразка на довговічність показано на рис.2.2.

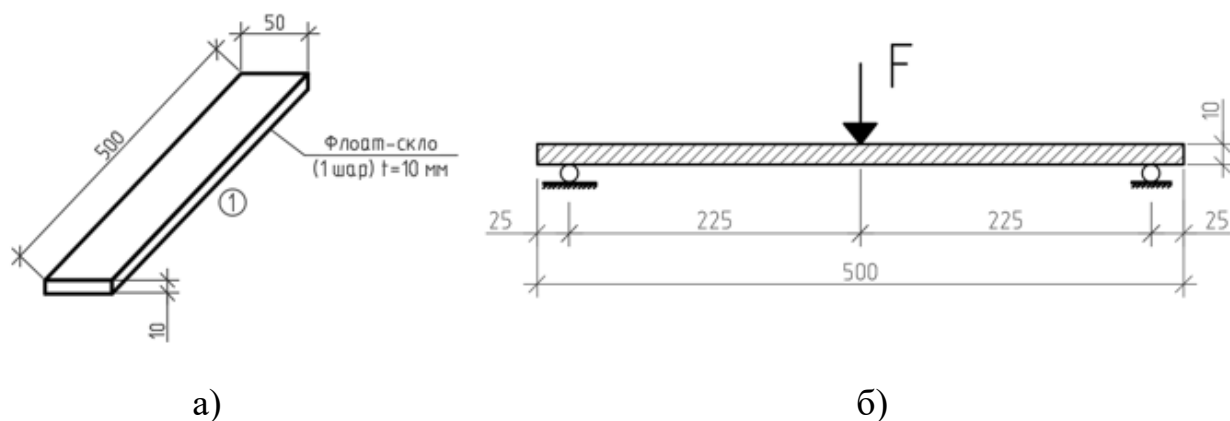


Рис.2.2, а) Схематичне зображення дослідного зразка; б) схема випробування скляних зразків на довговічність

Розміри зразків було виміряно відповідно до норм EN 1288-1:2000 [102] та подано у табл. 2.3. Розміри кожної з граней було визначено як середнє арифметичне з трьох замірів, точність вимірювань 0,05 мм.

Таблиця 2.3

Геометричні розміри скляних зразків. Серія II.

Марка зразка	Ширина b , мм	Довжина l , мм	Товщина h , мм
ПС-2.1	50,10	500,00	9,90
ПС-2.2	50,20	500,00	9,95
ПС-2.3	50,30	500,00	9,95
ПС-2.4	50,20	500,00	9,90
ПС-2.5	49,90	500,00	10,00
ПС-2.6	49,85	500,00	10,10
ПС-2.7	49,90	500,00	10,20
ПС-2.8	50,10	500,00	10,15
ПС-2.9	50,45	500,00	10,15
ПС-2.10	50,30	500,00	10,20

2.1.3. Зразки скляних плит для дослідження на згин.

Щоб дослідити несучу здатність та деформативність скляних плит при згині, згідно поставлених завдань, було виготовлено три серії скляних плит в залежності від кількості шарів скла. Марка скла М4 згідно [20] (табл.2.4).

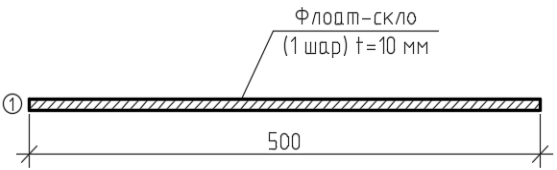
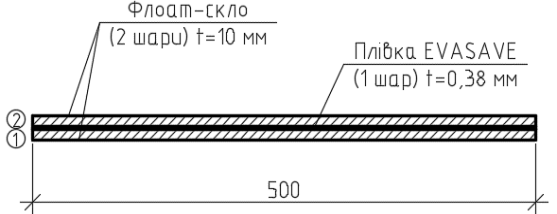
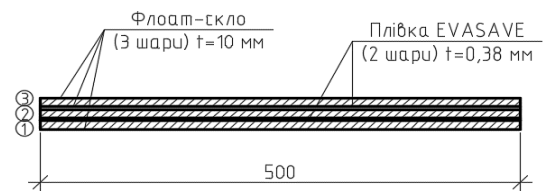
Серія III з плит марки ПС-3 була виготовлена з одношарового звичайного листового флоат-скла, товщиною 10 мм і розміром в плані 500x500 мм.

Серія IV з плит марки ПС-4 була виготовлена двохшаровою, з партії скла аналогічного як для серії ПС-3. Два шари скла товщиною 10 мм кожен, ламіновані між собою за допомогою полімерної плівки.

Серія V з плит марки ПС-5 була виготовлена трьохшаровою, аналогічного до серії плит ПС-4.

Таблиця 2.4

Геометричні розміри скляних плит. Серія III - V.

Серія	Марка зразка	Розміри в плані, мм	Товщина h, мм	Конструкція (в перерізі)
III	ПС-3.1	500x500	9,99	
	ПС-3.2		9,92	
	ПС-3.3		9,91	
	ПС-3.4		9,96	
	ПС-3.5		9,90	
	ПС-3.6		9,94	
IV	ПС-4.1	500x500	20,38	
	ПС-4.2		20,30	
V	ПС-5.1	500x500	30,68	
	ПС-5.2		30,48	

Усі двохшарові і трьохшарові плити були виготовлені за допомогою технології триплексування: між шарами скла вкладали полімерну плівку EVASAVE товщиною 0,38 мм, після цього плити під тиском витримували в термокамері при температурі 130°C протягом 30 хв.

2.2. Методики експериментальних досліджень.

Для досягнення поставленої мети, було розроблено методику випробування скляних дослідних зразків та скляних балочних плит на довговічність. Також було удосконалено методику випробування скляних плит з різною кількістю шарів скла із застосуванням методу кореляції цифрових зображень.

2.2.1. Методика випробування міцності скла на розтяг при згині.

Для визначення фізико-механічних характеристик скла на згин було випробувано Серію І з двадцяти скляних зразків. Розміри зразків та характеристики зразків див. п.2.1.1. Вигляд дослідної установки та схема завантаження представлена на рис.2.3.

Випробування зразків цієї серії проводили в лабораторії Державної вищої школи технічно економічної ім.к.с. Броніслава Маркевича в Ярославі, під керівництвом д.т.н., проф. Демчини Б.Г.

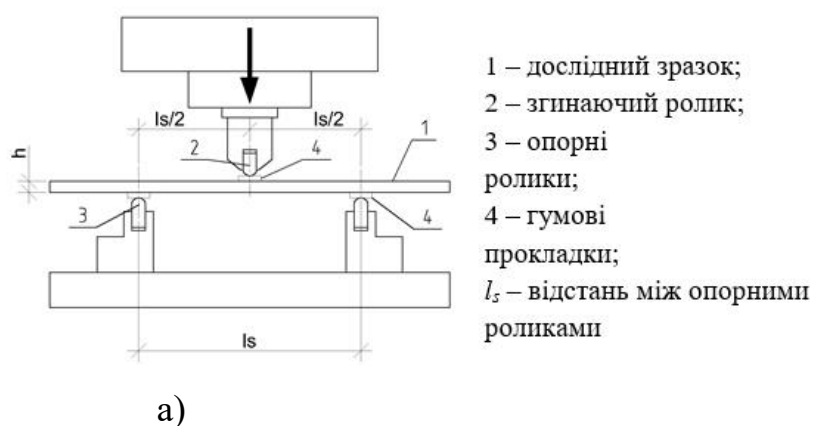


Рис.2.3 Випробувальна установка: а) – принципова схема установки;

б) загальний вигляд установки

Зразки випробовували на згин під зосередженим навантаженням яке рівномірно збільшувалось з певною швидкістю аж до моменту руйнування. Швидкість прикладання навантаження не перевищувала нормативних значень, що для звичайного скла становила: $1,1 \pm 0,2$ МПа/с згідно з п. 13.2 ASTM C158–02 (2012) [101], та $2 \pm 0,4$ Н/(мм²·с) згідно EN 1288-1:2000 [102]. Для випробування даної серії зразків, використовували автоматичний прес LabTest, з відповідним програмним забезпеченням «Test & Motion plus» (рис. 2.4).

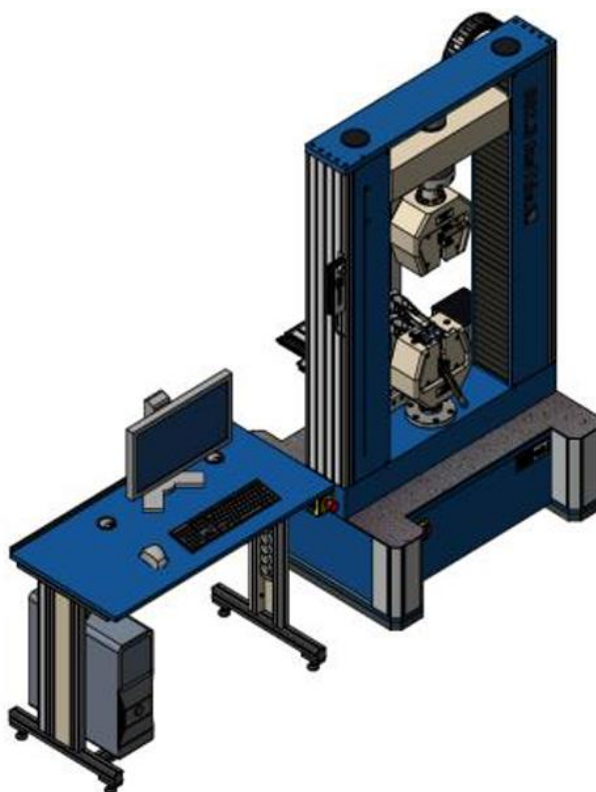


Рис. 2.4 Загальний вигляд пресу LabTest

Відповідно до норм [102], скляні зразки встановлювалися на опорні ролики через гумові прокладки, відстань між роликами складала $l_s = 100$ мм. Початкове навантаження було таким, що не перевищувало напруження 25% від середнього модуля на розрив [103].

Всі випробування проводили при сталій температурі та вологості повітря в лабораторії, а саме температура повітря становила $23 \pm 1^\circ\text{C}$, відносна вологість була в межах $40 \pm 70\%$. Зразки попередньо витримували в лабораторії протягом 24 год.

Програмне забезпечення «Test & Motion plus» давало можливість поводити моніторинг всіх необхідних показників під час проведення досліду в режимі реального часу.

Границя міцності на згин (MOR) для скляних дослідних зразків, знаходилася за класичною формулою аналогічно як для балки на трьохточковий, згідно норм ASTM C1161 [105]:

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

де, $\sigma_{flex} = \sigma_{bB}$ – міцність на згин МПа, відповідно до [106];

F_{max} – максимальне руйнівне навантаження, Н;

l_s – відстань між опорами, мм;

b – ширина скляного зразка, мм;

h – висота скляного зразка, мм.

Швидкість приросту напруження в скляному зразку визначалася згідно п.8.1.3 ASTM C158 [101]:

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

де, R – швидкість приросту напруження, МПа/с;

$\frac{\Delta F}{\Delta t}$ – швидкість прикладання навантаження, Н/с;

l_s – відстань між опорами, мм;

b – ширина скляного зразка, мм;

h – висота скляного зразка, мм.

2.2.2. Методика випробування скляних зразків балочних плит на довговічність.

Для випробування скляних зразків на довговічність згідно з програмою досліджень (див. п.2.1.2.) було розроблено спеціальну методику випробувань. Завдання полягало в необхідності розробити установку таким чином, щоб можна

було випробовувати скляні зразки на різні значення стабільного статичного навантаження, яке діяло протягом тривалого часу і при цьому мати можливість вимірювати деформації плити впродовж усієї тривалості випробування. [3] Загальний вигляд та схему випробувальної установки показано на рис.2.5.

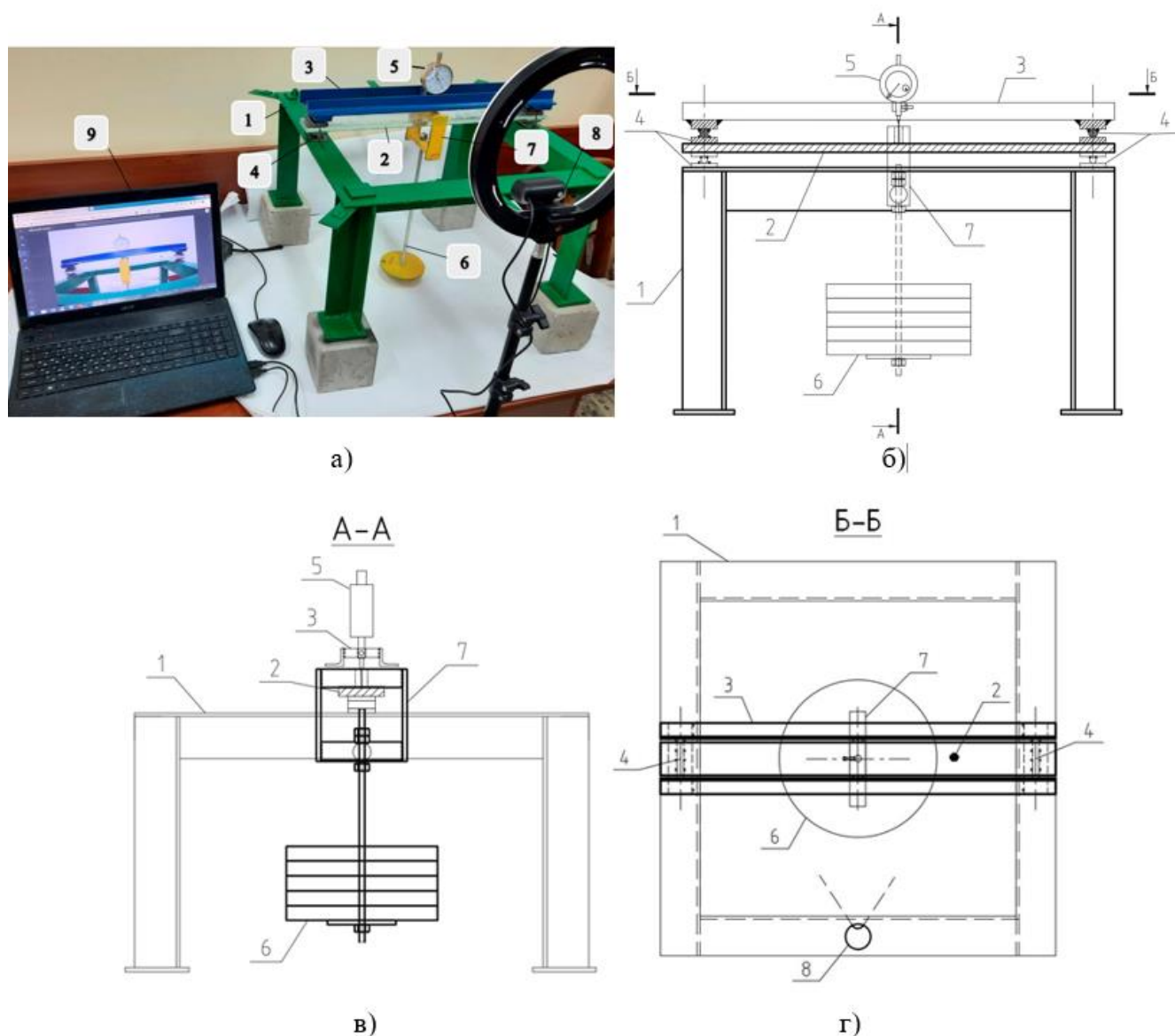


Рис. 2.5. Установка для випробування балочних плит на довговічність:
 а) загальний вигляд; б) схема, фронтальний вигляд; в) вигляд А-А; г) вигляд Б-Б; де: 1 – опорний металевий столик, 2 – скляна випробувальна плита, 3 – металева рамка для кріплення вимірювального приладу, 4 – шарнірні опори, 5 – мікроіндикатор годинникового типу, 6 – вантаж, 7 – рамка для кріплення вантажу, 8 – відеокамера, 9 - ПК.

Методика випробування скляних балочних плит на довговічність полягала у наступному. Дослідний зразок скляної плити 2 встановлювали на опорний металевий столик 1, виготовлений з металевого кутника (L50x5). Обпирання плити відбувалося через шарнірно-рухому та шарнірно-нерухому опори 4. Зовнішнє вертикальне постійне статичне навантаження F на скляну плиту створювалося підвішеними вантажами 6 через металеву рамку з валиком 7. Рамка 7 була підвішена до скляної плити по середині прольоту, та мала отвір у валику для вимірювання прогинів плити [14]. Вантажі 6 були виконані з металевого кругляка які перед проведенням випробування ретельно зважували.

Під дією постійного статичного навантаження, скляна плита прогиналася. Для заміру вертикальних переміщень (прогинів) плити використовували мікроіндикатор годинникового типу 5 з ціною поділки 0,01 мм, який був нерухомо закріплений на рамці 3. За допомогою мікроіндикатора заміряли прогини посередині плити через отвір у валику. В свою чергу, рамка 3 була виготовлена з металевого кутника (L20x3) та опиралася на скляну плиту через шарнірні опори 4, що виключало необхідність вимірювати осідання опор. Таким чином, за допомогою мікроіндикатора вимірювали прогини скляної плити від початку її навантаження до моменту руйнування плити. Для постійної фіксації показів мікроіндикатора, а також моменту руйнування плити, використовувалася відеокамера YI Dome Camera 360° - 8, яка виконувала відео зйомку в режимі реального часу протягом всього часу проведення експерименту та записувала трансляцію на ПК - 9.

Згідно даної методики, скляна плита працювала як шарнірно обперта однопролітна балка, навантажена статичним вантажем. Величина постійного статичного навантаження на плиту приймалася як частина від руйнуючого навантаження отриманого експериментальним шляхом для аналогічних зразків за такою ж схемою завантаження, згідно ASTM C158-02(2017) [103]. Зображення з відеокамери в процесі випробування та після руйнування дослідного зразка представлено на рис.2.6.



Рис.2.6 Зображення з відеокамери YI Dome Camera 360°: а) в процесі випробування, б) після руйнування дослідного зразка

Перед проведенням випробування на довговічність, попередньо було випробувано чотири дослідних плити з цієї ж серії (ПС-2.1... ПС-2.4) для визначення експериментального руйнуючого навантаження. Зразки випробовували під зосередженим навантаженням на трьохточковий згин згідно з ASTM C158-02(2017) [103], аналогічно методиці як для зразків Серії I (див. п.2.2.1). Загальний вигляд та схему випробування зразків ПС-2.1... ПС-2.4 показано на рис.2.7.

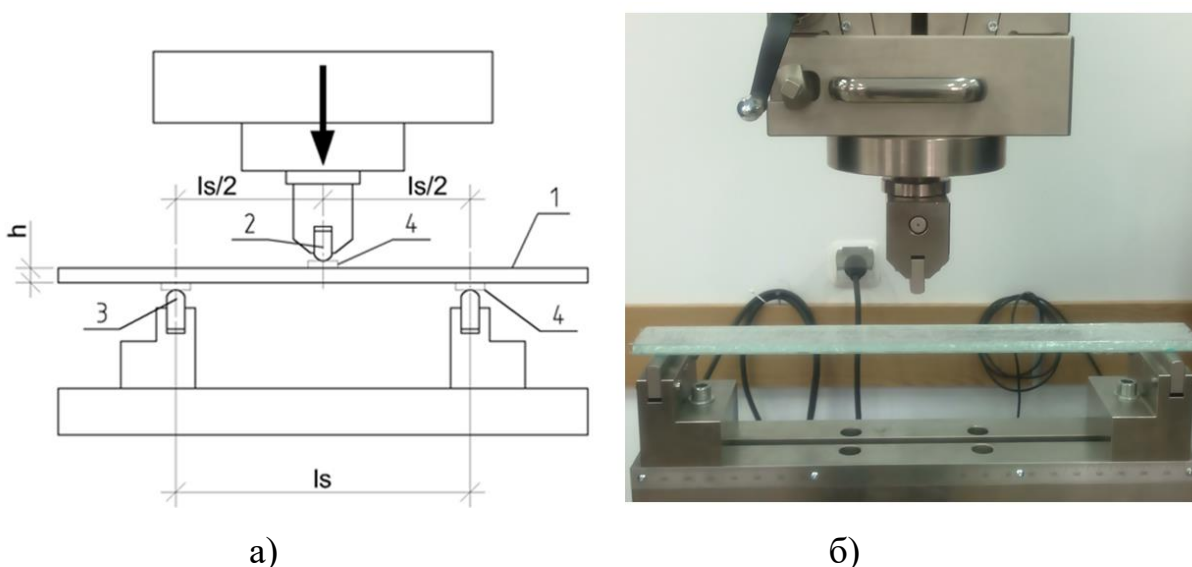


Рис.2.7. Установка для випробування зразків на трьохточковий згин: а) принципова схема установки (де: 1 – дослідний зразок, 2 – згинаючий ролик, 3 – опорні ролики, 4 – гумові прокладки, l_s – відстань між опорними роликами); б) загальний вигляд установки.

2.2.3. Методика визначення несучої здатності та деформативності скляних одношарових та багатшарових плит які працювали на згин.

Згідно з програмою досліджень (див. п.2.1.3) було випробувано скляні плити серій III, IV, V з різною кількістю шарів скла. Плити випробовували на кафедрі Будівельних конструкцій та мостів в приміщенні науково-дослідної лабораторії НДЛ-23 Національного університету «Львівська політехніка».

Установка для випробування скляних плит на згин від дії зосередженої сили була виготовлена по аналогії як для випробування скляних багатшарових плит з різних типів скла [39,52]. В ході випробувань установку було удосконалено, зокрема використання оптичного методу вимірювання деформацій, а саме кореляції цифрових зображень (КЦЗ). Загальний вигляд випробувальної установки показано на рис. 2.8. Схему випробувальної установки представлено на рис.2.9.



Рис. 2.8. Загальний вигляд випробувальної установки скляних плит на згин, де: 1 – скляна плита, 2 – металева опорна рамка, 3 – штамп, 4 – шарнірні опори, 7 – зона фотофіксації КЦЗ, 8 – гідравлічний домкрат, 9 – кільцевий динамометр, 10 – ПК, 11 - фотокамера.

Випробування скляних плит проводили зі сталим температурно-вологісним режимом, прийнятим аналогічно зразкам серії I (див. п. 2.2.1). Температура повітря в лабораторії становила $23 \pm 1^\circ\text{C}$, відносна вологість була в межах $40 \pm 70\%$. Зразки попередньо витримували в лабораторії протягом 24 год.

Одношарові та багатошарові плити випробовували за наступною методикою. Скляну плиту 1 встановлювали на опорну металеву рамку 2, яку виготовлено з металевого кутника. Обпирання плити відбувалося через шарнірні опори 4: шарнірно-рухому кульову та шарнірно-нерухому кульову опору (допускали поворот у двох взаємно перпендикулярних напрямках та розташованих по діагоналі), а також шарнірно-рухому циліндричну, та шарнірно-нерухому циліндричну опору (допускали поворот в одному з напрямків, які теж розміщені по діагоналі) [52]. Таким чином плита працювала на згин у двох напрямках і була вільно оперта на шарнірні опори (рис. 2.9).

Зовнішнє вертикальне навантаження F на скляну плиту прикладали через металевий штамп 3 ступенями по 0,5-1,0 кН (залежно від серії плит) та витримували по 5 хв кожен ступінь. Навантаження від гідравлічного домкрату 8 передавали через кільцевик з тарованим динамометром 9, для контролю величини прикладеного навантаження на плиту.

Для вимірювання відносних деформацій поверхні скляної плити використовували механічні індикатори годинникового типу зі шкалою поділки 0,001 мм: у верхній зоні два взаємоперпендикулярних індикатори, Ів-1 – біля штампу, Ів-2 – аналогічно методиці замірів КЦЗ, та у нижній зоні Ін – біля штампу. Додатково для вимірювання відносних деформацій використовували оптичний метод кореляції цифрови зображень (КЦЗ), для цього на плиту було нанесено спеціальну зону фотофіксації 7 а зміни в зоні фотофіксації записували в режимі реального часу за допомогою фотокамери 11 на ПК 10 (див. рис. 2.8).

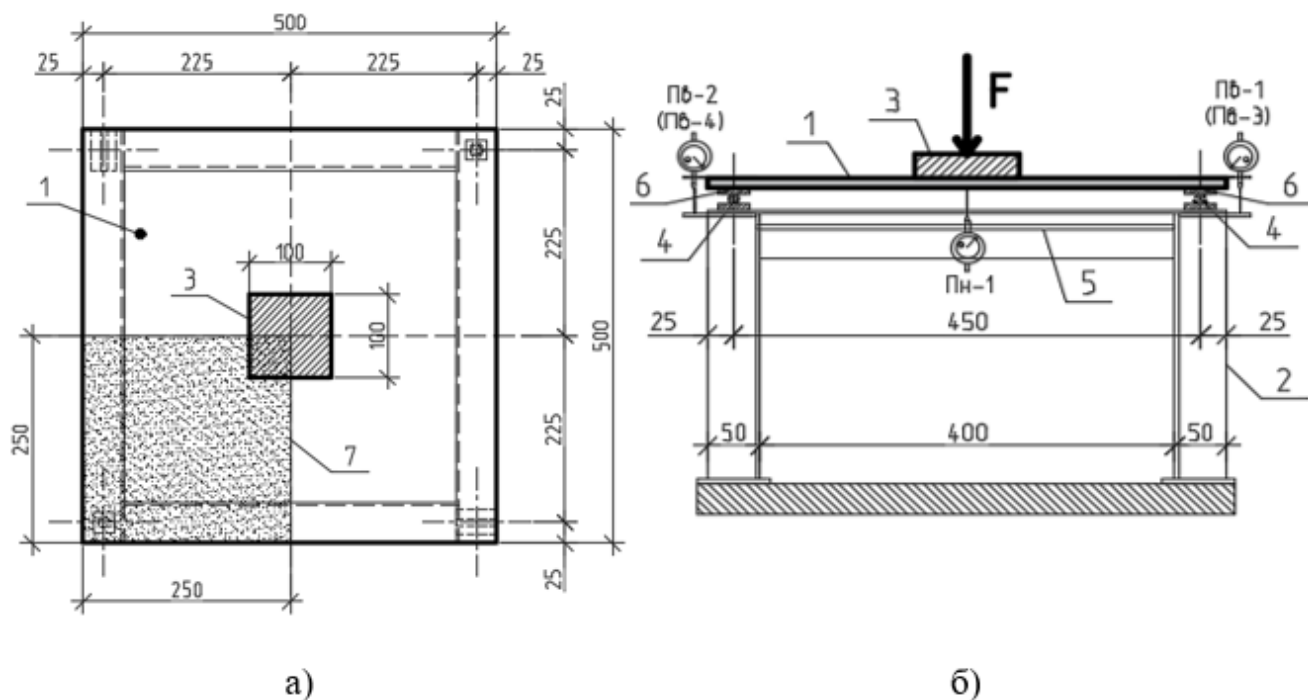


Рис. 2.9. Схема випробувальної установки скляних плит на згин: а) – вигляд установки зверху; б) – фронтальний вигляд установки, де: 1 – скляна плита, 2 – металева опорна рамка, 3 – штамп, 4 – шарнірні опори, 5 – планка для кріплення прогиноміра знизу, 6 – гумові прокладки; 7 – зона фотофіксації КЦЗ.

Вимірювання вертикальних переміщень плити (прогинів) виконували за допомогою механічних індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм: у нижній зоні Пн-1, та чотирьох індикаторів на опорах Пв-1, Пв-2, Пв-3, Пв-4. Схему розташування приладів показано на рис. 2.10.

Скляні плити навантажували ступенями до руйнування. Механічні індикатори були зняті з плити коли навантаження на плиту досягало 0,7 від розрахункового руйнівного навантаження. Вимірювання деформацій методом КЦЗ проводили аж до руйнування плити, що є вагомою перевагою даного методу.

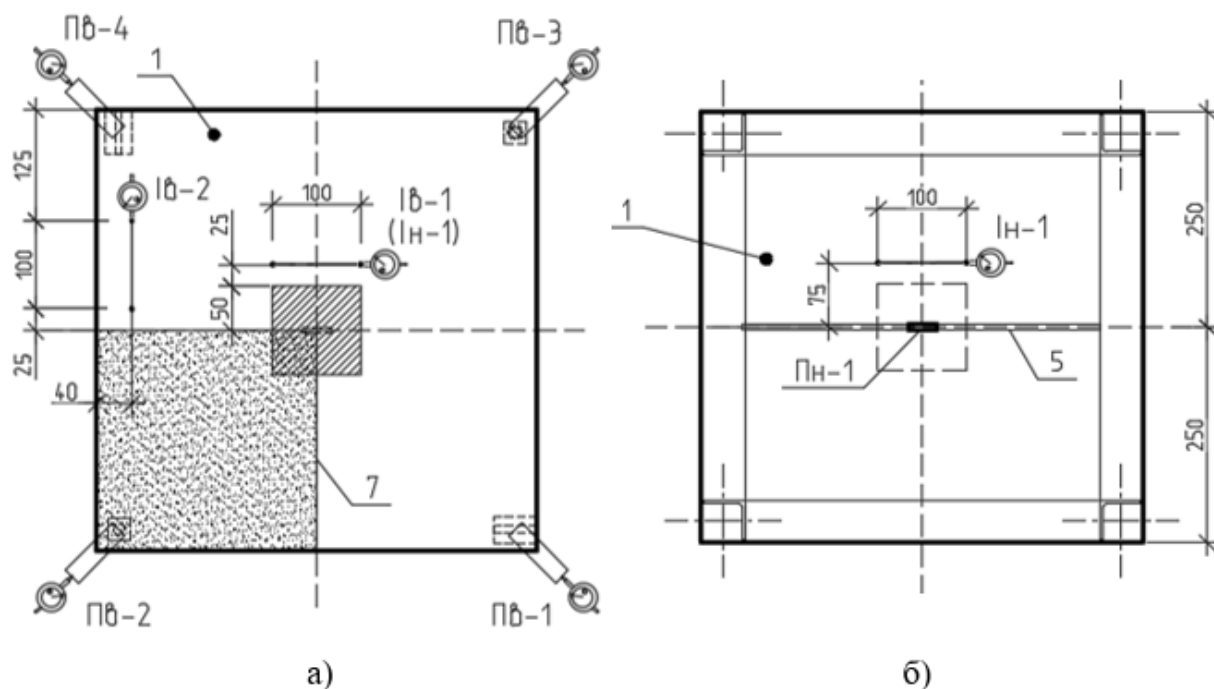


Рис.2.10 Схема розташування приладів: а) схема розташування індикаторів Ів-1, Ів-2 та Пв-1..Пв-4 зверху; б) схема розташування індикаторів Ін-1 та Пн-1 знизу, де: 1- скляна плита, 5 – планка для кріплення Пн-1; 7 – зона фотофіксації КЦЗ.

2.2.4. Методика вимірювання деформацій скляних плит з використанням методу кореляції цифрових зображень (КЦЗ)

Окрім механічних індикаторів годинникового типу, для дослідження відносних деформацій скляних плит, було додатково використано оптичний метод вимірювання деформацій – кореляцію цифрових зображень (КЦЗ). Перевагою даного методу є можливість вимірювати деформації аж до моменту руйнування, на відмінну від механічних приладів які необхідно знімати з випробувальної установки при $0,7F$, оскільки є ймовірність пошкодити прилади.

На сьогоднішній день метод КЦЗ, також відомий як метод цифрової спекл-кореляції, став одним з найбільш широко використовуваних оптичних методів для вимірювання переміщень та деформацій. Вперше метод КЦЗ був представлений Саттоном на початку 1980-х років і протягом останніх трьох десятиліть зазнавав безперервних модифікацій та значних удосконалень [107]. Найбільш простим

варіантом КЦЗ є застосування однієї камери, такий метод застосовується для двовимірних площинних вимірювань (2D-КЦЗ). Також відомі тривимірні вимірювання (3D-КЦЗ) [107], які виконуються з використанням двох камер в стерео конфігурації.

Окрім високої точності вимірювань, метод КЦЗ має ряд інших переваг, які включають: відносно просту експериментальну установку, нескладну підготовку дослідних зразків або відсутність такої, а також невисокі вимоги до вимірювального середовища. Все це зробило метод КЦЗ надзвичайно популярним серед експериментальних досліджень в галузях матеріалознавства, виробництва, механічної, біомедичної та будівельної інженерії [108–115].

Основний принцип КЦЗ полягає в порівнянні двох цифрових зображень, отриманих в різних станах (наприклад, одне до деформації, а інше після), поверхні, що має випадковий спекл-паттерн, шляхом поділу зображення на підмножини з декількох пікселів, а потім математичного зіставлення цих підмножин між двома зображеннями (на основі рівнів інтенсивності) для визначення нового розташування кожної підмножини на другому зображенні. На основі цього можна отримати карту деформації всього поля. [107,116] Загалом, метод 2D-КЦЗ може бути використаний для вимірювання деформацій при дотриманні трьох умов:

- дослідний зразок має плоску поверхню;
- дослідний зразок зазнає деформацій у площині вимірювання;
- оптична вісь камери має бути перпендикулярна до поверхні зразка.

Якщо будь-яка з цих трьох умов не виконується в достатній мірі, точність вимірювань буде скомпрометована, а отримані значення деформацій матимуть похибку [107]. Принцип роботи методу КЦЗ показано на рис.2.11 [111].

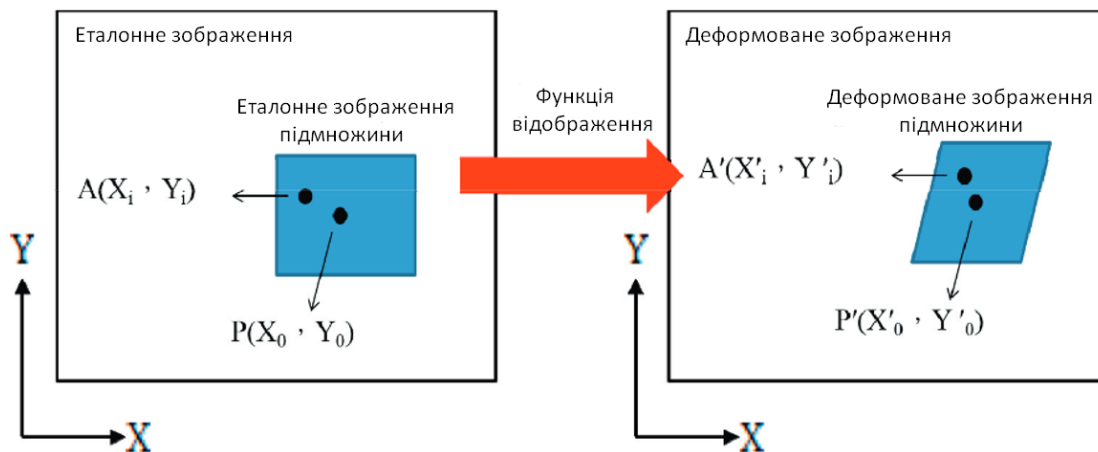


Рис. 2.11. Принцип роботи методу КЦЗ

Для скляних плит серій III, IV, V було використано метод КЦЗ для заміру деформацій плити. Для цього на поверхню плит наносили спекул-поверхню в 1/4 частині плити за допомогою білої та чорної аерозольної фарби (рис.2.12). Зону для фотофіксації методу КЦЗ та механічні індикатори годинникового типу розташовували симетрично плиті таким чином, щоб можна було співставити отримані результати деформацій екстензометрів у ідентичних зонах плити.

Значною мірою на точність отриманих результатів впливає масштабування, точність розміщення фотокамери (перпендикулярність осі камери до площини вимірювання [107]) та фокусна віддаль. Для точного масштабування отриманих фото при їх подальшій обробці, під час підготовки поверхні плити було нанесено клейку лінійку з масштабом (рис.2.12).

Для дослідів було використано цифровий без дзеркальний фотоапарат SONY a6000 із 24.3 мега піксельною матрицею типу APS-C CMOS. Розмір сенсора 23.5 x 15.6 міліметрів та розширенням 6058x4012 пікселів. Розмір одного пікселя при цьому становить 3.88 мікрметри. Для усунення опуклості було використано об'єктив із фокусною віддаллю в еквіваленті 50 мм. Зображення фіксувались у форматі ARW, для більш детальної подальшої обробки та підготовки в спеціалізованому програмному забезпеченні. Рекомендації щодо застосування методики 2D КЦЗ на поверхні скляних плит із використанням цифрового без дзеркального фотоапарату SONY a6000 представлено у Додатку Г.

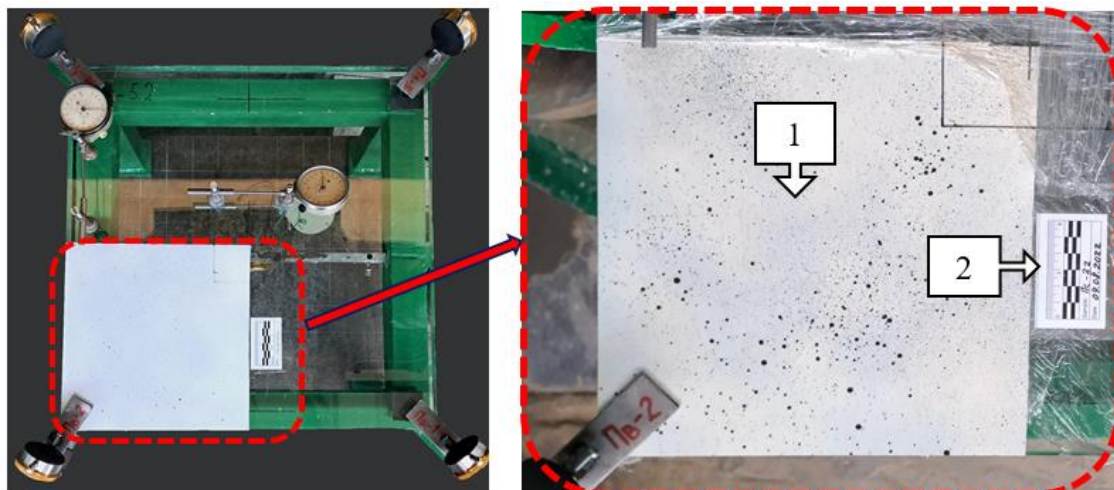


Рис.2.12. Загальний вигляд зони фотофіксації, де 1- скл-поверхня нанесена аерозольною фарбою; 2 – лінійка для масштабування.

Методика використання методу КЦЗ полягала у наступному. Скляну плиту встановлювали на опори та випробовували згідно методики описаної у п.2.2.3. Фотокамеру нерухому закріплювали на металевій рамі, при цьому вимірювали необхідну фокусну віддаль і вирівнювали камеру щоб оптична вісь камери була перпендикулярною до площини вимірювання. Установку для вимірювання деформацій методом КЦЗ показано на рис. 2.13.

Під час кожного етапу навантаження, після витримки 5 хв, дистанційно фотографували поверхню на фотокамеру. Отримані дані експерименту одразу записували на ПК для подальшої обробки результатів.

Пізніше було завантажено всі отримані дані у програму GOM Correlate та проведено детальний аналіз результатів. Таким чином отримано зображення деформованої поверхні скляної плити для кожного етапу навантаження. Було проведено порівняльний аналіз отриманих значень відносних деформацій отриманих методом КЦЗ та за допомогою механічних індикаторів годинникового типу. За еталонні значення прийнято результати абсолютних деформацій отримані механічним способом.



Рис. 2.13 Установа для вимірювання деформацій методом КЦЗ

2.2.5. Методика аналізу міцності скла на розтяг при згині за допомогою ймовірно-статистичного методу на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла

Міцність скла визначається зокрема станом його поверхні і залежить від мікроскопічних дефектів на поверхні скла, які можуть бути невидимі неозброєним оком. Існує велика варіація міцності на згин, отриманої при випробуванні ідентичних зразків, які виготовляються, зберігаються і випробовуються на руйнування в однакових умовах. Тому для встановлення точної розрахункової міцності, що відповідає достатньо низькій ймовірності руйнування, необхідно проводити випробувань декількох номінально ідентичних зразків скла і подальший статистичний аналіз даних їхньої міцності [117].

Скло схильне до докритичного росту тріщин, тому дані про міцність отримані в результаті випробувань, часто виражають у вигляді еквівалентної за часом міцності. Існує три статистичні розподіли, які використовують для опису

даних про міцність: Вейбулла, нормальний та логнормальний. Найчастіше надається перевага 2-параметричному розподілу Вейбулла, оскільки він більш точно описує дані про міцність скла, ніж нормальний і логнормальний розподіли [117]. Як результат, розподіл Вейбулла є усталеним способом опису даних про міцність скла як у наукових дослідженнях [1,50,117,118], так і в інженерному застосуванні [119,120].

Загальне рівняння для кумулятивної функції розподілу Вейбулла (CDF – cumulative distribution function) згідно EN 61649:2008 [120] має вигляд:

$$CDF = F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.3)$$

де β - параметр форми (модуль Вейбулла);

η - параметр масштабу;

t – параметр змінної (час, напруження, цикли, тощо);

Щоб побудувати діаграму Вейбулла необхідно знайти подвійний натуральний логарифм кумулятивної функції Вейбулла, таким чином CDF стає лінійним графіком і рівняння розподілу Вейбулла набуває вигляду:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) = \beta \cdot \ln(t) - \beta \cdot \ln(\eta) \quad (2.4)$$

Та відповідає лінійному рівнянню регресії:

$$y_i = \beta \cdot x_i + b \quad (2.5)$$

де $y_i = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right)$ – ордината діаграми Вейбулла, яка залежить від ймовірності відмови параметра $F_i(t)$ – який в свою чергу обчислюється для i -го значення даних t_i ; $x_i = \ln(t)$ – абсциса діаграми Вейбулла яка обчислюється для i -го значення даних t_i .

Відповідно до норм EN 61649:2008 [120], для оцінки даних згідно розподілу Вейбулла, за критерій згоди було прийнято коефіцієнт кореляції R , або R^2 – коефіцієнт детермінації.

Згідно EN 572-1:2004 [33], характеристичну міцність скла на згин $f_{g,k,5\%}$ визначають при квазістатичному навантаженні для 5% ймовірності руйнування та нижньою межею довірчого інтервалу 95%.

Квантильна функція розподілу Вейбулла (інверсна функція CDF) для визначення характеристичного значення міцності скла має наступний вигляд [120]:

$$t_a = F^{-1}(t_a) = CDF^{-1} = \eta[-\ln(1 - \alpha)]^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.6)$$

де α – значення ймовірності відмови $F(t)$.

2.2.6. Методика проведення фрактографічного аналізу дослідних зразків.

Визначення критеріїв тріщиностійкості скляних зразків з випробувань міцності скла на розтяг при згині.

Після випробування скляних зразків на міцність при згині (див. п. 2.2.1) було проведено фрактографічний аналіз площини зламу та перевірку стану поверхні скляних зразків. Фрактографічний аналіз виконували за допомогою цифрового USB мікроскопа, а отриману інформацію записували на ПК. Схема установки представлена на рис. 2.14.

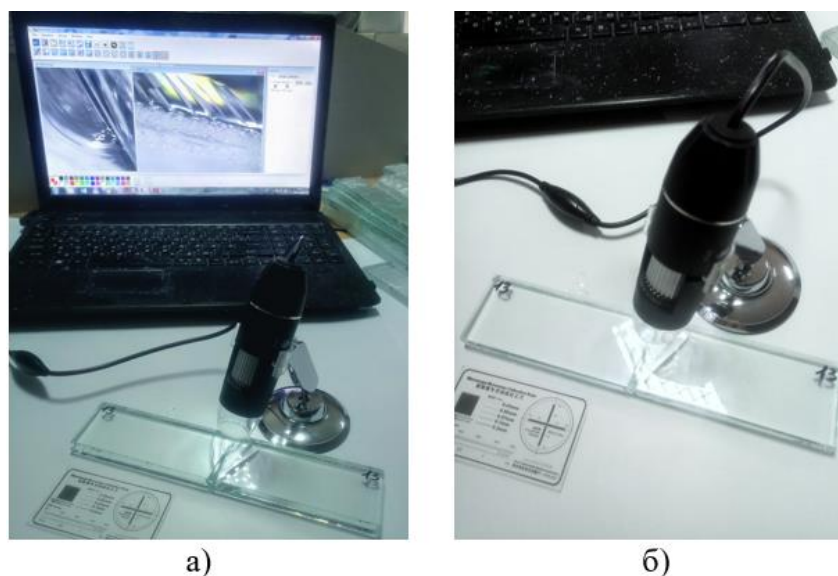


Рис. 2.14. Установка для проведения фрактографического анализа: а) общий вид установки; б) общий вид цифрового USB микроскопа

Для подальшого розрахунку критеріїв тріщиностійкості (див. п.1.4) були проведені вимірювання параметрів на поверхні руйнування дослідних зразків за допомогою калібрувальної масштабної лінійки що була у комплектації монокулярного цифрового USB мікроскопа. Оптичний мікроскоп який був застосований – це монокулярний оптичний мікроскоп Magnifier Ultra Zoom 1000X,

розмір матриці 0,3 мегапікселя, роздільна здатність фото – 1920x2560 пікселів, фокусна віддаль до об'єкта – 15 мм. Для отримання даних випробувань, використовували відповідне програмне забезпечення на ПК для даної моделі мікроскопа – «Digital Microscope Measurement 2.0.». Вигляд поверхні зруйнованих зразків під мікроскопом показано на рис. 2.15. Отримані дані критеріїв тріщиностійкості і розгалуження тріщин можуть використовуватися в розрахунках на довговічність.

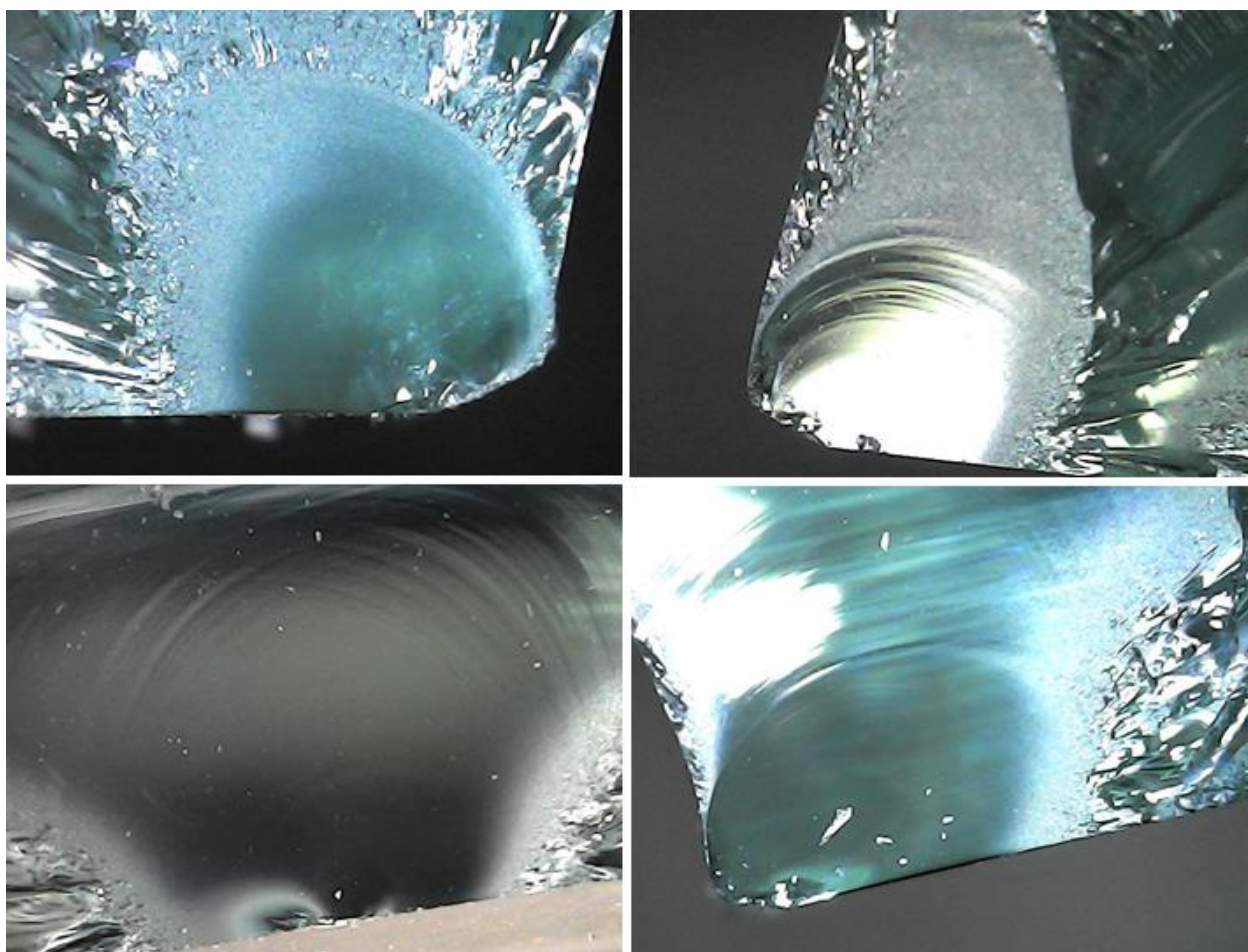


Рис. 2.15. Вигляд поверхні зруйнованих зразків Серії І.

2.3 Висновки до розділу 2

1. Запроектовано та виготовлено скляні зразки для випробування на міцність та балочні плити для випробування на довговічність, скляні плити з різною кількістю шарів (одно-, дво- та трьохшарові за технологію триплексування) для

випробування на несучу здатність та деформативність, що склало загалом п'ять серій дослідних зразків.

2. Було удосконалено та апробовано методику випробування несучої здатності та деформативності скляних одношарових та багатошарових плит, які працювали на згин від зосередженого навантаження посередині та були вільно оперті на шарнірні опори по чотирьох кутах.

3. Розроблено методику випробування скляних балочних плит на довговічність, згідно якої скляні зразки працювали як шарнірно оперта однопролітна балка, навантажена статичним вантажем з постійною фіксацією деформацій на протязі усього часу випробування.

4. Представлено методику досліджень скляних зразків на міцність та визначення фізико-механічних характеристик скла.

5. Апробовано методику використання фрактографічного аналізу поверхні зламу дослідних зразків що випробовувалися на міцність. Представлено методику визначення основних критеріїв тріщиностійкості за допомогою мікроскопа.

6. Було удосконалено методику вимірювання деформацій зовнішніх поверхонь скляної плити за допомогою оптичного методу кореляції цифрових зображень (КЦЗ).

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Серія I. Фізико-механічні характеристики скляних зразків

Дослідні зразки випробовували на розтяг при згині за методикою описаною в п.2.2.1. Характер та схема руйнування скляних дослідних зразків які були випробувані на розтяг при згині, відповідали схемі руйнування як для керамічних зразків згідно норм [105]. Було випробувано двадцять скляних балочних зразків серії I (див. п.2.1.1), з яких лише в одному дослідному зразку марки ПС-1.12 початок руйнування (точка початку утворення тріщини) знаходилася по середині зразка, всі інші зразки зруйнувалися від краю грані (рис. 3.1). Аналогічно як і для високоміцної кераміки, всі дослідні зразки зруйнувалися більше ніж на дві частини.

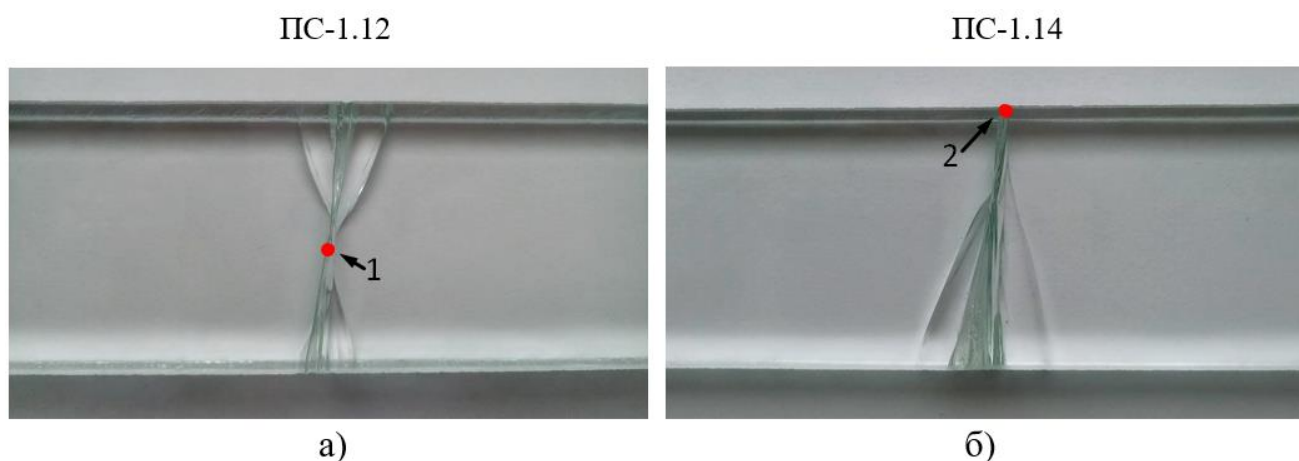


Рис. 3.1 Вигляд зразків після руйнування;

а) зразок марки ПС-1.12; б) зразок марки ПС-1.14;

де початок руйнування: 1 – по середині зразка; 2- від краю грані.

Випробовували скляні зразки за допомогою використання програмного забезпечення «Test & Motion plus», що давало можливість поводити моніторинг навантаження та фізико-механічних характеристик в режимі реального часу. Після завершення експерименту у протоколі випробувань були побудовані графіки прогинів від навантаження (рис. 3.2). Результати випробувань для дослідних зразків серії I наведено у табл. 3.1.

Швидкість прикладання навантаження $\Delta F/\Delta t$ для даної серії зразків була прийнята 20 Н/с. Параметр збільшення напруження не перевищував 1,05МПа/с згідно вимог нормативних документів (див.п.2.2.1).

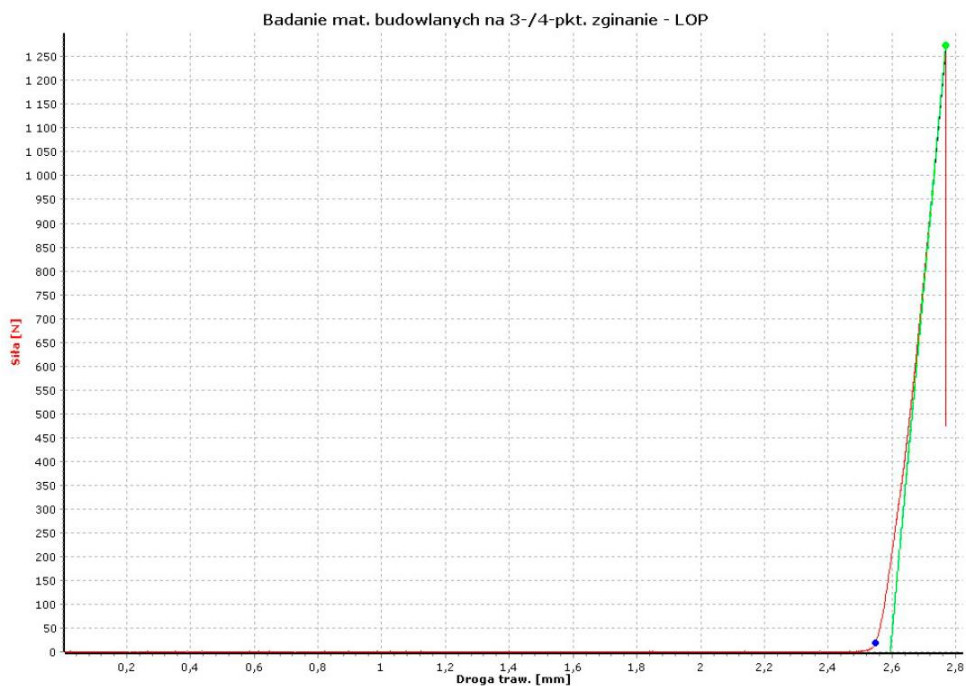


Рис. 3.2 Графік залежності прогинів від навантаження для дослідного зразка
ПС-1.1 згідно протоколу випробувань

Таблиця 3.1

Результати випробувань дослідних зразків. Серія І.

Марка зразка	Максимальне навантаження F_{max} , кН	Час до руйнування t_f , с	Міцність на розтяг при згині σ_{bB} , Н/мм ² (МПа)	Максимальний прогин u , мм
ПС-1.1	1,525	76,3	57,22	0,21
ПС-1.2	1,272	63,6	47,73	0,18
ПС-1.3	1,860	93,0	69,77	0,25
ПС-1.4	1,498	74,9	56,19	0,20
ПС-1.5	1,114	55,7	41,78	0,16
ПС-1.6	1,421	71,1	53,31	0,19
ПС-1.7	1,734	86,7	65,06	0,23
ПС-1.8	1,392	69,6	52,21	0,20
ПС-1.9	1,768	89,3	66,30	0,24
ПС-1.10	1,436	71,8	53,85	0,20
ПС-1.11	1,326	66,3	49,73	0,18
ПС-1.12	1,357	67,9	50,91	0,18
ПС-1.13	1,561	78,1	58,56	0,21
ПС-1.14	1,201	60,1	45,06	0,17
ПС-1.15	1,616	80,8	60,60	0,22
ПС-1.16	1,727	86,3	64,77	0,24
ПС-1.17	1,139	56,9	42,73	0,15
ПС-1.18	1,424	71,2	53,43	0,19
ПС-1.19	1,726	86,3	64,74	0,22
ПС-1.20	1,727	86,4	64,74	0,23

Міцність скла на розтяг при згині σ_{bV} була в межах 41,78 – 69,77 МПа.

Для аналізу параметрів міцності було використано один з найбільш широко використовуваних розподілів - розподіл Вейбулла. Цей статистичний підхід використовується для опису варіації механічних властивостей багатьох матеріалів, зокрема кераміки та скла. Тому аналіз отриманих результатів міцності скла на згин був виконаний за допомогою двопараметричної функції розподілу Вейбулла [8].

На рис.3.3 подано діаграму розподілу Вейбулла для діапазону отриманих значень міцності на розтяг при згині. Діаграма побудована за допомогою електронних таблиць Microsoft Excel.

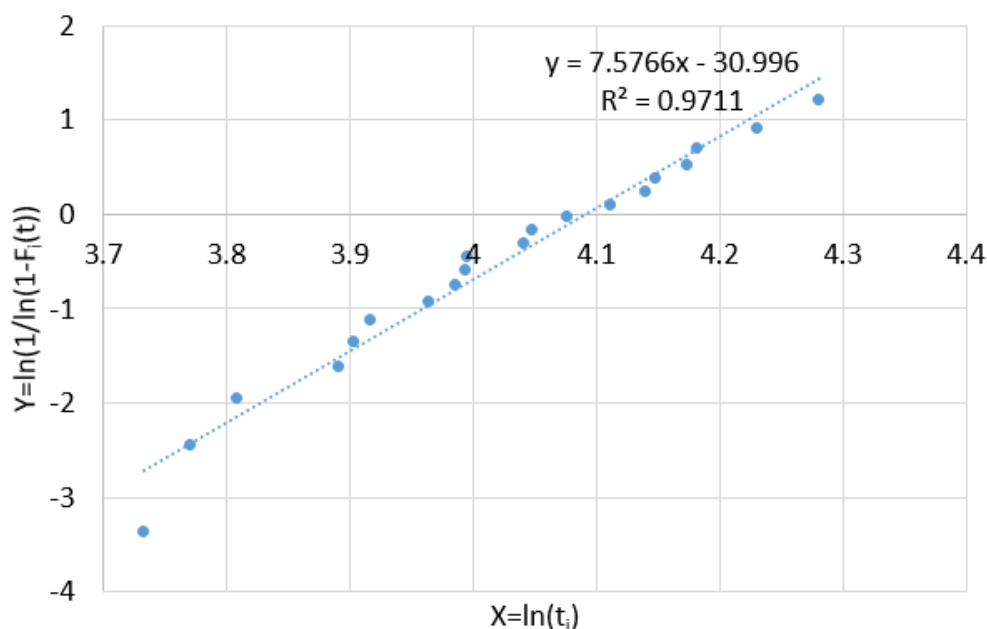


Рис.3.3 Діаграма розподілу Вейбулла для значень міцності скла. Серія I.

На діаграмі (див. рис.3.3) тенденція даних міцності на розтяг при згині описана за допомогою регресії (прямої лінії). Де $y_i = \ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F_i(t)}\right)\right]$ – ордината графіку яка залежить від значення ненадійності або ймовірності відмови (руйнування) $F_i(t)$, яка в свою чергу обчислюється як середній ранг для i -го значення даних t_i ; $x_i = \ln(t_i)$ – абсциса графіка, яка залежить від i -го значення даних t_i [8].

Оскільки візуальна оцінка показує близькість даних до прямої лінії регресії, це вказує на відповідність розподілу Вейбулла для аналізу даних міцності, згідно EN 61649:2008 [120]. В результаті аналізу, було визначено квадрат коефіцієнта

кореляції, як статистичний критерій згоди - $R^2 = 0,97$. Оскільки застосування даного розподілу дало можливість отримати R^2 близький до 1, можна стверджувати, що розподіл Вейбулла можна використовувати для аналізу міцнісних параметрів скла [52].

Також, за результатами досліджень було визначено основні параметри розподілу Вейбулла[8]:

- модуль Вейбулла становить $\beta = 7,57$;
- значення міцності скла на розтяг при згині, що відповідає коефіцієнту руйнування 5%, який визначається з рівнем довіри 95%, становить $f_{gk,5\%} = 40,4$ МПа;
- значення міцності скла на розтяг при згині, при якому ймовірність відмови становить 63,2% за Вейбуллом (В63,2) - $\eta = 59,8$ МПа;
- середня міцність скла на розтяг при згині $\mu(t) = 55,93$ МПа;

Характеристичне значення міцності скла на розтяг при згині визначали за допомогою кватильної функції (2.6) залежно від параметрів η і β для межі відмови 5% та з нижнім рівнем довірчого інтервалу 95%. Таким чином, характеристичне значення міцності скла на розтяг при згині склало $f_{gk,5\%} = 40,4$ МПа.

3.2. Серія II. Довговічність скляних зразків.

Для визначення експериментального руйнуючого навантаження дослідних балочних плит серії II, що випробовувались на довговічність (див. п. 2.1.2.), попередньо було випробувано чотири зразки з цієї ж серії на трьохточковий згин за методикою яка описана у п.2.2.2. [3,11]

Характер та схема руйнування дослідних зразків що були випробувані на розтяг при згині, відповідали схемі руйнування як для керамічних зразків. Всі дослідні зразки зруйнувалися більше ніж на дві частини, а початок руйнування у всіх чотирьох зразків був від краю грані (рис. 3.4). Результати випробувань для дослідних зразків марки ПС-2.1...ПС-2.4 на розтяг при згині наведено у табл. 3.2. Для випробувань дослідних зразків марки ПС-2.1...ПС-2.4 було використано

програмне забезпечення «Test & Motion», яке давало можливість виконувати моніторинг параметрів в режимі реального часу. Графік залежності прогинів від навантаження з протоколу випробувань показано на рис. 3.5.

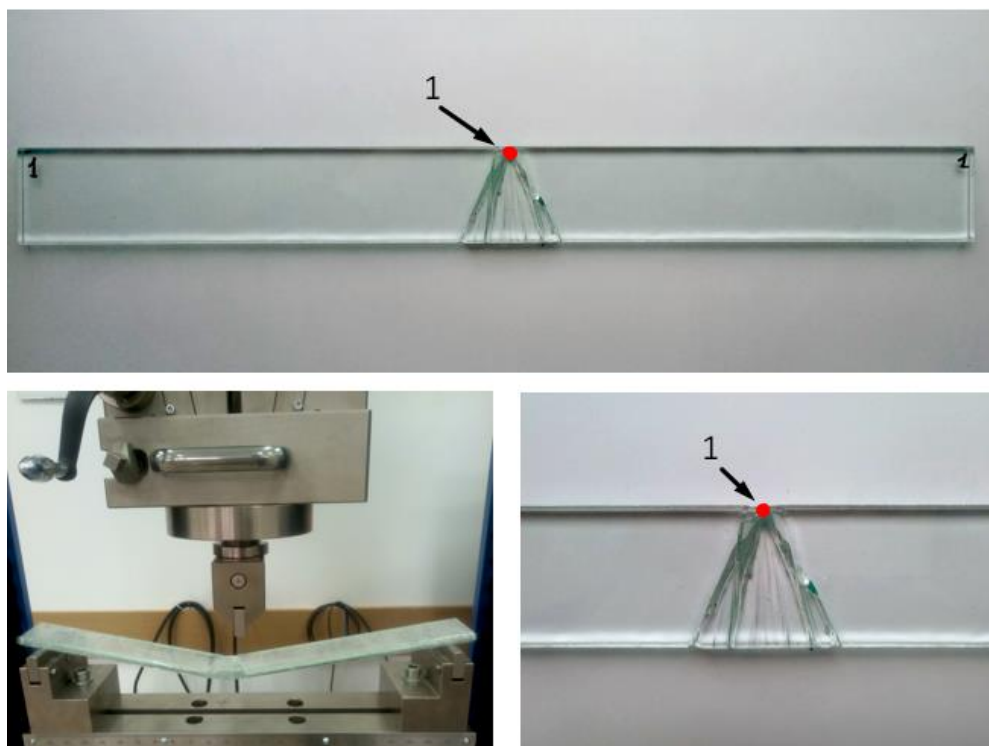


Рис.3.4 Вигляд зразка марки ПС-2.1 після руйнування (вигляд зверху);
де 1 – початок утворення тріщини від кромки

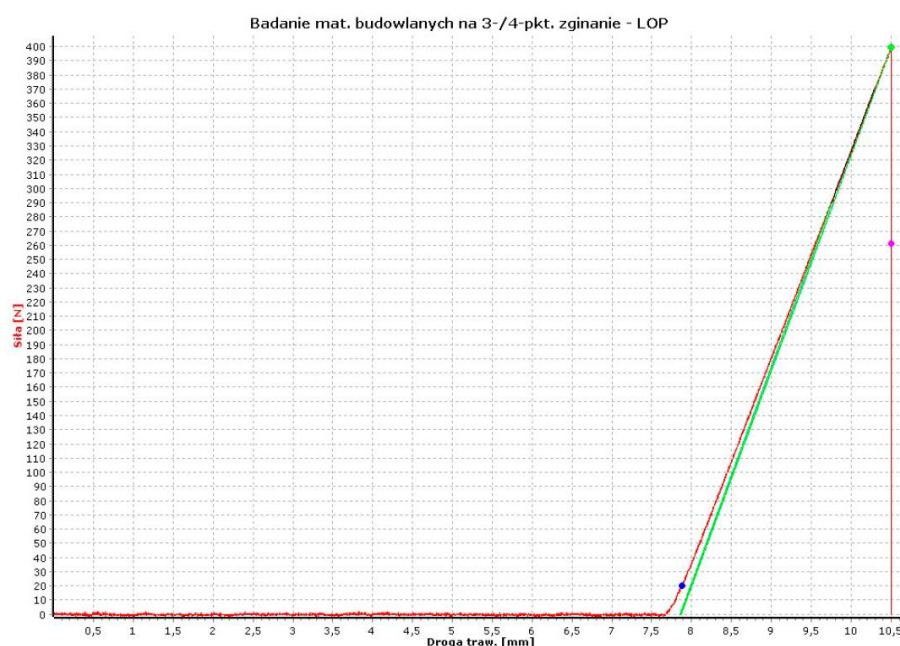


Рис. 3.5 Графік залежності прогинів від навантаження для дослідного зразка
ПС-2.1 згідно протоколу випробувань

Таблиця 3.2

Результати випробувань дослідних зразків балочних плит на міцність.

Марка зразка	Максимальне навантаження F_{max} , кН	Час до руйнування t_r , с	Міцність на розтяг при згині σ_{bV} , Н/мм ² (МПа)	Максимальний прогин u , мм
ПС-2.1	0,399	57,1	53,91	2,65
ПС-2.2	0,381	54,4	51,48	2,48
ПС-2.3	0,395	56,5	53,45	2,62
ПС-2.4	0,521	71,6	67,68	3,32

Міцність балочних плит на розтяг при згині σ_{bV} була в межах 51,48 – 67,68 МПа. Для подальших випробувань балочних плит на довговічність, за основу було прийнято усереднене значення максимального руйнівного навантаження $F_{max} = 0,39$ кН [3].

Наступним етапом випробувань було дослідження довговічності скляних балочних плит марки ПС-2.5..ПС-2.10 згідно представленої методики випробувань у п.2.2.2 [14]. Було прийнято прикладати навантаження на скляні зразки з різними значеннями частки від руйнівного навантаження F_{max} , для різних марок балочних плит (табл. 3.3).

Руйнування дослідних зразків при випробуванні на довговічність, характеризувалось утворенням тріщини по середині прольоту яка розвивалась від верхнього краю грані [3]. Вигляд дослідних зразків після випробування на довговічність представлено на рис.3.6. Значення руйнуючих навантажень та максимальних прогинів для досліджуваної серії зразків на довговічність представлено у табл. 3.3.

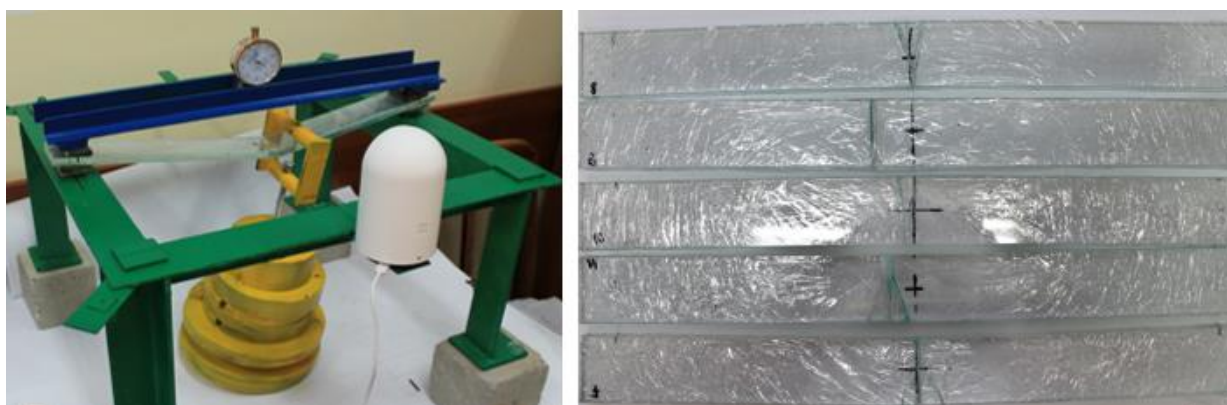


Рис. 3.6. Вигляд дослідних зразків після руйнування

Таблиця 3.3

Результати випробування дослідних зразків на довговічність

Марка зразка	Величина навантаження від руйнівного	Навантаження F_{max} , кН	Час під навантаженням $t_{сер}$, хв.	Максимальний прогин u , мм
ПС-2.1	F	0,399	0,9	2,65
ПС-2.2		0,381	0,86	2,48
ПС-2.3		0,395	0,9	2,62
ПС-2.4		0,521	1,15	3,32
ПС-2.5	0,75F	0,294	95	2,02
ПС-2.6			62	1,78
ПС-2.7	0,7F	0,274	117	1,69
ПС-2.8			98	1,50
ПС-2.9	0,6F	0,234	638	1,42
ПС-2.10			587	1,47

В результаті отриманих даних було побудовано графік залежності часу від навантаження (рис. 3.7).

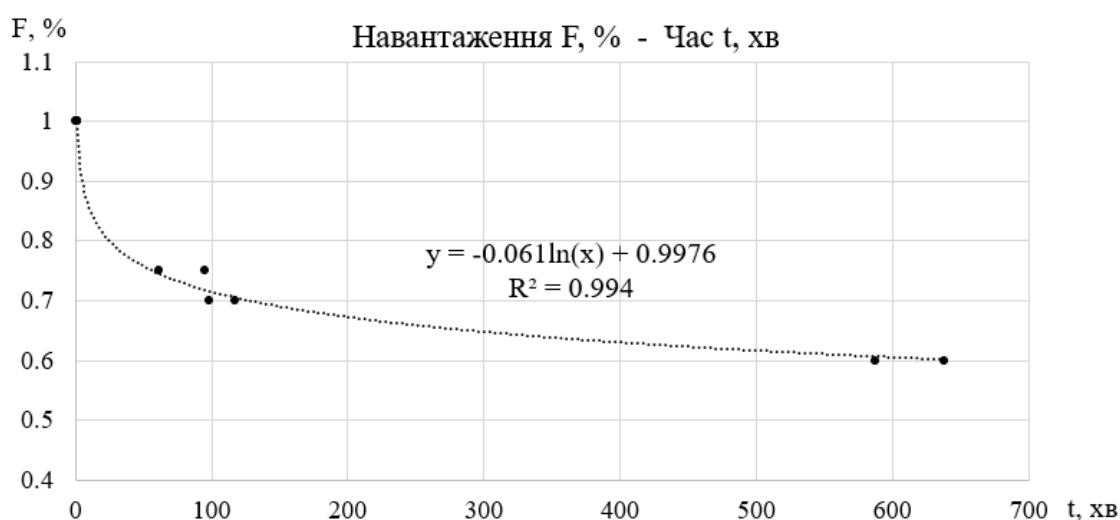


Рис. 3.7. Графік залежності часу від величини зовнішнього навантаження для дослідних зразків марки ПС-2.1... ПС-2.10

На графіку (рис.3.7) можна прослідкувати наступну закономірність: зі зменшенням навантаження зростає час випробувань, що є логічним [3].

Математичні залежності представлені графіку (рис.3.7) отримані за допомогою апроксимації експериментальних результатів дослідження, за

допомогою логарифмічної кривої. Залежність навантаження – час має параметр збіжності $R^2 = 0,994$, що свідчить про високу збіжність отриманих результатів та ефективну методику проведення досліджень на довговічність.

3.3. Несуча здатність та деформативність скляних плит.

Було проведено випробування скляних плит серій III, IV та V згідно з програмою досліджень (див. п. 2.1.3) за представленими методиками (див. п. 2.2.3). Робота скляних плит відповідала схемі вільно опертих плит, які працювали на згин у двох взаємно перпендикулярних напрямках тому що були шарнірно оперті по чотирьох кутах [37,38,52].

3.3.1. Серія III. Скляні одношарові плити.

Вигляд плит після руйнування показано на рис.3.8. Для усіх плит початок руйнування відбувався з раптовим утворенням тріщини у нижній зоні посередині плити. Характер руйнування дослідних зразків відповідав звичайному натрієво-силікатному склу, з утворенням перехресних тріщин що поширювалися від центру (місця прикладання навантаження через штамп) у двох взаємно перпендикулярних напрямках до вільних граней плити [12].

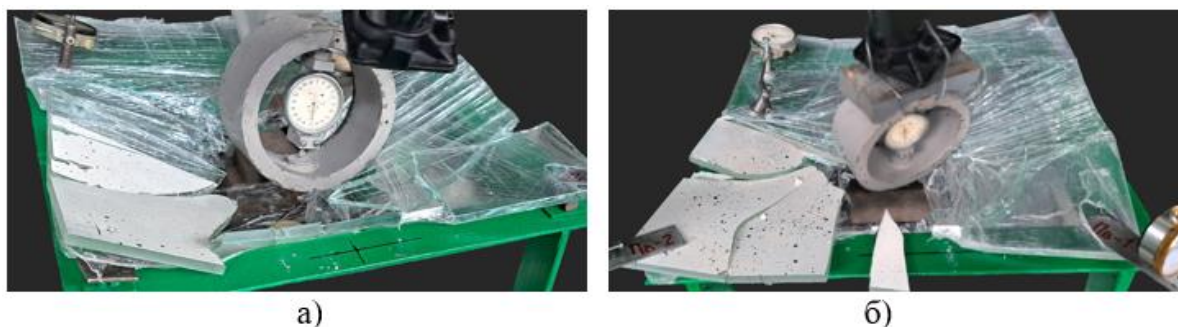


Рис. 3.8. Вигляд скляних плит після руйнування:

а) плита марки ПС-3.1; б) плита марки ПС-3.2

В процесі проведення випробувань на кожному етапі завантаження заміряли граничні прогини та відносні деформації плити. На рис.3.9 наведено графіки залежності граничних прогинів від навантаження, побудовані на основі отриманих результатів випробування плит серії III. Як видно з рис.3.9, прогини зростали

рівномірно зі збільшенням навантаження. При цьому на графіках спостерігалось їх пружна робота аж до крихкого руйнування для всіх випробуваних плит [12].

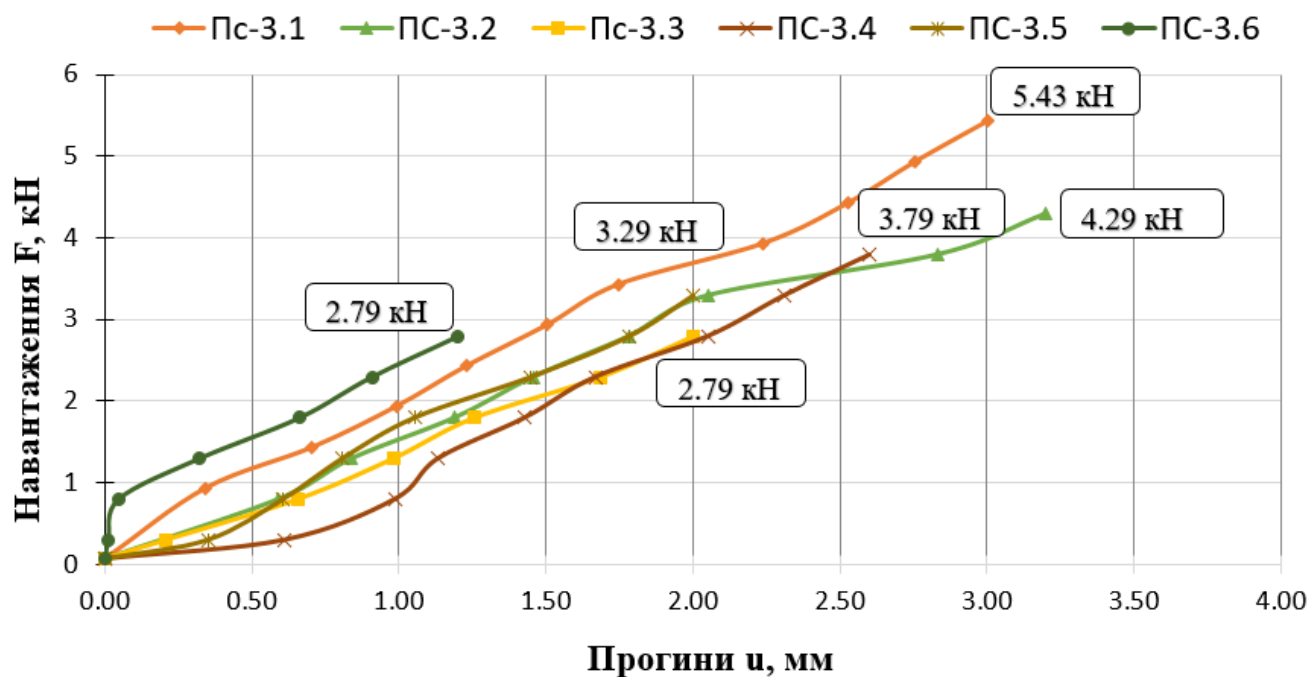
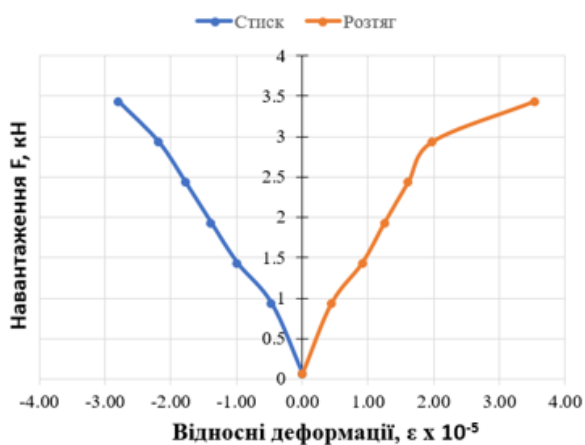
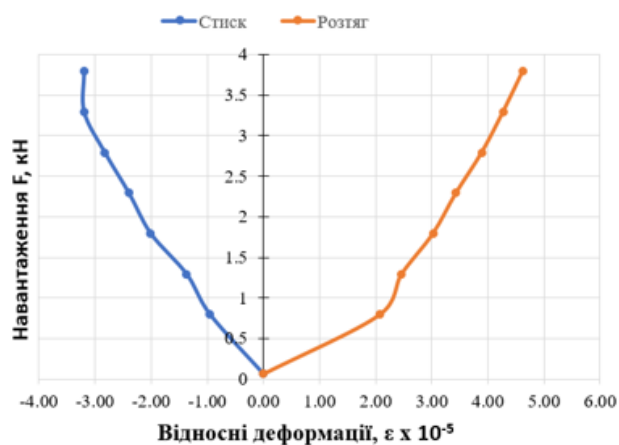


Рис. 3.9. Графіки залежності прогинів від навантаження для плит серії III

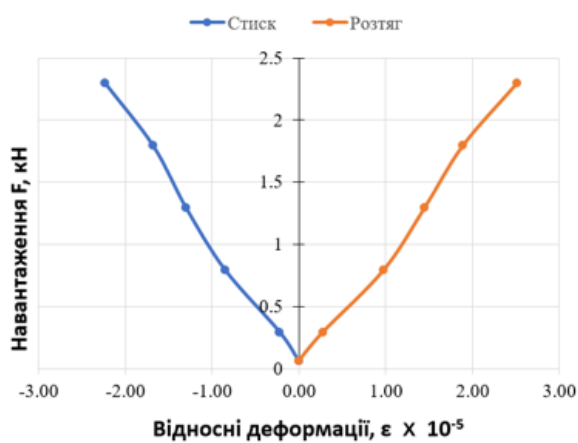
Згідно отриманих даних вимірювань за допомогою мікроіндикаторів, були визначені відносні деформації скла. Графіки розподілу відносних деформацій для скляних плит наведено на рис.3.10. У всіх плитах серії III мікроіндикатори у верхній зоні показали деформації стиску, у нижній зоні - деформації розтягу. Для одношарових плит серії I було визначено графічним методом критичні прогини та навантаження для подальших розрахунків. Отримані результати випробувань скляних плит наведено в табл.3.4. [12].



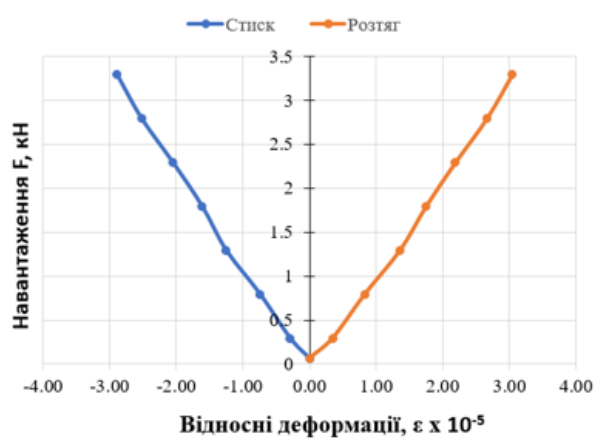
а)



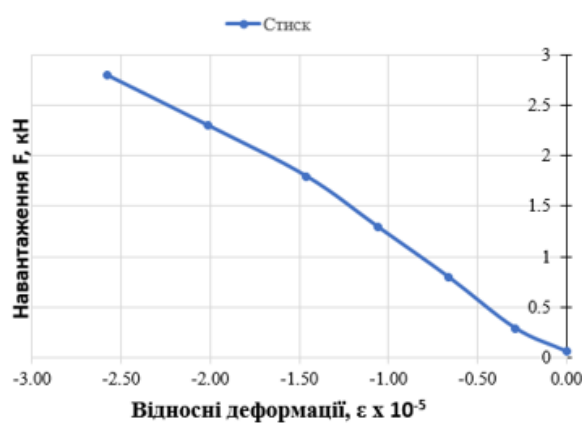
б)



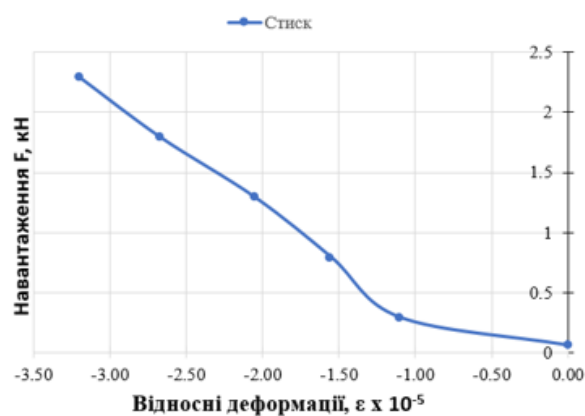
в)



г)



д)



е)

Рис. 3.10. Графіки залежності відносних деформацій від навантаження для плит серії III: а) плита марки ПС-3.1; б) плита марки ПС-3.2; в) плита марки ПС-3.3; г) плита марки ПС-3.4; д) плита марки ПС-3.5; е) плита марки ПС-3.6

Таблиця 3.4

Результати випробування скляних одношарових плит Серії III

Марка зразка	Руйнівне навантаження F_{cr}^{ex} , кН	Критичний прогин F_{cr}^{ex} , мм
ПС-3.1	5,43	2,75
ПС-3.2	4,29	2,83
ПС-3.3	2,79	1,68
ПС-3.4	3,79	2,31
ПС-3.5	3,29	1,78
ПС-3.6	2,79	0,91
Середні:	3,73	2,04

Згідно отриманих результатів (див. табл.3.4) несуча здатність одношарових скляних плит є досить високою, проте є великий розкид даних для однієї і тієї ж серії плит, яка була виготовлена з одного джамбо листа і була досліджена за ідентичних умов в лабораторії. Такий розкид несучої здатності скляних одношарових плит може свідчити про вплив дефектів і мікротріщин на поверхні скла на його несучу здатність та поведінку під навантаженням. Тож виникає необхідність подальших експериментальних досліджень скляних плит з різною кількістю шарів та використання фрактографічного аналізу для вивчення дефектів на поверхні скла.

3.3.2. Серія IV. Скляні двошарові плити.

Вигляд дослідних двошарових плит після руйнування показано на рис.3.11. Для плит серії IV початок руйнування відбувався з раптовим утворенням тріщини посередині плити у нижньому шарі (1) Після руйнування нижнього шару, прилади було знято з плити для збереження їх цілісності, навантаження при цьому падало, а прогини зросли. Після цього плити далі навантажували до руйнування верхнього шару (2). Руйнування скляних плит було характерним як для звичайного натрієво-силікатного скла, аналогічно як для плит попередньої серії, з утворенням перехресних тріщин що поширювалися від центру плити (де розташовували штамп) до вільних граней плити у двох взаємно перпендикулярних напрямках.



Рис. 3.11 Вигляд скляних плит після руйнування: а) плита марки ПС-4.1;
б) плита марки ПС-4.2

Аналогічно до одношарових плит, в процесі випробування заміряли прогини та відносні деформації плит, на кожному етапі завантаження. На рис.3.12 наведено графіки залежності прогинів від навантаження, які були побудовані для плит серії IV. Як і для попередньої серії плит, можна спостерігати що прогини зростали рівномірно зі збільшенням навантаження (рис.3.12), а також спостерігається пружна робота плит аж до їх крихкого руйнування. Графіки розподілу відносних деформацій для двошарових плит наведено на рис.3.13.

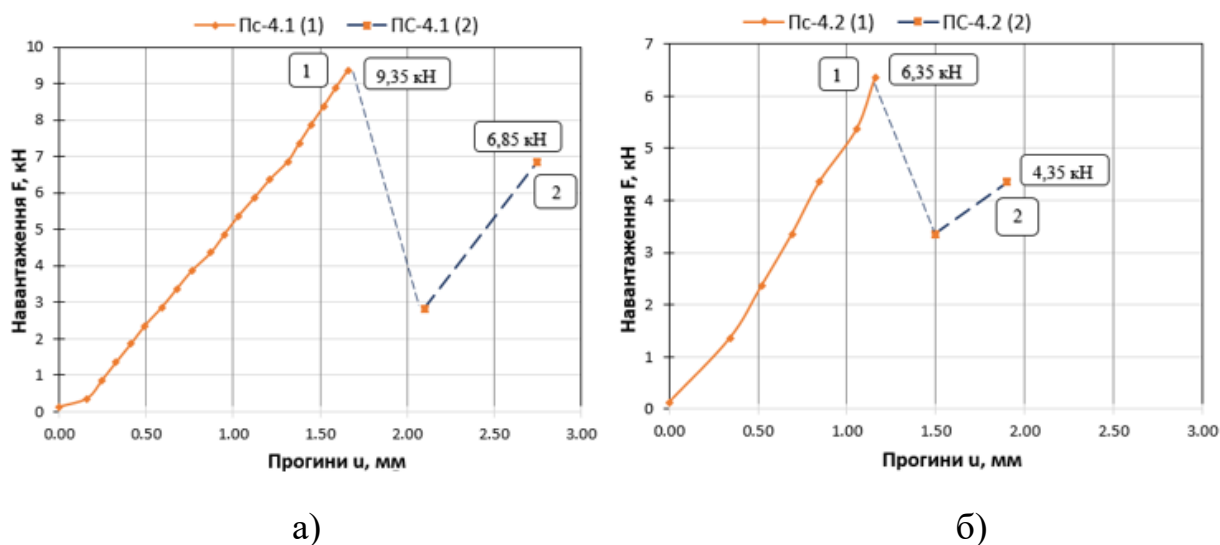


Рис.3.12 Графіки залежності прогинів від навантаження для плит серії IV:
а) плита марки ПС-4.1; б) плита ПС-4.2; де 1 – нижній шар, 2 – верхній шар

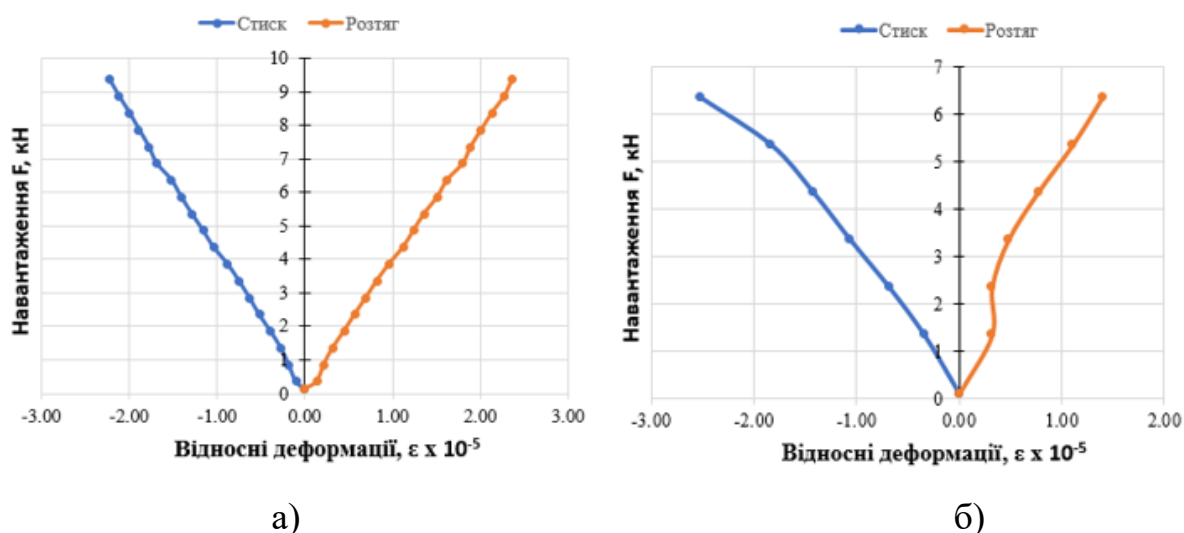


Рис.3.13 Графіки залежності відносних деформацій від навантаження для плит серії IV: а) – плита марки ПС-4.1; б) – плита марки ПС-4.2

У плитах серії IV можна спостерігати деформації стиску у верхній зоні та деформації розтягу у нижній зоні, аналогічно як у одношарових плитах. За критерій руйнування плити прийнято руйнування нижнього шару скла. Отримані результати випробувань скляних двошарових плит серії IV наведено в табл.3.5.

Таблиця 3.5

Результати випробування скляних двошарових плит Серії IV

Марка зразка	№ шару	Руйнівне навантаження F_{cr}^{ex} , кН	Критичний прогин w_{cr}^{ex} , мм
ПС-4.1	(1)	9,35	1,66
	(2)	6,85	-
ПС-4.2	(1)	6,35	1,16
	(2)	4,35	-
Середні:	-	7,85	1,41

В результаті проведення випробувань двошарових плит серії IV було отримано середні значення критичних навантажень та прогинів (див. табл.3.5), згідно з якими можна зробити висновки що використання двошарових плит

порівняно з одношаровими забезпечує їх більшу несучу здатність у 1,92 рази ($7,85 \text{ кН} / 4,07 \text{ кН} = 1,92$ (див. табл. 3.4 та табл. 3.5)) та менший прогин у 1,69 рази ($2,39 \text{ мм} / 1,41 \text{ мм} = 1,69$ (див. табл. 3.4 та табл. 3.5)).

3.3.3. Серія V. Скляні трьохшарові плити.

Вигляд дослідних трьохшарових плит після руйнування показано на рис.3.14. Руйнування плити марки ПС-5.1 було досить швидким. Спочатку зруйнувався нижній шар (1) і одразу відбулося руйнування середнього (2), та верхнього шару (3). В плиті марки ПС-5.2 послідовність руйнування шарів була аналогічною ПС-5.1: першим зруйнувався нижній шар (1), після цього навантаження впало, а прогини зросли, плиту продовжили навантажувати після чого відбулося руйнування середнього (2), та одразу верхнього шару (3).

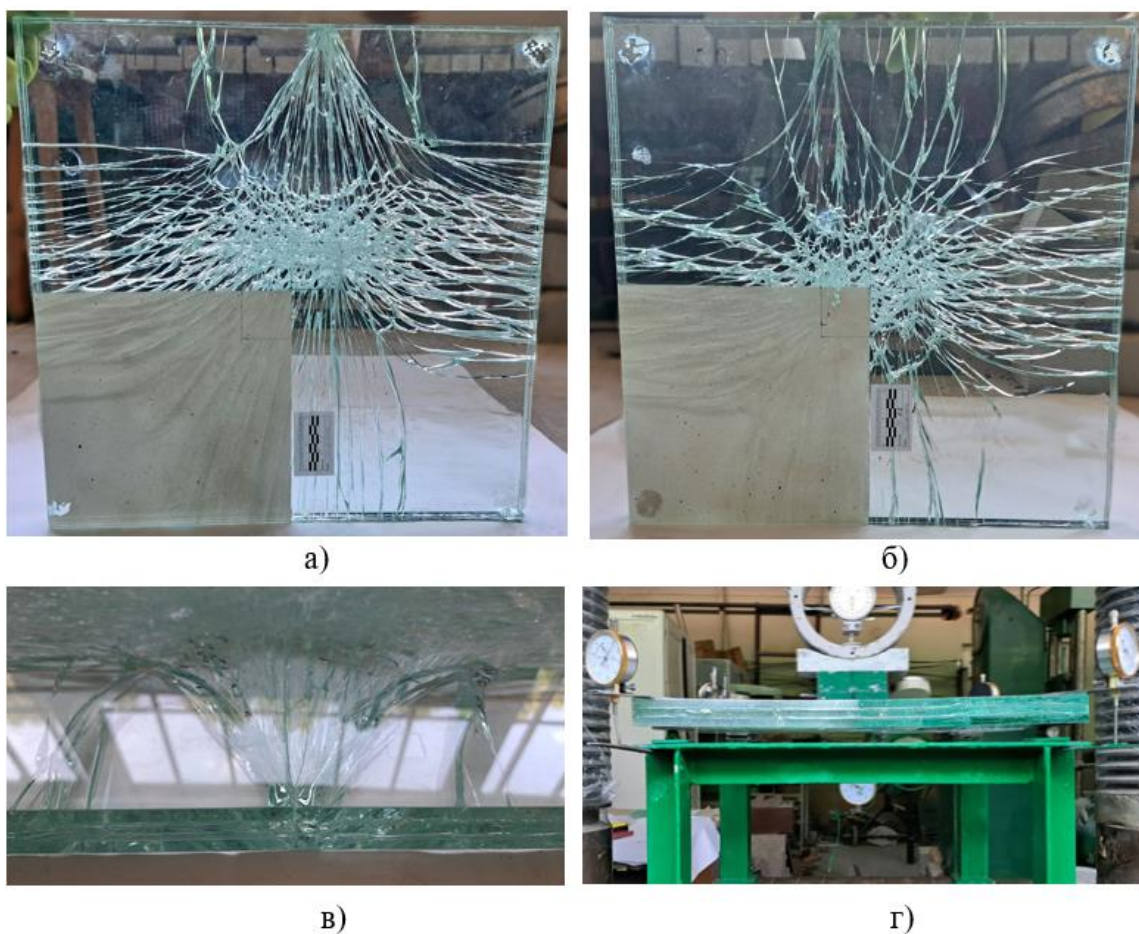


Рис.3.14 Вигляд скляних плит після руйнування: а), в) плита ПС-5.1 б), г) плита ПС-5.2

Руйнування скляних трьохшарових плит було аналогічним як для плит серії III та IV, з утворенням перехресних тріщин від центру до вільних граней плити у двох взаємно перпендикулярних напрямках (рис. 3.14).

На основі отриманих результатів випробувань серії V було побудовано графіки залежності прогинів від навантаження (рис.3.15). На графіках (рис.3.15) можна спостерігати що прогини зростали рівномірно зі збільшенням навантаження, плити працювали у пружній стадії аж до крихкого руйнування.

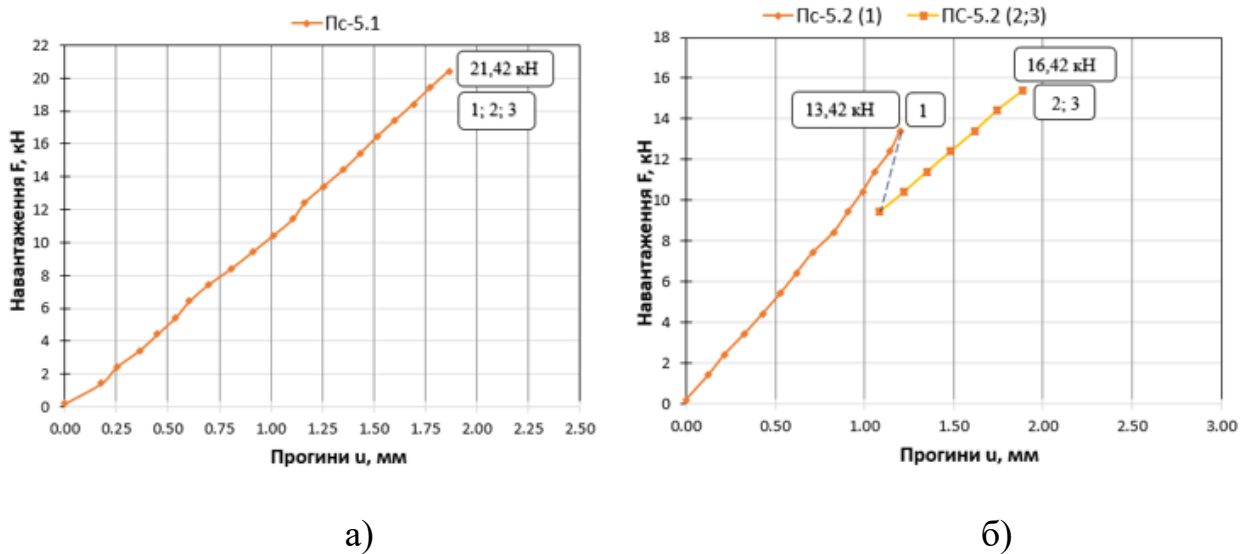


Рис. 3.15 Графіки залежності прогинів від навантаження для плит серії V: а) плита марки ПС-5.1; б) плита ПС-5.2; де 1 – нижній шар, 2 – середній шар, 3- верхній шар

Графіки розподілу відносних деформацій від навантаження були побудовані на основі отриманих результатів випробувань плит серії V та наведені на рис. 3.16. Також на графіках (рис.3.16) можна спостерігати деформації стиску у верхній зоні та деформації розтягу у нижній зоні, аналогічно попереднім серіям одношарових та двошарових плит. Отримані результати випробувань скляних трьохшарових плит серії V наведено в табл.3.6.

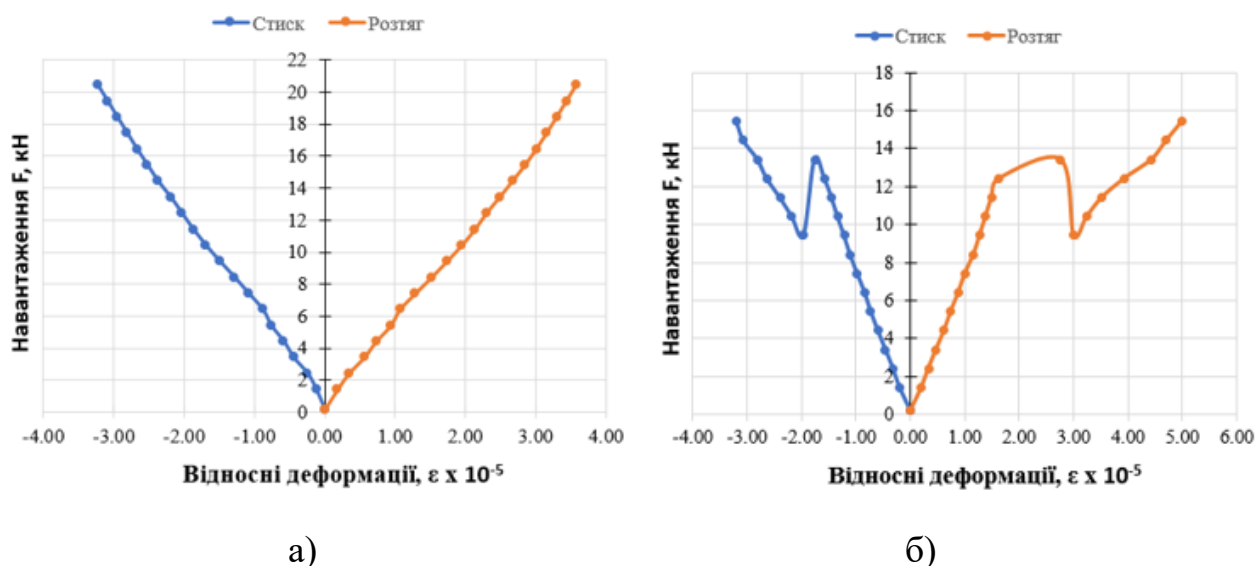


Рис.3.16 Графіки залежності відносних деформацій від навантаження для плит серії V: а) плита марки ПС-5.1; б) плита марки ПС-5.2

Таблиця 3.6

Результати випробування скляних трьохшарових плит Серії V

Марка зразка	№ шару	Руйнівне навантаження F_{cr}^{ex} , кН	Критичний прогин w_{cr}^{ex} , мм
ПС-5.1	(1)	21,42	1,87
	(2)	-	-
	(3)	-	-
ПС-5.2	(1)	13,42	1,2
	(2)	16,42	1,89
	(3)	-	-
Середні:	-	17,42	1,53

В результаті проведення випробувань трьохшарових плит серії V було отримано середні значення критичних навантажень та прогинів (див. табл.3.6), згідно з якими можна зробити висновки що використання трьохшарових плит порівняно з двошаровими забезпечує у 2,21 рази їх більшу несучу здатність ($17,42 \text{ кН} / 7,85 \text{ кН} = 2,21$ (див. табл. 3.5 та табл. 3.6)), проте спостерігається лише у 1,08 рази більший середній прогин у трьохшарових плитах відносно двошарових ($1,53 \text{ мм} / 1,41 \text{ мм} = 1,08$ (див. табл. 3.5 та табл. 3.6)).

Використання трьохшарових плит порівняно з одношаровими забезпечує у 4,28 рази більшу їх несучу здатність ($17,42 \text{ кН} / 4,07 \text{ кН} = 4,28$ (див. табл. 3.4 та табл. 3.6)) та у 1,56 рази менший прогин ($2,39 \text{ мм} / 1,53 \text{ мм} = 1,56$ (див. табл. 3.4 та табл. 3.6)).

На основі проведених експериментальних випробувань скляних плит серій III, IV та V, які були шарнірно оперті по чотирьох кутах та працювали на згин у двох взаємно перпендикулярних напрямках, можна зробити наступні висновки:

1. Характер руйнування усіх скляних плит, незалежно від кількості шарів скла, відповідав утворенню перехресних тріщин які поширювалися від середини до країв плити, з утворенням гострих уламків (рис. 3.17).

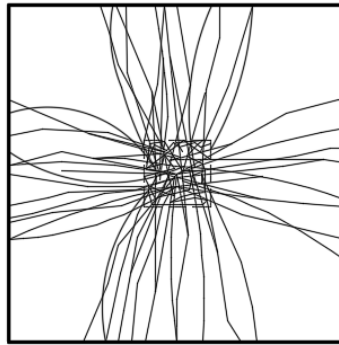


Рис. 3.17. Схематичне зображення характеру утворення тріщин для звичайного скла.

2. У всіх двошарових і трьохшарових плитах послідовність руйнування шарів відбувалася від нижнього шару до верхнього: «нижній – верхній» - для серії IV та «нижній – середній – верхній» - для серії V.

3. Порівняльний аналіз несучої здатності скляних плит серій III, IV та V в момент руйнування першого шару, дозволяє встановити цілком логічну залежність – зі збільшенням кількості шарів триплексу - зростає несуча здатність плит. Проте, така залежність не є прямо пропорційною. Використання двошарових плит порівняно з одношаровими забезпечує у 1,92 рази більшу несучу здатність; застосування трьохшарових плит порівняно з одношаровими забезпечує у 4,28 рази

більшу несучу здатність та у 2,21 рази більшу несучу порівняно з двошаровими плитами.

4. Прогини плит також зменшуються із застосування двох або більше шарів скла. У двошарових плитах прогин у 1,69 рази менший порівняно з одношаровими плитами. Прогин трьохшарових плит всього у 1,56 рази менший порівняно з одношаровими плитами.

5. Згідно отриманих результатів несуча здатність плит скляних плит на згин є досить високою, проте є великий розкид даних в межах однієї і тієї ж серії плит, які були виготовлені та досліджені за ідентичних умов. Такий розкид несучої здатності скляних плит може свідчити про вплив дефектів і мікротріщин на поверхні скла на його несучу здатність та поведінку під навантаженням. Тому виникає необхідність подальших досліджень скляних плит з різною кількістю шарів, а також використання фрактографічного аналізу та вивчення дефектів на поверхні скла.

3.4. Результати вимірювання деформацій скляних плит з використанням методу кореляції цифрових зображень.

Аналіз результатів відносних деформацій, отриманих з використанням методу 2D кореляції цифрових зображень (КЦЗ) під час випробування скляних плит на згин (серій III-V), було виконано за допомогою програмного забезпечення GOM Correlate (див. п.2.2.5). Для отримання поля деформацій було проведено підбір параметрів фасетів a_f та їхнього кроку k_f [52,121,122]. Згідно рекомендацій програмного забезпечення GOM Correlate, в якості основних величин прийняті відносні деформації визначені за допомогою цифрового екстензометра, що використовує принцип замірів, аналогічно як для механічних мікроіндикаторів [12]. Поля відносних деформацій для плити марки ПС-3.2 показано на рис.3.18.

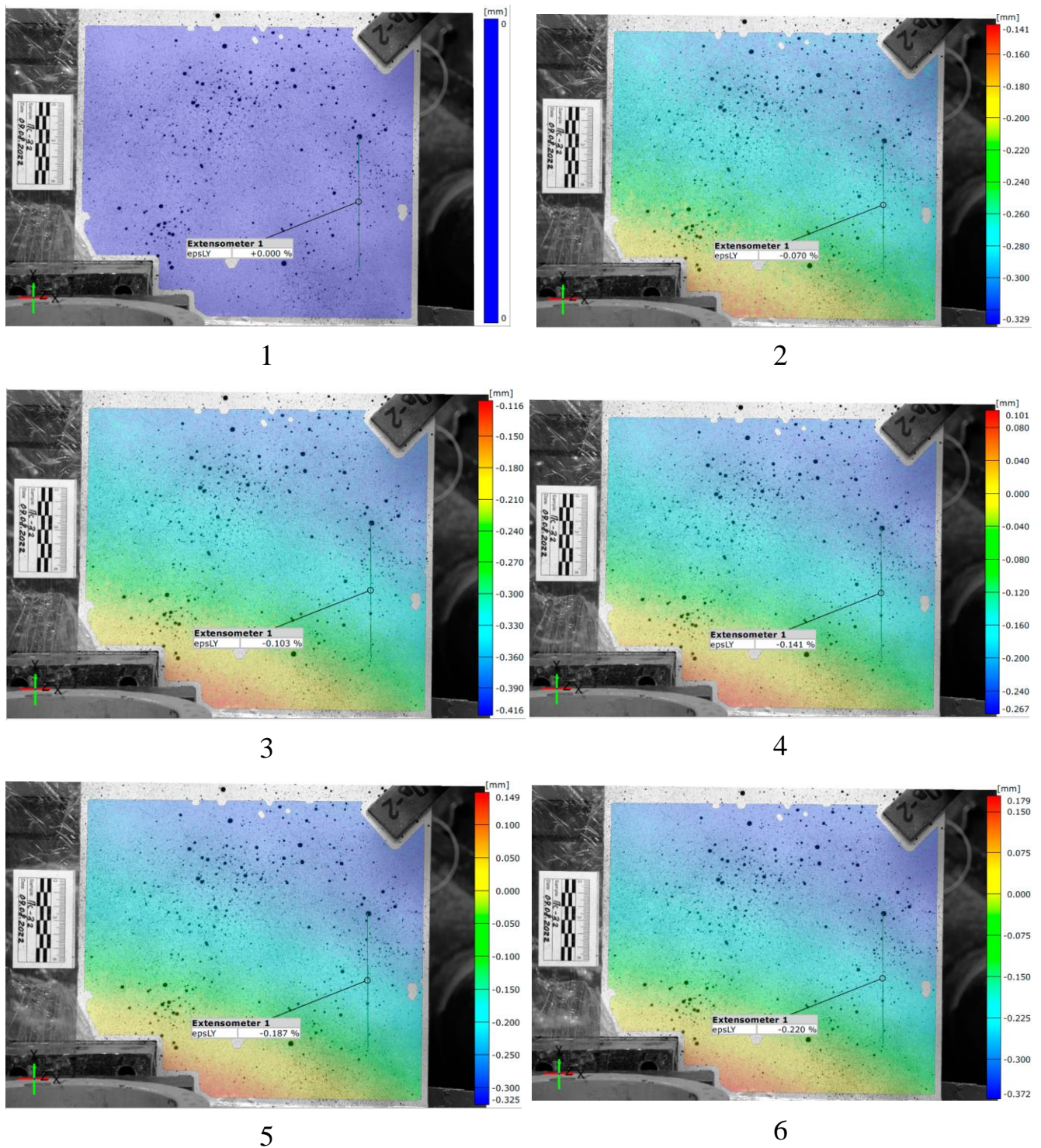
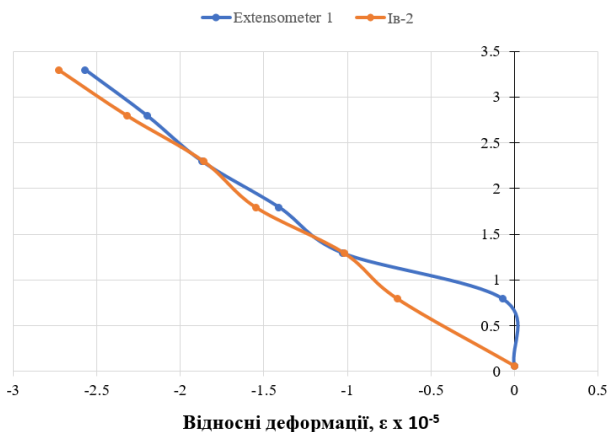
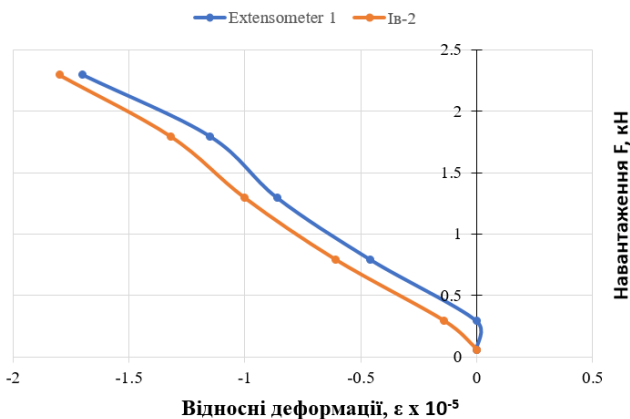


Рис.3.18. Поля відносних деформацій для плити марки ПС-3.2 отримані за допомогою програмного забезпечення GOM Correlate.

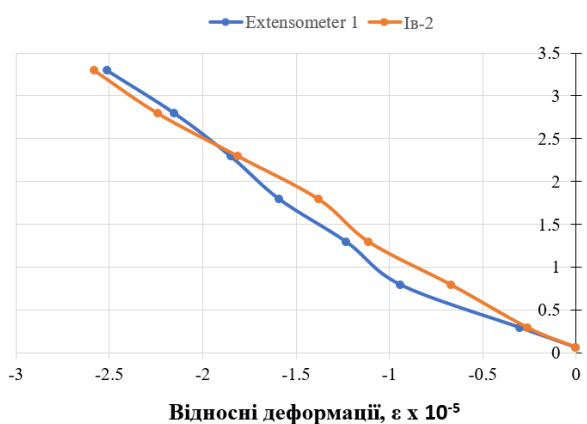
Для плит серій III, IV та V було виконано порівняльний аналіз значень відносних деформацій на кожному етапі завантаження, які були отримані за допомогою механічних мікроіндикаторів та цифрового екстензометра КЦЗ. Результати порівняння значень деформацій подано у вигляді графіків на рис. 3.19.



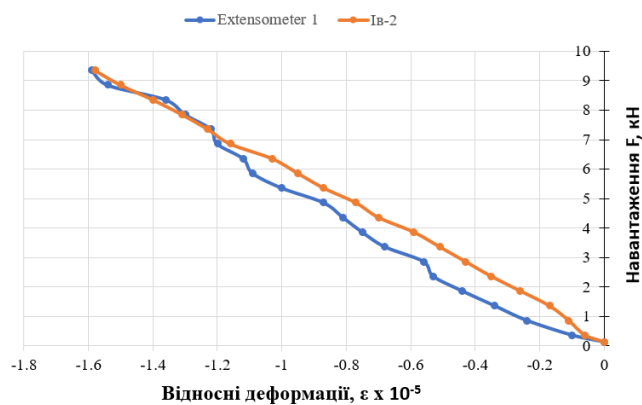
ПС-3.2



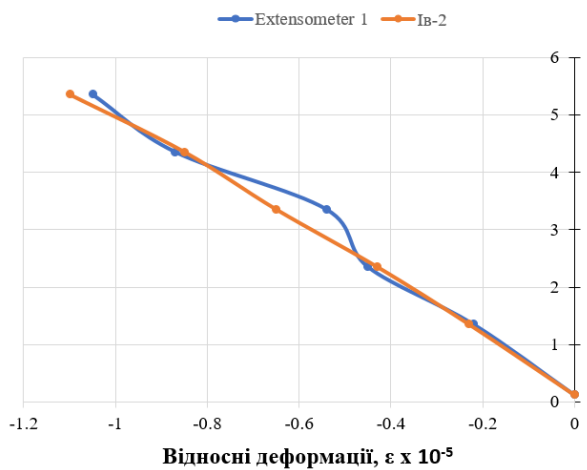
ПС-3.3



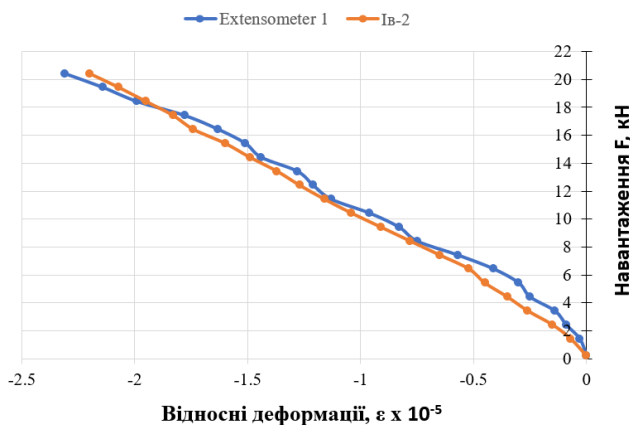
ПС-3.4



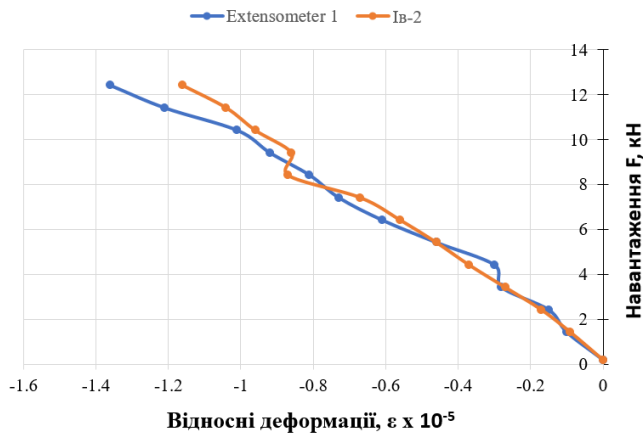
ПС-4.1



ПС-4.2



ПС-5.1



ПС-5.2

Рис.3.19. Графіки залежності відносних деформацій від навантаження отримані за допомогою методу КЦЗ (Extensometer 1) та механічного мікроіндикатора (Ів-2)

В результаті проведеного аналізу значень відносних деформацій отриманих методом 2D кореляції цифрових зображень (за допомогою цифрового екстензометра) із механічними мікроіндикаторами, можна прослідкувати високу збіжність результатів, оскільки усереднений перевідний коефіцієнт становить $k_c = 1,008$. Це свідчить, зокрема, про правильний підбір параметрів під час роботи з програмним забезпеченням та відповідним влаштуванням фотокамери (див. п.2.2.5) [12]. Зокрема, було влаштоване перпендикулярне розміщення камери відносно площини вимірювання та фокусної віддалі в еквіваленті 50 мм, при якій не відбувається спотворення зображення.

Проаналізувавши детально отримані результати та параметри КЦЗ які застосовували у даній роботі під час випробування скляних плит на згин, з результатами які подані у роботі [52], можна зробити висновок, що при розміщенні фотокамери під певним кутом і фокусної віддалі аналогічно як у роботі Осадчука Т.Ю. [52] необхідно було вводити усереднений перевідний коефіцієнт $k_c = 6,20 \times 10^{-3}$ для результатів отриманих за допомогою КЦЗ.

Важливим параметром при використанні методу 2D КЦЗ є точне масштабування отриманих зображень в процесі проведення аналізу, для цього було застосовано масштабну лінійку на кожній плиті. Також, застосований метод

нанесення спекл-поверхні шляхом розпилення чорної аерозольної фарби на білу основу який виявився більш ефективним та менш трудомістким у порівнянні з ручним нанесенням.

Таким чином для подальших випробувань скляних плит на згин можна застосовувати удосконалену методику та рекомендації щодо вибору параметрів 2D КЦЗ, які подані у даній роботі.

3.5. Критерії тріщиностійкості скляних зразків отримані з випробувань міцності скла на розтяг при згині.

Для розрахунку критеріїв тріщиностійкості K_{IC}, K_B було проведено вимірювання параметрів на поверхні руйнування дослідних зразків серії I за допомогою монокулярного цифрового USB мікроскопа згідно методики описаної в п.2.2.7 [10]. Вигляд поверхні зруйнованих зразків серії I із замірами критеріїв тріщиностійкості зображено у табл.3.7.

На основі проведеного фрактографічного аналізу поверхні зруйнованих зразків серії I та отриманих параметрів тріщиностійкості (рис.3.20), зокрема: довжини ($2c$) і глибини (a) напівеліптичних тріщин, радіус дзеркала (R_i) та радіус серпанка (R_0), було підібрано коефіцієнти форми тріщин (Y_c) та (Y_a), згідно Дж. Ньюману і І. Раджу [67,123]. Також було обчислено критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (K_{IC}) за формулою (1.1), та константи (A_i) та (A_0) за виразом (1.2). Результати отриманих параметрів наведено в табл. 3.8.

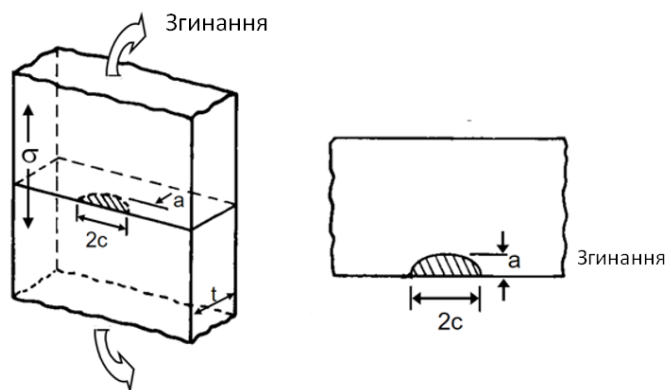
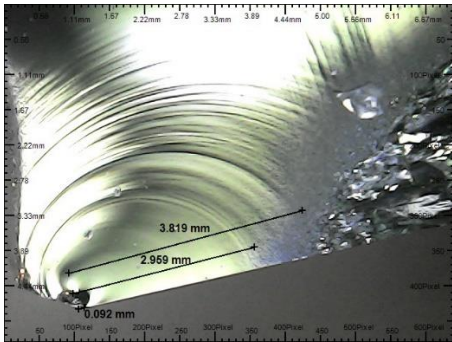
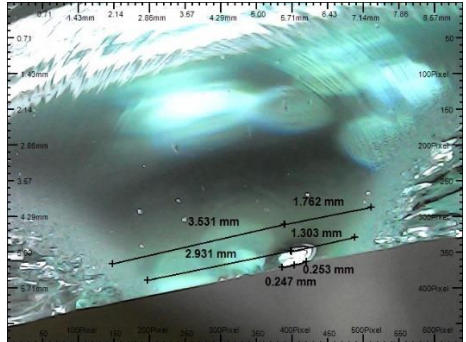
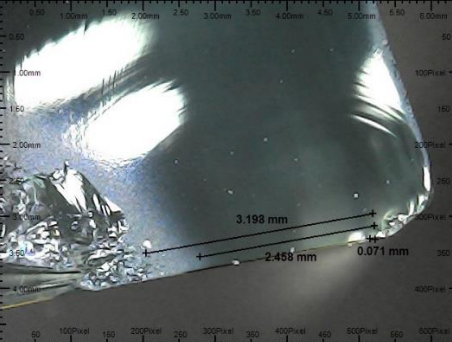
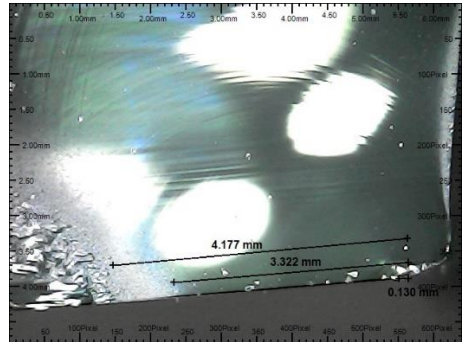
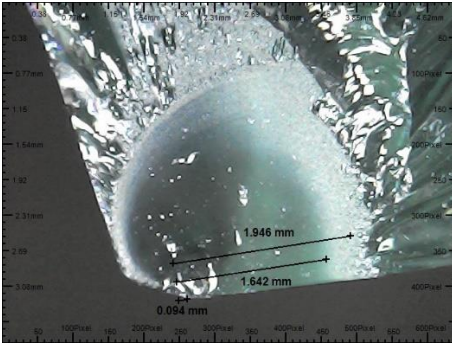
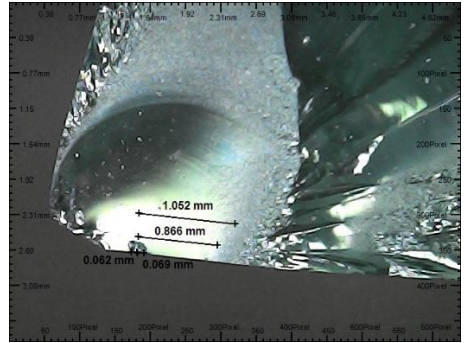
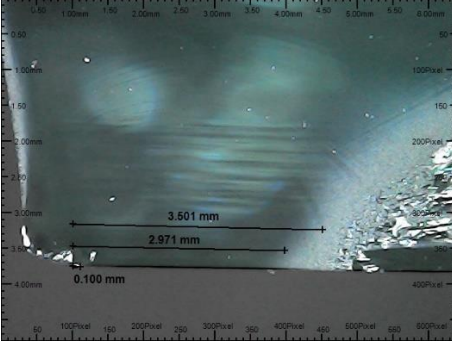
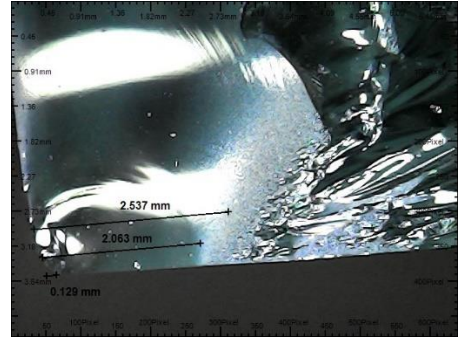
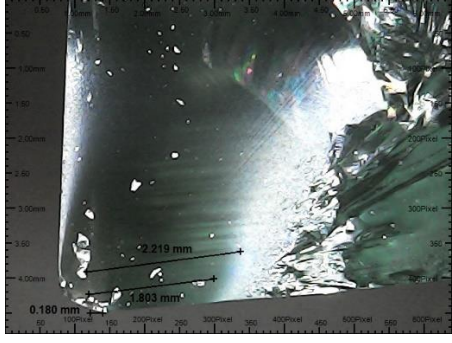
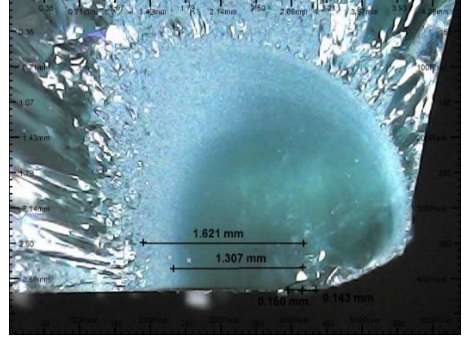


Рис. 3.20. Схематичне позначення параметрів тріщин [67].

Вигляд замірів на поверхні зруйнованих скляних зразків серії I

ПС-1.1		ПС-1.2	
ПС-1.3		ПС-1.4	
ПС-1.5		ПС-1.6	
ПС-1.7		ПС-1.8	
ПС-1.9		ПС-1.10	

ПС-1.11		ПС-1.12	
ПС-1.13		ПС-1.14	
ПС-1.15		ПС-1.16	
ПС-1.17		ПС-1.18	
ПС-1.19		ПС-1.20	

Таблиця 3.8.

Параметри тріщиностійкості для скляних зразків серії I

Марка зразка	$\sigma_{\text{вв}}$, МПа	a, мм	2c, мм	Y_c	Y_a	R_i , мм	R_0 , мм	A_i , МПа $\sqrt{\text{м}}$	A_0 , МПа $\sqrt{\text{м}}$	K_{IC} , МПа $\sqrt{\text{м}}$
ПС-1.1	57,22	0,105	0,285	1,24	1,6	2,56	3,31	2,89	3,29	0,938
ПС-1.2	47,73	0,153	0,180	1,3	1,17	4,29	5,67	3,12	3,59	0,768
ПС-1.3	69,77	0,204	0,244	1,3	1,17	1,35	1,55	2,56	2,75	1,295
ПС-1.4	56,19	0,055	0,277	1,19	1,99	2,22	2,83	2,65	2,99	0,829
ПС-1.5	41,78	0,03	0,246	1,19	1,99	2,68	3,35	2,16	2,42	0,455
ПС-1.6	53,31	0,23	0,450	1,24	1,6	2,83	3,36	2,83	3,09	1,294
ПС-1.7	65,06	0,255	0,403	1,3	1,17	1,03	1,68	2,08	2,67	1,351
ПС-1.8	52,21	0,315	0,320	1,3	1,17	1,34	1,43	1,91	1,97	1,205
ПС-1.9	66,30	0,070	0,167	1,24	1,6	1,06	1,40	2,16	2,48	0,888
ПС-1.10	53,85	0,062	0,119	1,24	1,6	2,47	3,14	2,68	3,02	0,678
ПС-1.11	49,73	0,071	0,092	1,3	1,17	2,95	3,81	2,71	3,07	0,545
ПС-1.12	50,91	0,154	0,508	1,19	1,99	1,79	2,22	2,15	2,40	1,257
ПС-1.13	58,56	0,085	0,219	1,29	1,4	2,31	3,14	2,81	3,28	0,756
ПС-1.14	45,06	0,112	0,345	1,19	1,99	2,67	3,20	2,33	2,55	0,949
ПС-1.15	60,60	0,223	0,241	1,3	1,17	3,85	4,37	3,76	4,01	1,176
ПС-1.16	64,77	0,120	0,131	1,3	1,17	0,86	1,05	1,91	2,10	0,922
ПС-1.17	42,73	0,35	0,100	1,24	1,6	2,97	3,50	2,33	2,53	1,279
ПС-1.18	53,43	0,76	0,129	1,29	1,4	2,00	2,33	2,39	2,58	2,062
ПС-1.19	64,74	0,106	0,190	1,24	1,6	1,80	2,21	2,75	3,05	1,066
ПС-1.20	64,74	0,115	0,293	1,19	1,99	1,30	1,62	2,34	2,61	1,382

Для аналізу експериментально встановлених значень (K_{IC}), (A_i) та (A_0) використовували двопараметричний розподіл Вуйбулла. Характеристичні значення параметрів тріщиностійкості (табл. 3.9) були визначені для рівня надійності 95% та межею ненадійності 5%, за допомогою квантильної функції розподілу Вейбулла [120].

Таблиця 3.9

Результати аналізу експериментально встановлених параметрів тріщиностійкості скла для серії I

$\beta_{K_{\text{IC}}}$	$\eta_{K_{\text{IC}}}$ МПа $\sqrt{\text{м}}$	$K_{\text{IC},5\%}$ МПа $\sqrt{\text{м}}$	β_{A_i}	η_{A_i} МПа $\sqrt{\text{м}}$	$A_{i,5\%}$ МПа $\sqrt{\text{м}}$	β_{A_0}	η_{A_0} МПа $\sqrt{\text{м}}$	$A_{0,5\%}$ МПа $\sqrt{\text{м}}$
3,25	1,17	0,47	6,52	3,02	1,91	6,50	2,71	1,71

Таким чином, для подальших розрахунків скляних плит, запропоновано застосовувати отримані параметри тріщиностійкості, а саме: критичний коефіцієнт

інтенсивності напружень $K_{IC,5\%} = 0,47 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; коефіцієнт інтенсивності розгалуження тріщин (прийнято як середнє значення $A_{i,5\%}$ та $A_{0,5\%}$) становить - $K_{B,5\%} = 1,81 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

3.6. Висновки до розділу 3

1. Статистично-ймовірнісний аналіз експериментально встановлених значень міцності на розтяг при згині та модуля пружності скла, виконували за допомогою квантильної функції розподілу Вейбулла, з рівнем надійності 95% та межею ненадійності 5%. Для подальших розрахунків рекомендовано приймати характеристичне значення міцності скла на розтяг при згині $f_{gk,5\%} = 40,4 \text{ МПа}$.

2. За результатами досліджень скляних балочних плит на довговічність, отримано залежності часу випробувань (довговічності) від навантаження та прогинів від навантаження. В результаті проведеного аналізу за допомогою апроксимації експериментальних результатів дослідження, методом найменших квадратів, встановлено що залежність навантаження – час має досить високий параметр збіжності $R^2 = 0,8523$, що свідчить про хорошу збіжність отриманих результатів та ефективну методику проведення досліджень на довговічність.

3. Отримано результати досліджень скляних плит з різною кількістю шарів скла які були шарнірно оперті по чотирьох кутах та працювали у двох взаємно перпендикулярних напрямках на згин від короткочасного зосередженого навантаження. Було проведено аналіз характеру руйнування, несучої здатності та деформативності скляних плит, а також порівняння цих параметрів в залежності від кількості шарів скла. За критерій руйнування для двошарових та трьохшарових плит прийнято руйнування першого шару, а саме нижнього шару.

4. Отримано результати вимірювань відносних деформацій методом 2D кореляції цифрових зображень (КЦЗ). Проведено порівняльний аналіз результатів отриманих за допомогою механічних мікроіндикаторів та за допомогою методу КЦЗ який показав високу збіжність отриманих результатів. Рекомендовано для подальших випробувань застосовувати удосконалену методику застосування

методу КЦЗ з наступними параметрами: фокусна віддаль камери повинна бути в еквіваленті 50 мм; камеру необхідно розташовувати перпендикулярно до площини вимірювання; для коректного масштабування отриманих зображень в процесі проведення аналізу потрібно наносити масштабну лінійку на кожному дослідному зразку, під час проведення аналізу в програмному комплексі GOM Correlate рекомендовано використовувати цифровий екстензометр з базою вимірювання аналогічною до механічних мікроіндикаторів.

5. Було проведено фрактографічний аналіз поверхні зламу скляних дослідних зразків за допомогою цифрової оптичної мікроскопії. Для аналізу експериментально встановлених характеристичних значень параметрів тріщиностійкості використовували квантильну функцію розподілу Вейбулла, з рівнем надійності 95% та межею ненадійності 5%. В результаті аналізу, запропоновано для подальших розрахунків скляних плит застосовувати критичний коефіцієнт інтенсивності напружень $K_{IC,5\%} = 0,47 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ та коефіцієнт інтенсивності розгалуження тріщин $K_{B,5\%} = 1,81 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СКЛЯНИХ ПЛИТ ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ НА ЗГИН. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПРОЕКТУВАННЯ.

Для аналізу результатів експериментальних досліджень скляних плит на згин було використано три теоретичних підходи, а саме:

- розрахунок скляних плит на основі концепції ефективної товщини та теорії пружності пластин (I методика);
- розрахунок скляних плит на основі чисельно-аналітичного методу розрахунку за допомогою методу кінцевих елементів (II методика);
- розрахунок довговічності скляних плит на основі лінійно-пружної механіки руйнування (III методика).

4.1. Аналітичний метод розрахунку скляних плит на основі концепції ефективної товщини та теорії пружності пластин. I методика.

Згідно представленої методики на основі концепції ефективної товщини (див.п.1.6) було проведено аналітичний розрахунок скляних плит з різною кількістю шарів скла. Розрахунок виконували відповідно до європейського проекту норм prEN 16612: 2013 [94]. На початку, багатошарова плита приводилася до «монолітної-одношарової» плити з ефективною товщиною. [52]. Ефективну товщину $h_{ef;w}$ визначали згідно з рівнянням (1.12), коефіцієнт передачі зсуву прийняли $\omega = 0,1$, згідно [94]. Для нижнього шару скла ефективну товщину $h_{ef;\sigma;1}$ визначали згідно рівняння (1.11). Результати розрахунку ефективної товщини для двошарової та трьохшарової плит наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1.

Результати розрахунку ефективної товщини плит

К-сть шарів скла	$h_{ef;w}$, мм	$h_{ef;\sigma;1}$, мм
2	13,82	15,47
3	20,52	25,72

Для розрахунку ефективної товщини двошарових та трьохшарових скляних плит прийнято шари скла товщиною 10 мм та проміжні шари плівки EVASAFE товщиною по 0,33 мм

Згідно з теорією пластин Тимошенка Войновського-Кригера [124] пружно оперту по контуру на чотири балки прямокутну пластину, можна розглядати як пластину з вільними краями, оперту по чотирьох вершинах. В такому випадку, балки які жорстко опираються у вершинах пластини, при цьому мають нульову жорсткість. Таким чином, відповідно до цієї теорії, згинальні моменти M_{x1}, M_{y1} які виникають в центрі квадратної пластини зі стороною a , посередині якої прикладено навантаження F по прямокутній площі $s \times t$, знаходять згідно системи рівнянь (4.1).

$$\begin{cases} M_{x1} + M_{y1} = \left[0.1034 \cdot \left(\ln \frac{a^2}{s^2+t^2} - \varphi \right) + 0.492 \right] \cdot F \\ M_{x1} - M_{y1} = 0,0557 \cdot \psi \cdot F \end{cases}, \quad (4.1)$$

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

Згинальні моменти M_{x2}, M_{y2} які виникають по середині квадратної пластини опертої по чотирьох кутах, під дією рівномірно-розподіленого навантаження від власної ваги пластини q , при значенні коефіцієнта Пуассона $\nu_1 = 0,25$ та $\nu_2 = 0,3$ визначають згідно рівняння (4.2) [52,124]:

$$M_{x2} = M_{y2} = \frac{(0,3-0,2)(0,1109 \cdot q \cdot a^2) - (0,25-0,2)((0,1090 \cdot q \cdot a^2))}{(0,3-0,25)} = 0,1128 \cdot q \cdot a^2 \quad (4.2)$$

Сумарно, згинальні моменти M_x, M_y які виникають в центрі пластини, яка оперта по чотирьох кутах і на яку діє зосереджене навантаження, знаходять за виразом (4.3), а максимальні нормальні напруження в пластині знаходять за виразом (4.4).

$$M_x = M_{x1} + M_{x2} = M_y = M_{y1} + M_{y2} \quad (4.3)$$

А максимальні нормальні напруження в пластині знаходять за виразом (4.4)

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{6 \cdot M_x}{h^2} = \frac{6 \cdot M_y}{h^2}, \quad (4.4)$$

де $h = h_{ef;\sigma;j}$ – товщина пластини, а у випадку багат шарової плити – ефективна товщина.

В результаті проведених розрахунків, було визначено згинальні моменти M_x , M_y за формулою (4.3) та напруження σ_x , σ_y за формулою (4.4) для скляних плит квадратних в плані ($a = b = 450$ мм) з різною кількістю шарів скла, які були оперті по чотирьох кутах та навантажені зосередженим покрововим зусиллям F_i посередині плити через металевий штамп розміром $s = t = 100$ мм. Товщину одношарових плит прийнято в розрахунку фактичну згідно проведених замірів (див. табл. 2.4), товщину двошарових та трьохшарових плит прийнято приведену $h_{ef;\sigma;j}$ згідно розрахунку (див. табл. 4.1) Результати розрахунків представлено в табл. 4.2.

Характеристичне значення міцності скла на розтяг при згині становить $f_{gk,5\%} = 40,4$ МПа (див. п.3.1) було досягнуто у нижньому шарі між 16 та 17 етапами навантаження для трьохшарових плит, при величині критичного навантаження $F_{cr3}^{calc} = 16,2$ кН, та між 11 та 12 етапами навантаження для двошарових плит, при величині критичного навантаження $F_{cr2}^{calc} = 5,84$ кН. В одношарових плитах характеристичне значення міцності скла на розтяг при згині було досягнуто між 4 та 5 етапами навантаження $F_{cr2}^{calc} = 2,43$ кН. В результаті отриманих розрахунків, експериментальне руйнівне навантаження перевищує розрахункове у $F_{cr3}^{ex} / F_{cr3}^{calc} = 3,73$ кН / 2,43 кН = 1,53 рази для одношарових плит; $F_{cr3}^{ex} / F_{cr3}^{calc} = 7,85$ кН / 5,84 кН = 1,34 рази для двошарових плит; та $F_{cr3}^{ex} / F_{cr3}^{calc} = 17,42$ кН / 16,2 кН = 1,07 рази для трьохшарових плит;

Таблиця 4.2.

Згинальні моменти та нормальні напруження для скляних плит за серіями

№	Серія III (одношарові)			Серія IV (двошарові)			Серія V (трьохшарові)		
	F_i , кН	$M_x = M_y$, кН·м/м	$\sigma_x = \sigma_y$, МПа	F_i , кН	$M_x = M_y$, кН·м/м	$\sigma_x = \sigma_y$, МПа	F_i , кН	$M_x = M_y$, кН·м/м	$\sigma_x = \sigma_y$, МПа
1	0.5	0.144	8.63	0.5	0.151	3.787	1	0.296	2.682
2	1	0.281	16.836	1	0.288	7.215	2	0.569	5.164
3	1.5	0.417	25.042	1.5	0.425	10.642	3	0.843	7.646
4	2	0.554	33.248	2	0.561	14.07	4	1.116	10.128
5	2.5	0.691	41.454	2.5	0.698	17.498	5	1.39	12.61
6	3	0.828	49.66	3	0.835	20.926	6	1.663	15.092
7	3.5	0.964	57.866	3.5	0.972	24.354	7	1.937	17.574
8	4	1.101	66.072	4	1.108	27.782	8	2.21	20.056
9	4.5	1.238	74.278	4.5	1.245	31.209	9	2.484	22.538
10	5	1.375	82.484	5	1.382	34.637	10	2.757	25.019
11	-	-	-	5.5	1.519	38.065	11	3.031	27.501
12	-	-	-	6	1.656	41.493	12	3.305	29.983
13	-	-	-	6.5	1.792	44.921	13	3.578	32.465
14	-	-	-	7	1.929	48.348	14	3.852	34.947
15	-	-	-	7.5	2.066	51.776	15	4.125	37.429
16	-	-	-	8	2.203	55.204	16	4.399	39.911
17	-	-	-	8.5	2.339	58.632	17	4.672	42.393
18	-	-	-	9	2.476	62.06	18	4.946	44.874
19	-	-	-	-	-	-	19	5.219	47.356
20	-	-	-	-	-	-	20	5.493	49.838
21	-	-	-	-	-	-	21	5.766	52.32

Прогини скляних плит розраховували згідно з теорією пластин Тимошенка Войновського-Кригера [124]. Для квадратної плити яка була оперта по чотирьох кутах та навантажена зосередженим зусиллям F , максимальний прогин по середині плити знаходили за формулою (4.5):

$$w_{max} = \frac{0,0216 \cdot F \cdot a^2}{D} \quad (4.5)$$

де $a = 450$ мм – сторона квадратної в плані плити; D – жорсткість плити на згин, яка визначається за формулою (4.6) [124]:

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (4.6)$$

де $E = 7 \cdot 10^4$ МПа – модуль пружності для скла; $\nu = 0,25$ коефіцієнта Пуассона для скла; $h = h_{ef;w}$ – товщина плити, у випадку багатошарової плити – ефективна товщина (див. табл. 4.1.).

Результати порівняння теоретичних розрахунків прогинів скляних плит та отриманих експериментальних даних представлено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3.

Результати порівняння розрахункових та експериментальних значень прогинів скляних плит.

Серія III (одношарові)				Серія IV (двошарові)				Серія V (трьохшарові)			
Марка	F_{cr}^{ex} , кН	w_{cr}^{ex} , мм	w_{max}^{calc} , мм	Марка	F_{cr}^{ex} , кН	w_{cr}^{ex} , мм	w_{max}^{calc} , мм	Марка	F_{cr}^{ex} , кН	w_{cr}^{ex} , мм	w_{max}^{calc} , мм
ПС-3.1	4,93	2,75	3,47	ПС-4.1	9,35	1,66	2,49	ПС-5.1	20,42	1,87	1,66
ПС-3.2	3,79	2,83	2,66	ПС-4.2	6,35	1,84	1,69	ПС-5.2	15,42	1,89	1,25
ПС-3.3	2,29	1,68	1,61	-	-	-	-	-	-	-	-
ПС-3.4	3,29	2,31	2,31	-	-	-	-	-	-	-	-
ПС-3.5	2,79	1,78	1,96	-	-	-	-	-	-	-	-
ПС-3.6	2,29	0,91	1,61	-	-	-	-	-	-	-	-
Середні	3,23	2,04	2,27	-	7,85	1,75	2,09	-	17,92	1,88	1,46

В результаті проведених розрахунків прогинів скляних плит можна зробити наступні висновки: середнє значення розрахункових прогинів перевищує експериментальні значення прогинів при аналогічному навантаженні у $w_{max}^{calc}/w_{cr}^{ex} = 2,27/2,04$ мм = 1,11 рази для одношарових плит; у $w_{max}^{calc}/w_{cr}^{ex} = 2,09/1,75$ мм = 1,19 рази для двошарових плит; проте для трьохшарових плит експериментальні значення прогинів більші від розрахункових у $w_{cr}^{ex}/w_{max}^{calc} = 1,88/1,46$ мм = 1,28 рази.

4.2. Чисельно-аналітичний метод розрахунку скляних плит. II методика.

Чисельно-аналітична методика розрахунку полягає у моделюванні скляних плит за допомогою методу кінцевих елементів у програмному комплексі Dlubal RFEM. Скляні плити розраховували як шарнірно оперті по кутах та завантажені етапами по 50 кН/м² зовнішнім навантаженням посередині плити по площі штампу,

згідно прийнятої схеми випробування (див. п.2.2.3). Було проведено розрахунок за нелінійною та лінійною методикою.

4.2.1. Нелінійний розрахунок скляних плит.

Одношарова скляна плита. Розрахункову модель одношарової скляної плити було виконано у програмному комплексі Dlubal RFEM. Спершу було задано геометричні характеристики плити, крок кінцевих елементів розміром 0,025x0,025 м. (рис.4.2), а також обпирання плити на шарнірні опори (рис.4.1).

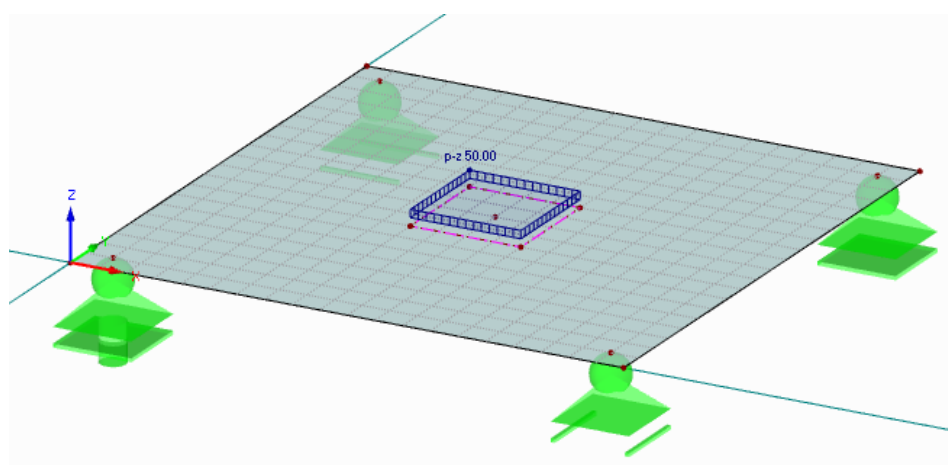


Рис.4.1 Загальний вигляд розрахункової моделі скляної плити

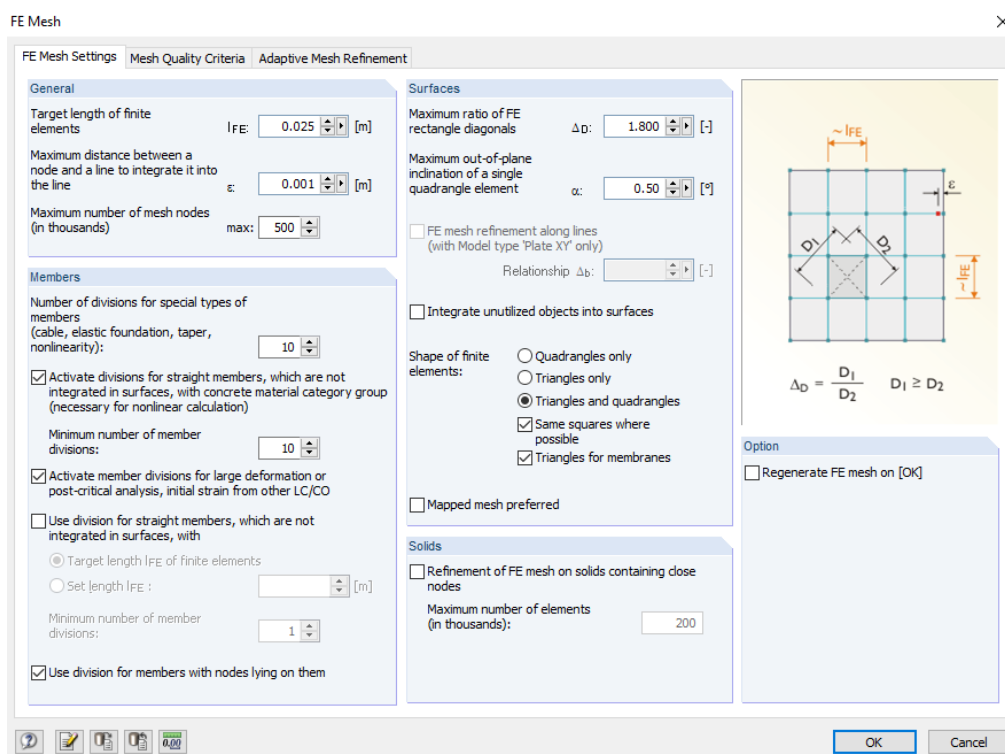


Рис.4.2 Побудова МСЕ моделі скляної плити

Для одношарової скляної плити були задані характеристики перерізу та матеріалу, а саме: висота перерізу, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, питому вагу матеріалу як для листового флоат-скла згідно норм prEN 13474-1:1999 [125], а також характеристичне значення міцності скла на розтяг при згині яка була визначали за допомогою кватильної функції Вейбулла на основі отриманих експериментальних випробувань зразків скла серії I (див.п.3.1) та становить $f_{gk,5\%} = 40,4$ МПа (рис. 4.3). Після цього було задано фізичну нелінійність матеріалу за допомогою закону Друкера-Прагера (рис.4.4 та 4.5).

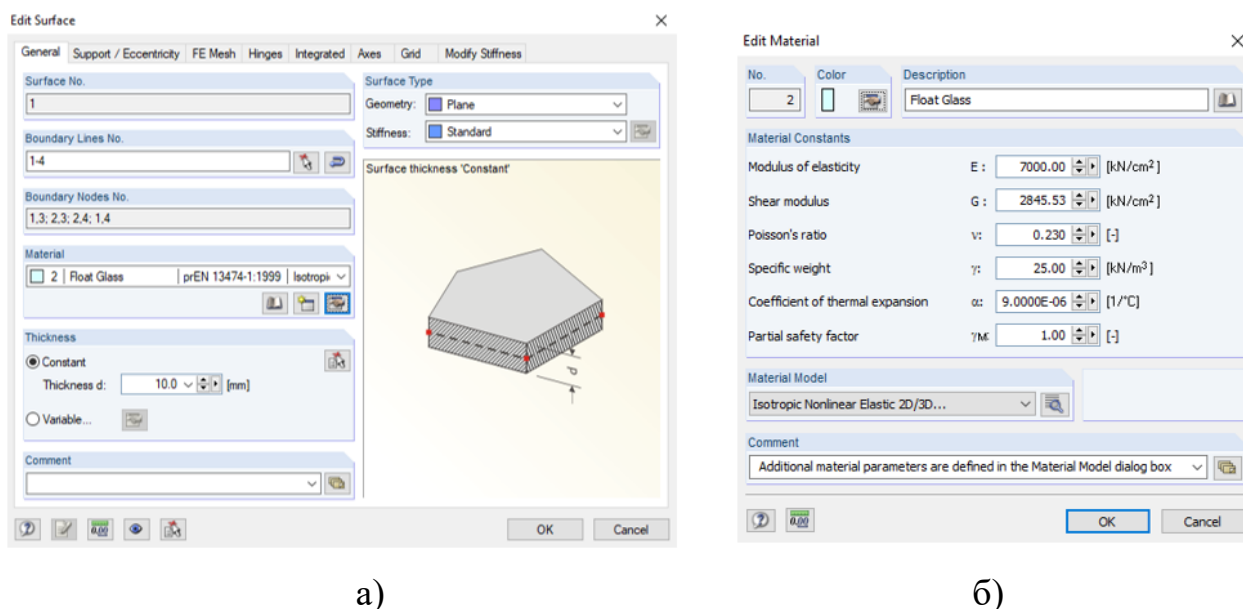


Рис.4.3. Задані характеристики матеріалу плити: а) обраний тип матеріалу плити та висота перерізу; б) параметри жорсткості матеріалу

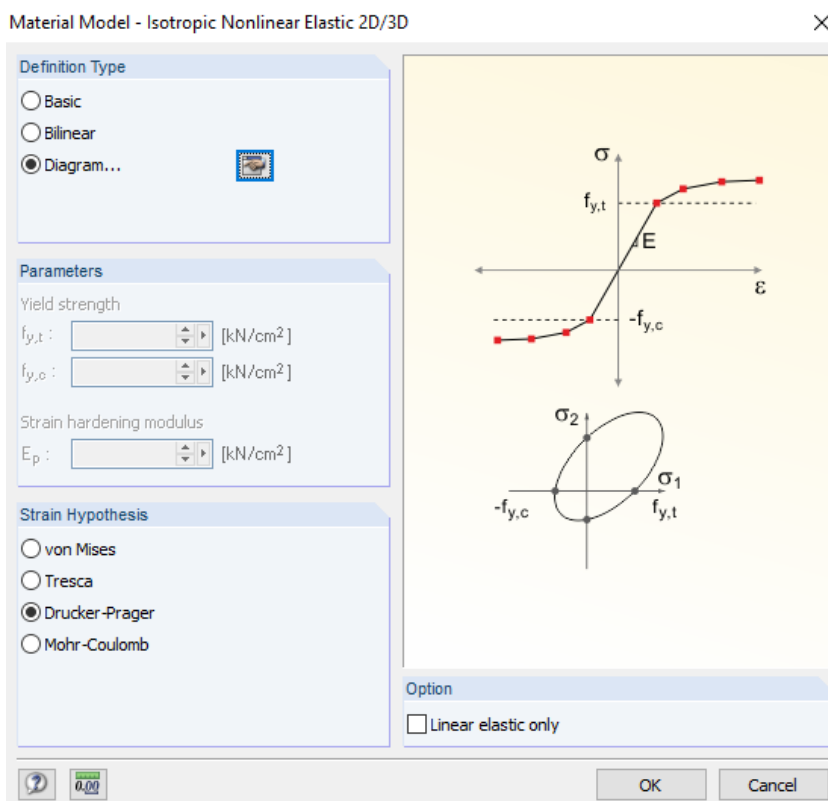


Рис. 4.4. Закон Друкера-Прагера для нелінійного деформування матеріалу плити, який було застосовано під час розрахунку скляних плит

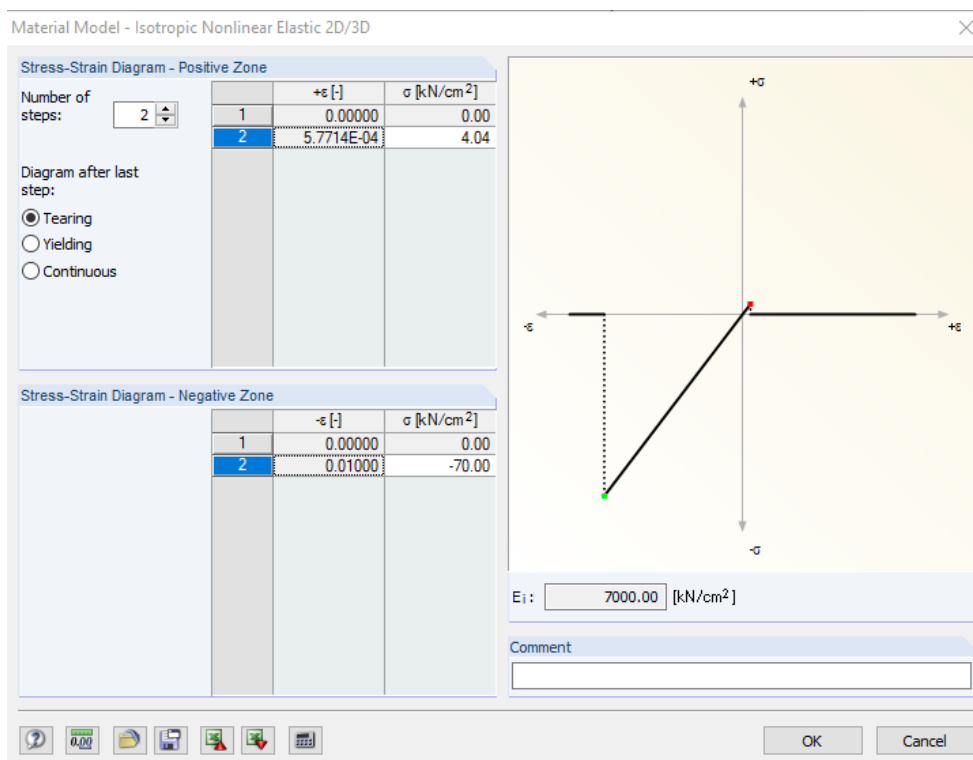


Рис. 4.5. Діаграма нелінійного закону «деформація-напруження» для скла.

Далі було задано рівномірно-розподілене поетапне навантаження по площі 0,1x0,1 м. посередині плити (рис.4.6). Приріст етапу навантаження становив: $F_i = 50 \text{ кН/м}^2$, що відповідало навантаженню штампом згідно прийнятої методики досліджень.

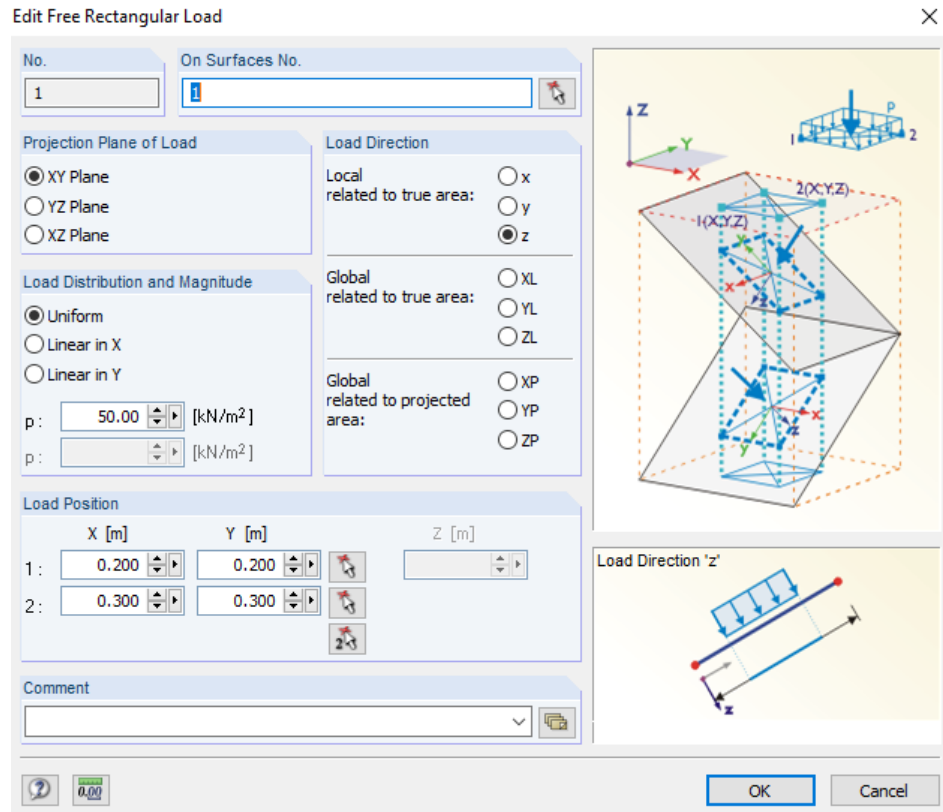


Рис. 4.6 Поетапне завантаження плити по площі штампу

На основі проведеного чисельно-аналітичного нелінійного розрахунку за допомогою програмного комплексу Dlubal RFEM, було отримано результати на кожному етапі завантаження скляної одношарової плити. Руйнування одношарової плити настало при досягненні величини критичного навантаження, що становило $F_{cr,1}^{calc} = 1,8 \text{ кН}$ (рис.4.7). Результати розрахунку при навантаженні $F_{cr,1}^{calc} = 1,8 \text{ кН}$ показано на рис.4.7...4.11.

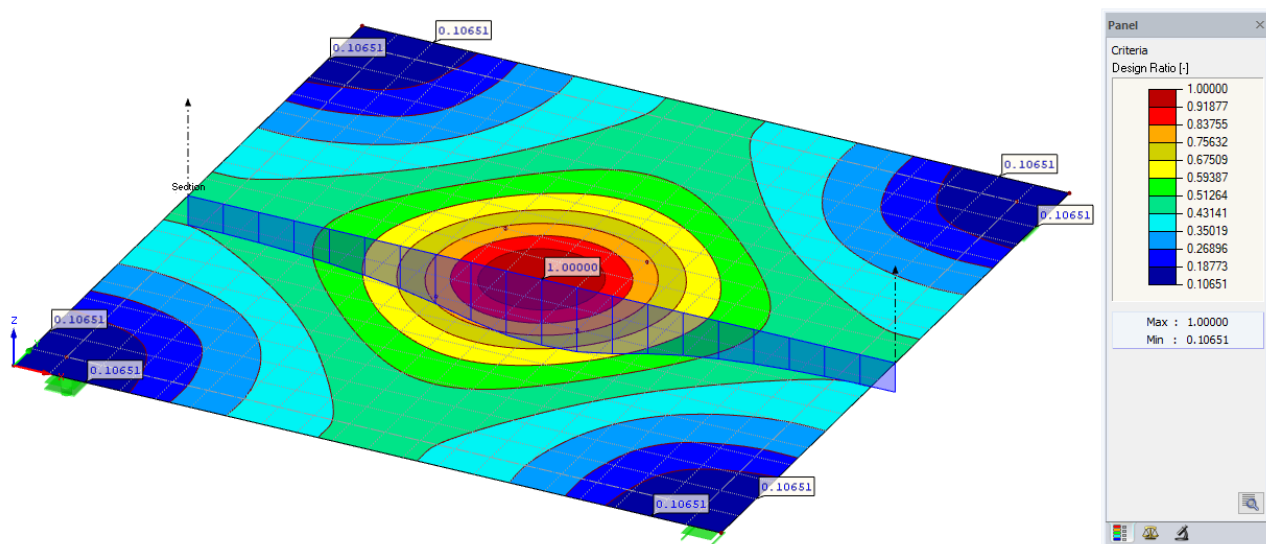


Рис.4.7. Ізополя співвідношення розрахункового напруження до критичного напруження

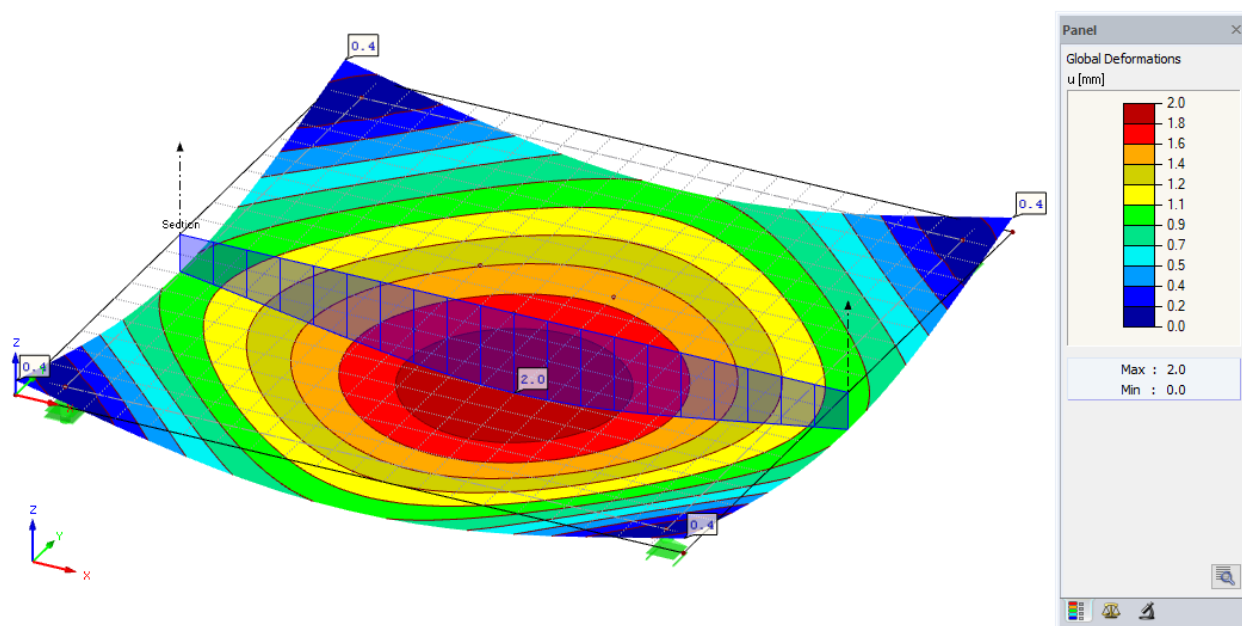
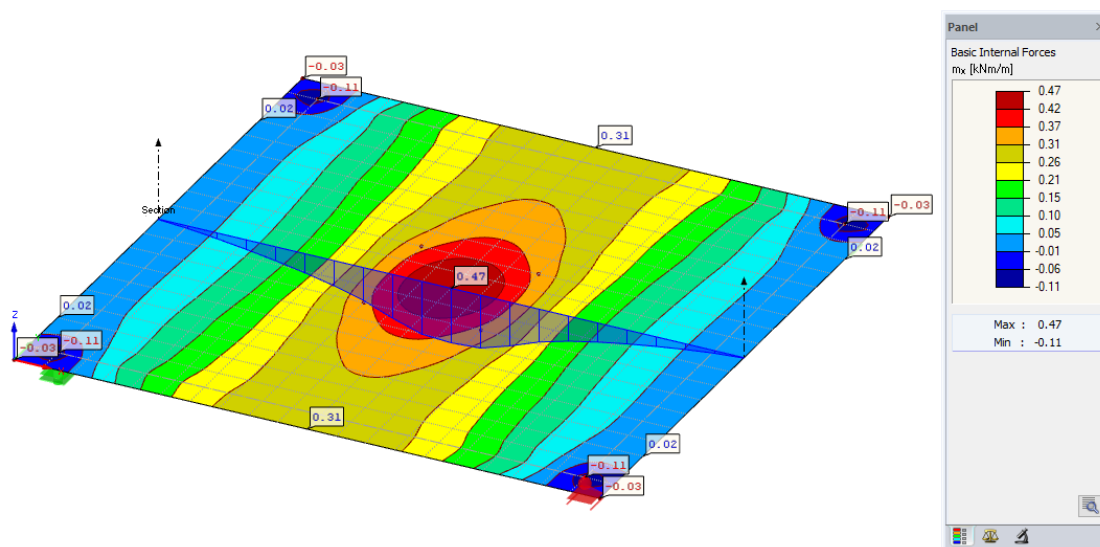
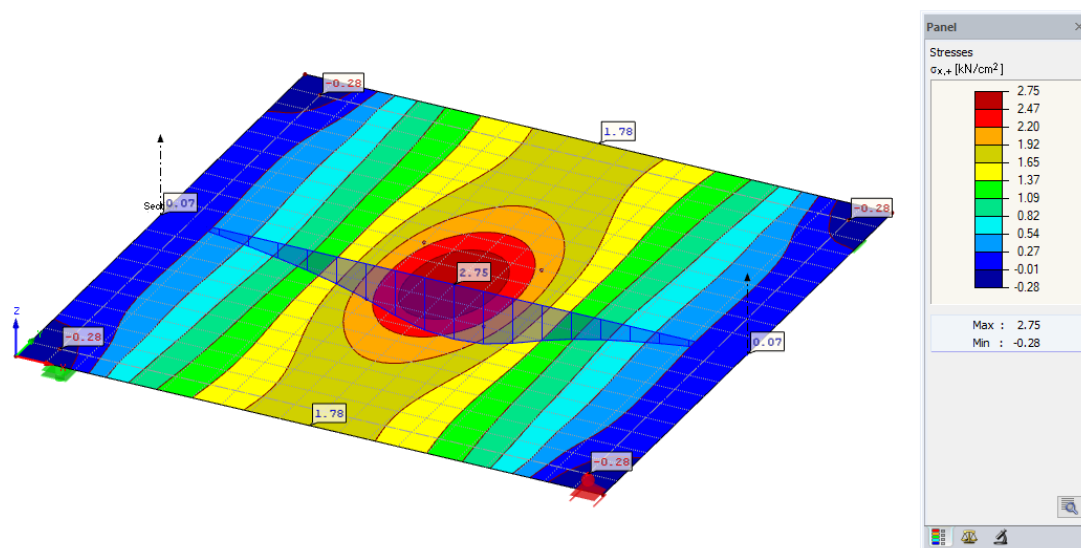
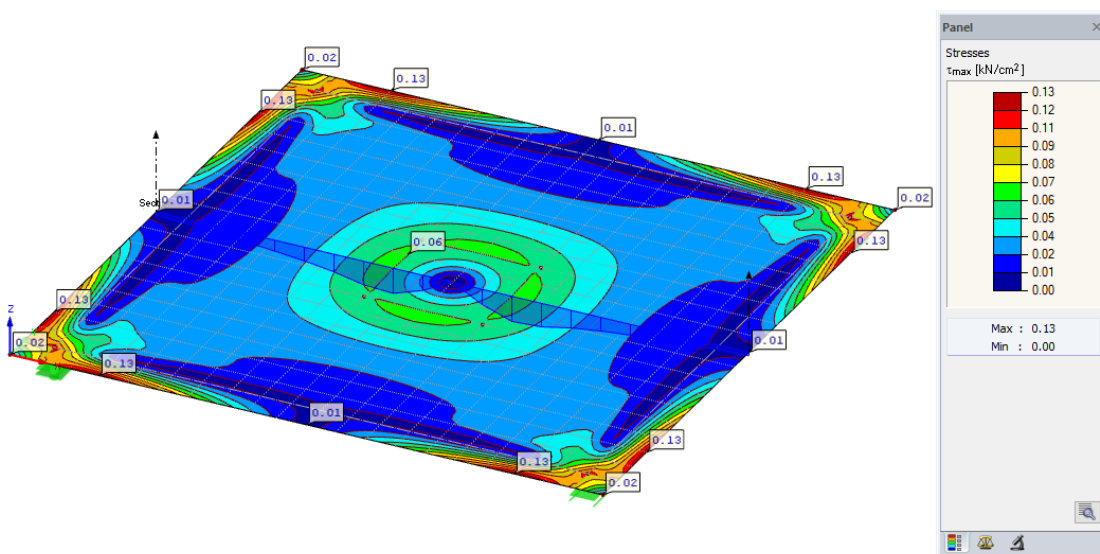


Рис.4.8. Ізополя критичних прогинів

Рис.4.9. Ізополя моментів M_x вздовж осі x Рис.4.10. Ізополя нормальних напружень σ_x вздовж осі x в нижньому шаріРис.4.11. Ізополя дотичних напружень τ_{max}

Двошарова скляна плита. Згідно проведеного розрахунку у п.4.1, було отримано значення ефективної товщини для двошарової плити які було задано для подальшого нелінійного розрахунку в ПК Dlubal RFEM: $h_{ef;w} = 13,82$ мм та $h_{ef;\sigma;1} = 15,47$ мм. Нелінійний розрахунок двошарових плит виконували аналогічно одношаровим плитам. Руйнування двошарової плити наступило при досягненні величини критичного навантаження, що становило $F_{cr,1}^{calc} = 5,0$ кН. Результати розрахунку при навантаженні $F_{cr,1}^{calc} = 5,0$ кН показано на рис. 4.12...4.16.

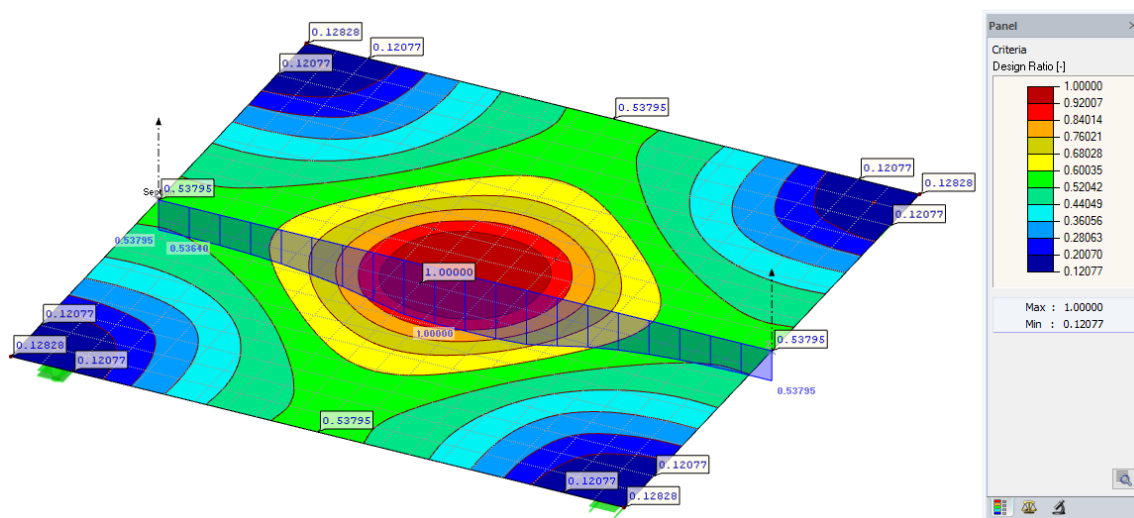


Рис.4.12. Ізополя співвідношення розрахункового напруження до критичного напруження

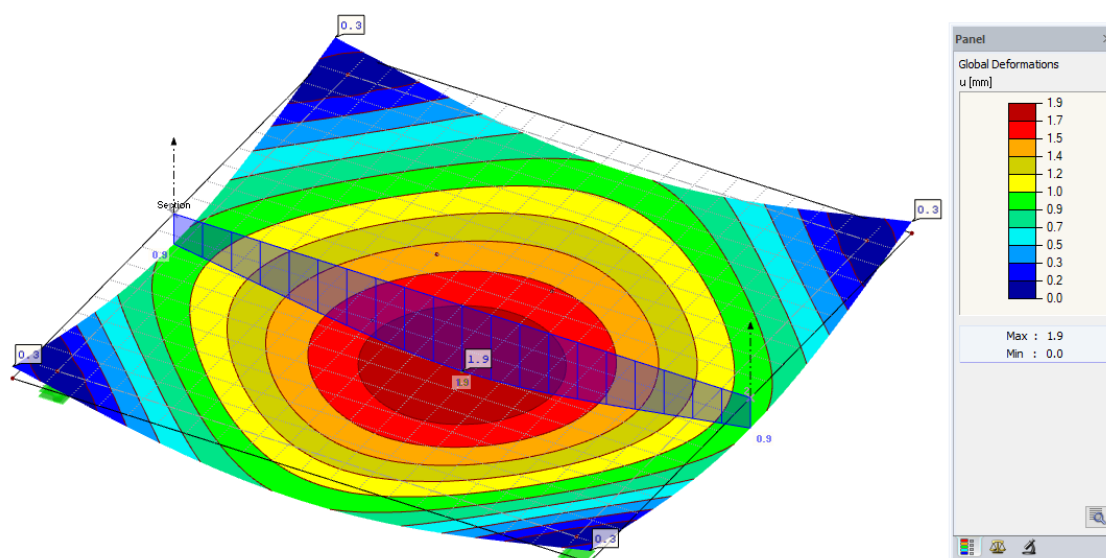
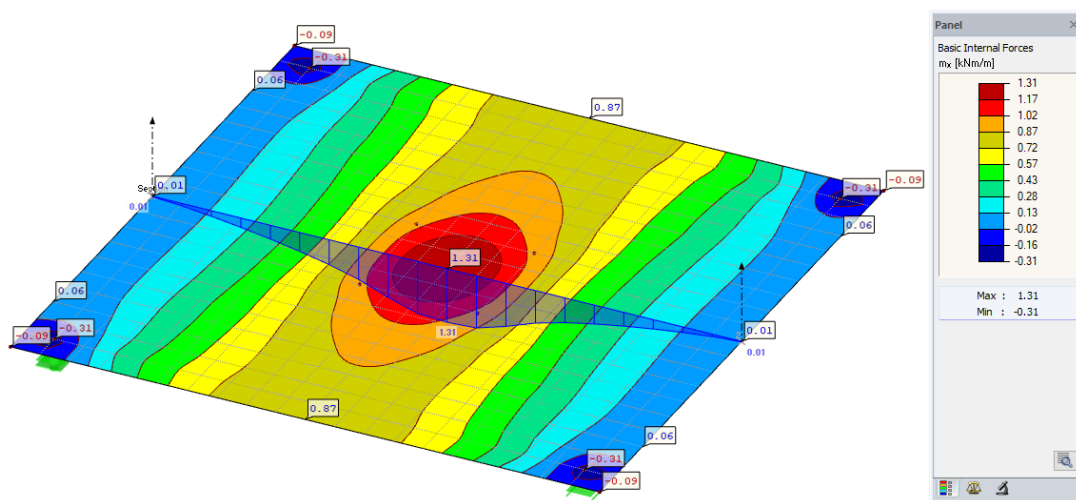
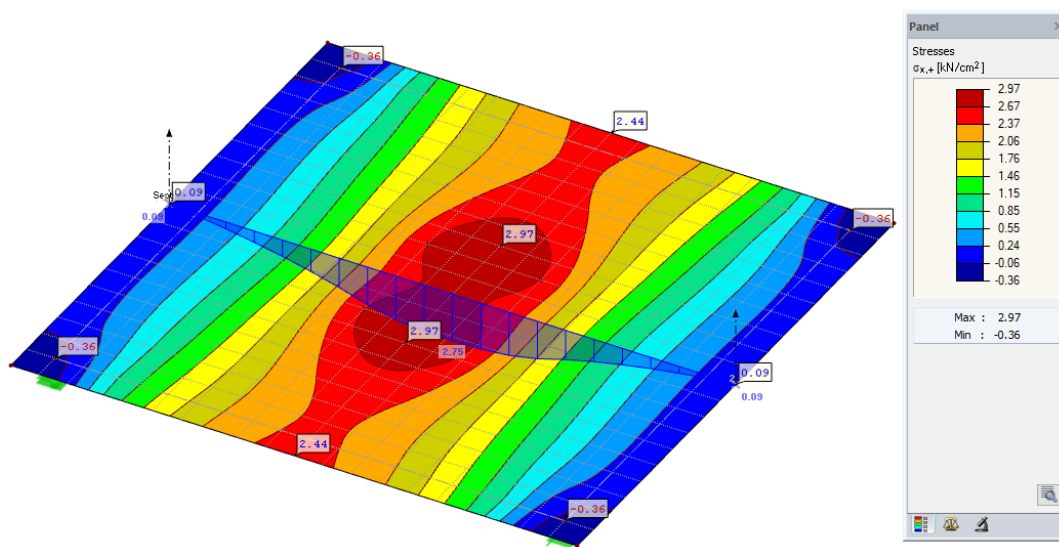
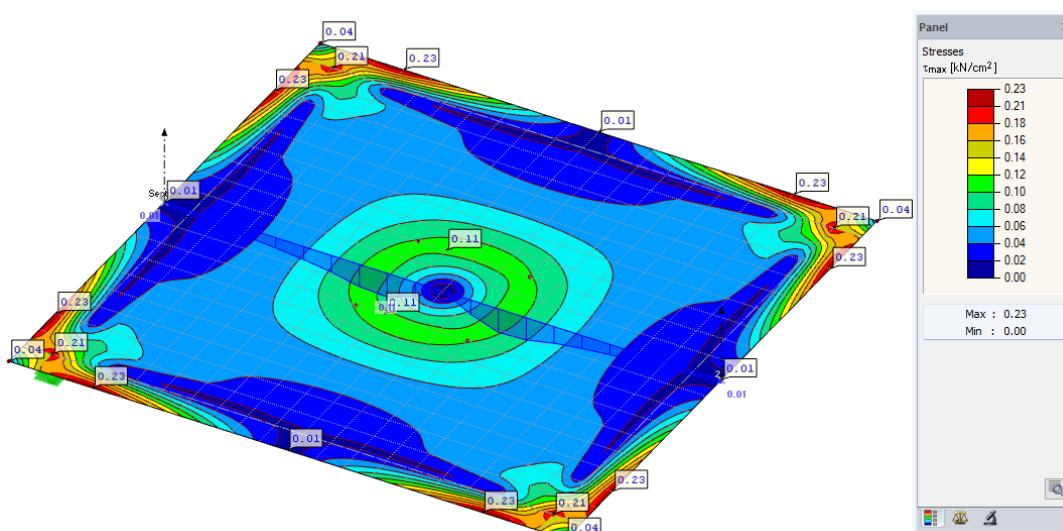


Рис.4.13. Ізополя критичних прогинів

Рис.4.14. Ізополя моментів M_x вздовж осі x Рис.4.15. Ізополя нормальних напружень σ_x вздовж осі x в нижньому шаріРис.4.16. Ізополя дотичних напружень τ_{max}

Трьохшарова скляна плити. Аналогічно двошаровим плитам, нелінійний розрахунок трьохшарових скляних плит виконували в ПК Dlubal RFEM з використанням отриманих в п.4.1 значень ефективної товщини: $h_{ef,w} = 20,52$ мм та $h_{ef;\sigma;1} = 25,72$ мм. Руйнування трьохшарової плити наступило при досягненні величини критичного навантаження, що становило $F_{cr,1}^{calc} = 14,0$ кН. Результати розрахунку при навантаженні $F_{cr,1}^{calc} = 14,0$ кН показано на рис. 4.17...4.21.

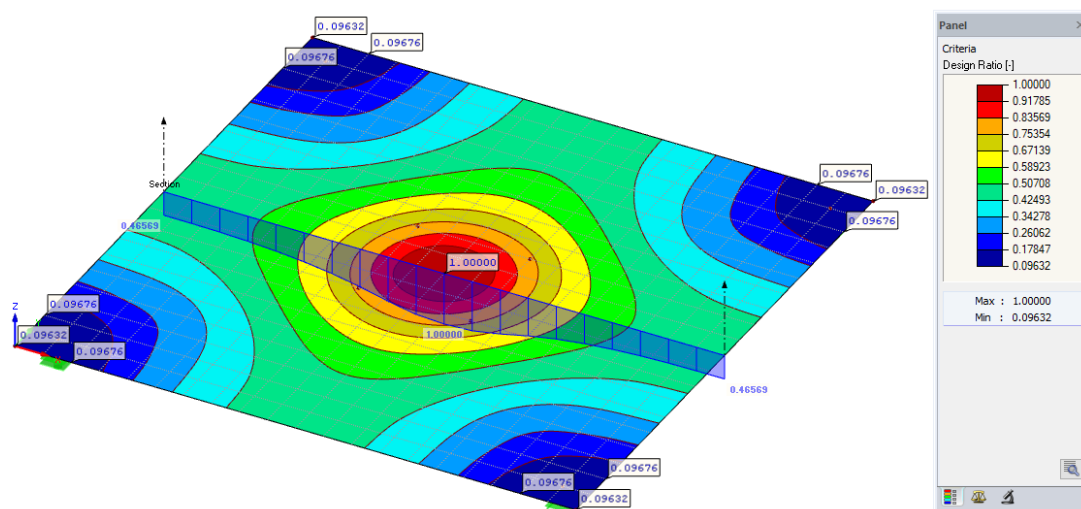


Рис.4.17. Ізополя співвідношення розрахункового напруження до критичного напруження

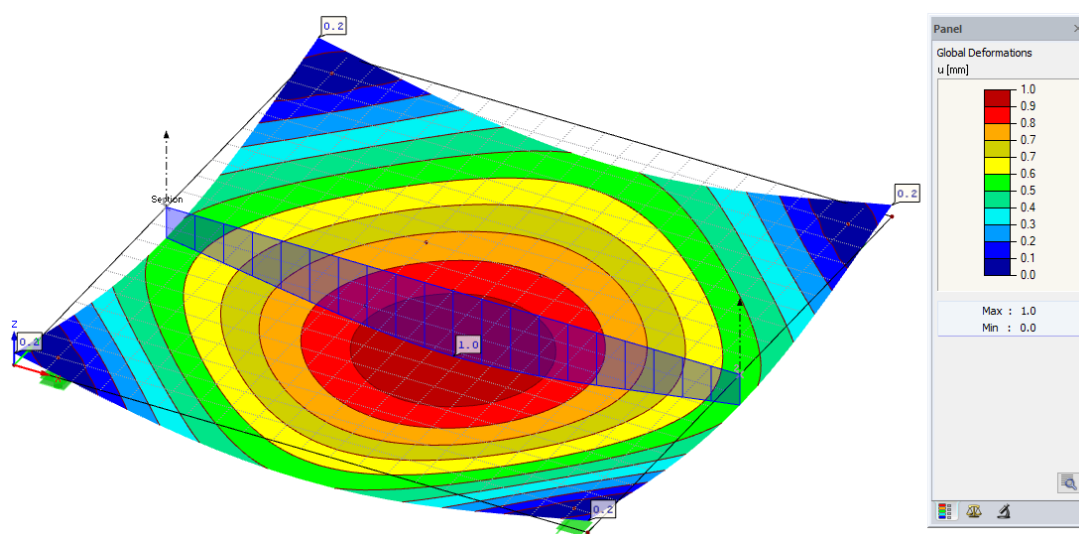
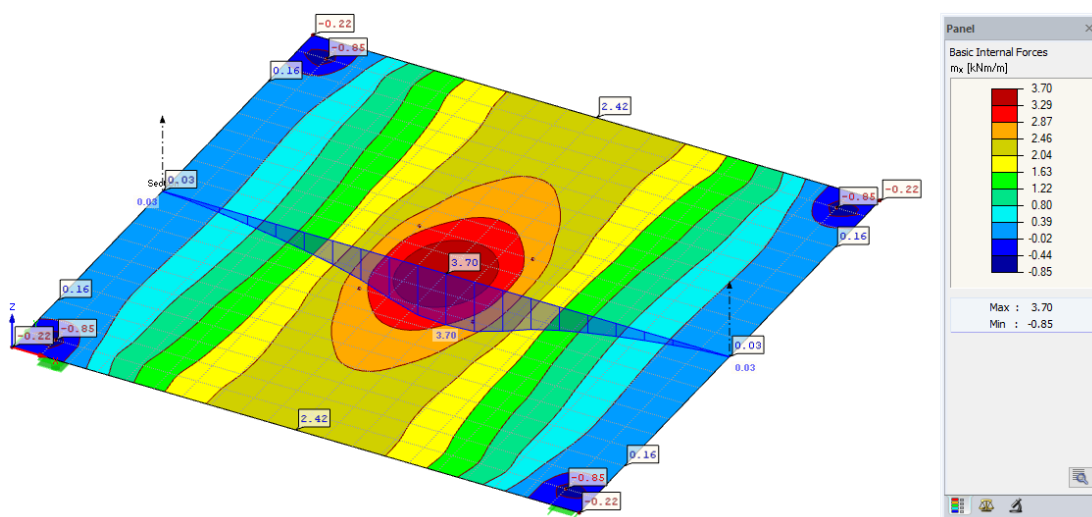
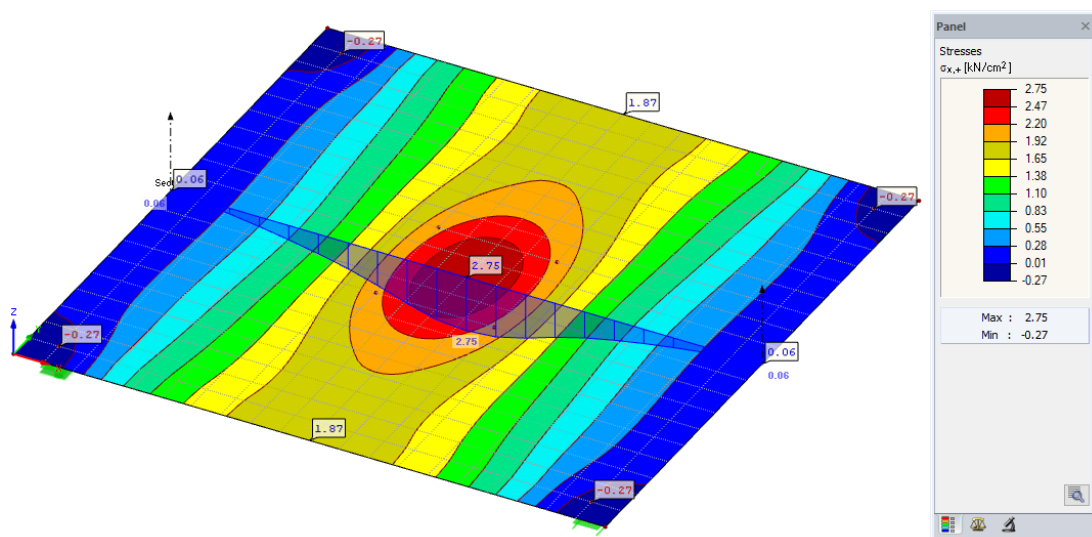
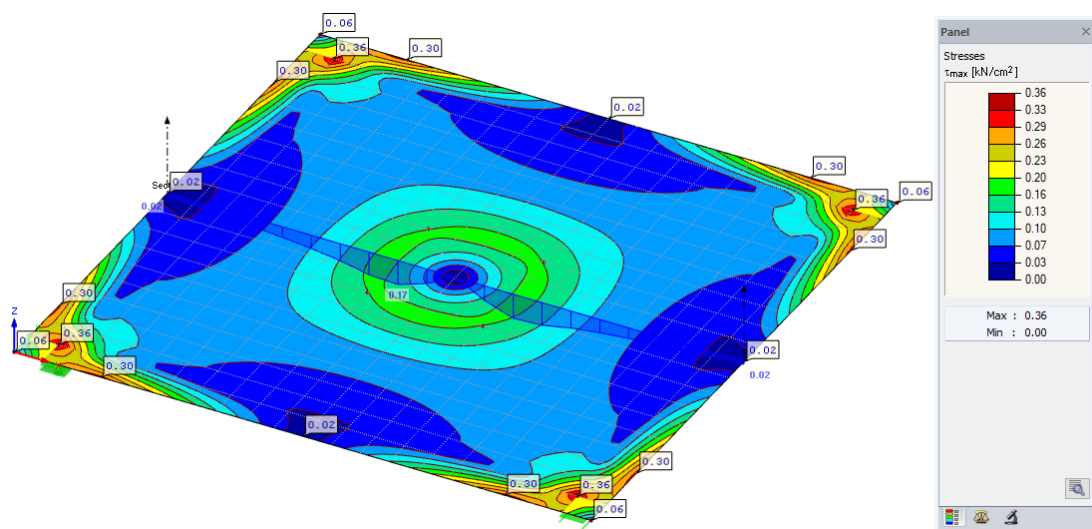


Рис.4.18. Ізополя критичних прогинів

Рис.4.19. Ізополя моментів M_x вздовж осі x Рис.4.20. Ізополя нормальних напружень σ_x вздовж осі x в нижньому шаріРис.4.21. Ізополя дотичних напружень τ_{max}

4.2.2. Лінійний розрахунок скляних плит.

Додатково для аналізу розподілу напружень в перерізі скляних плит було виконано лінійний розрахунок за TRLV:2006-08 [126] в додатковому модулі RF-GLASS на основі теорії міцності Губера-Мізеса (IV теорія міцності – критерій питомої потенціальної енергії деформації).

Одношарова скляна плита. Характеристики матеріалу були задані аналогічно як для нелінійного розрахунку (рис.4.22).

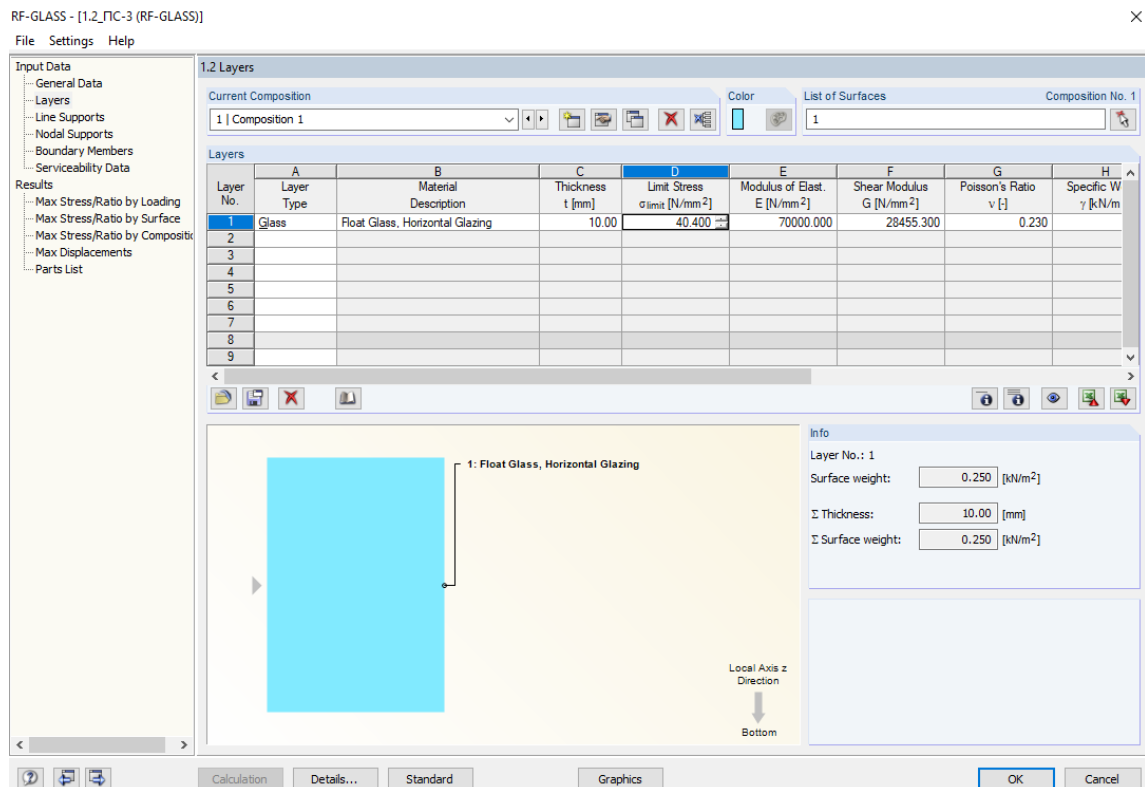


Рис.4.22. Задані характеристики матеріалу плити для лінійного розрахунку

В результаті проведеного лінійного розрахунку скляної одношарової плити було отримано значення критичного навантаження при якому відбувається руйнування плити - $F_{cr,2}^{cr} = 2,55$ кН, а також максимальні прогини, нормальні та дотичні напруження які при цьому виникають (рис.4.23...4.25).

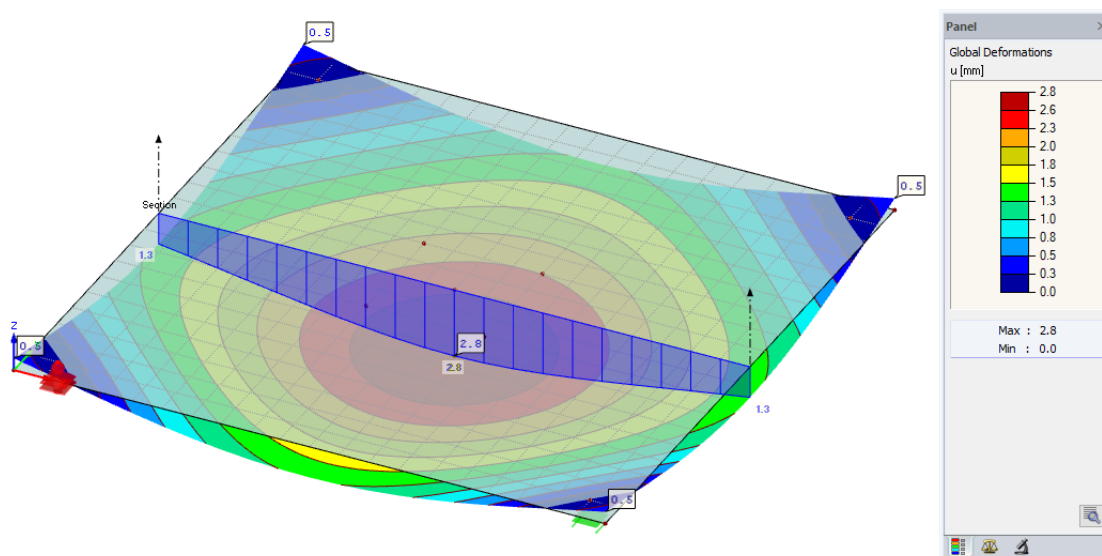
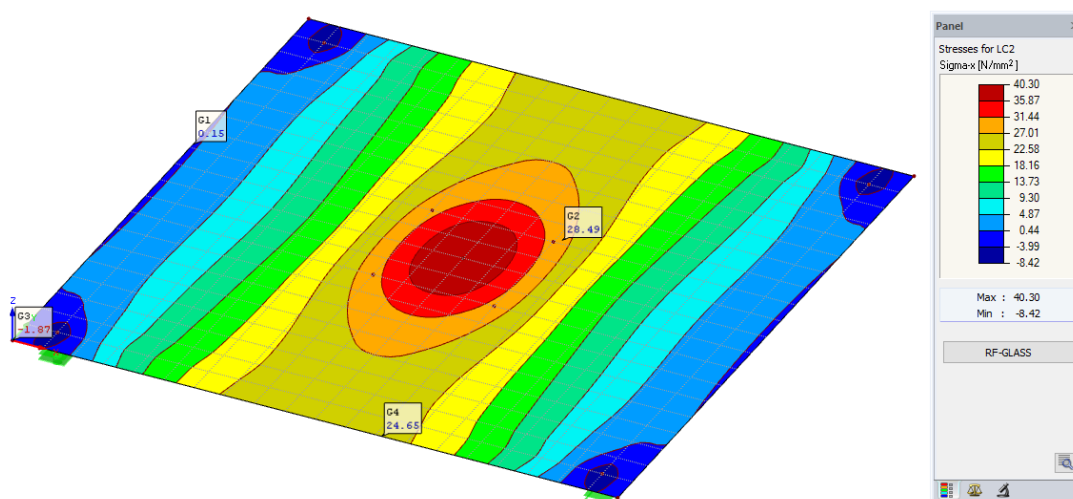
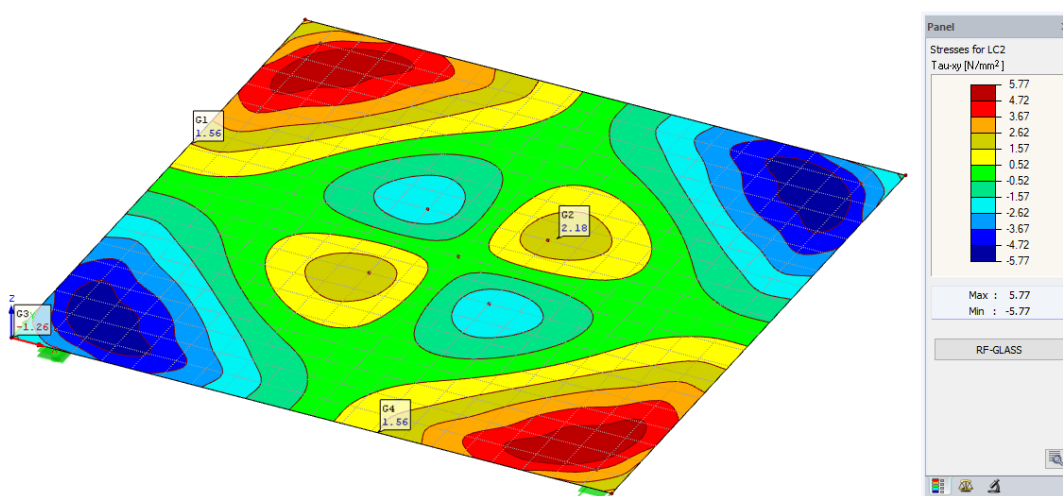


Рис.4.23. Ізополя критичних прогинів

Рис.4.24. Ізополя нормальних напружень σ_x вздовж осі x Рис.4.25. Ізополя дотичних напружень τ_{xy}

Двошарова скляна плита. Для лінійного розрахунку двошарових плит в RF-GLASS були задані характеристики скла аналогічно як для одношарових плит, переріз плити задано як триплекс який складається з двох шарів флоат-скла та одного шару полімерної плівки між шарами (рис.4.26).

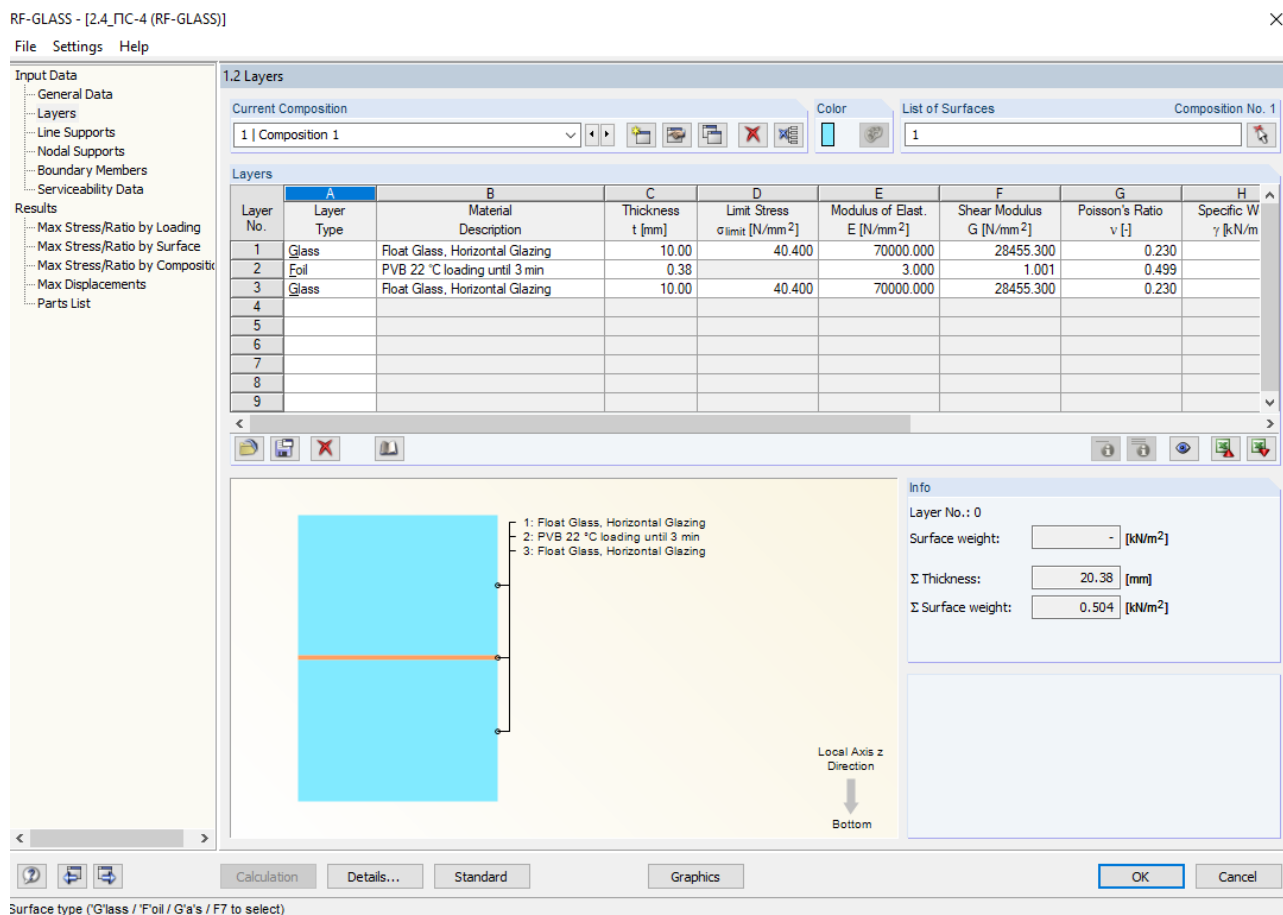


Рис.4.26. Задані характеристики матеріалу плити для лінійного розрахунку

Критичне навантаження при якому відбулося руйнування двошарової плити - $F_{cr,2}^{cr} = 5,9$ кН. Результати лінійного розрахунку двошарової плити при навантаженні $F_{cr,2}^{cr} = 5,9$ кН показано на рис.4.27...4.29.

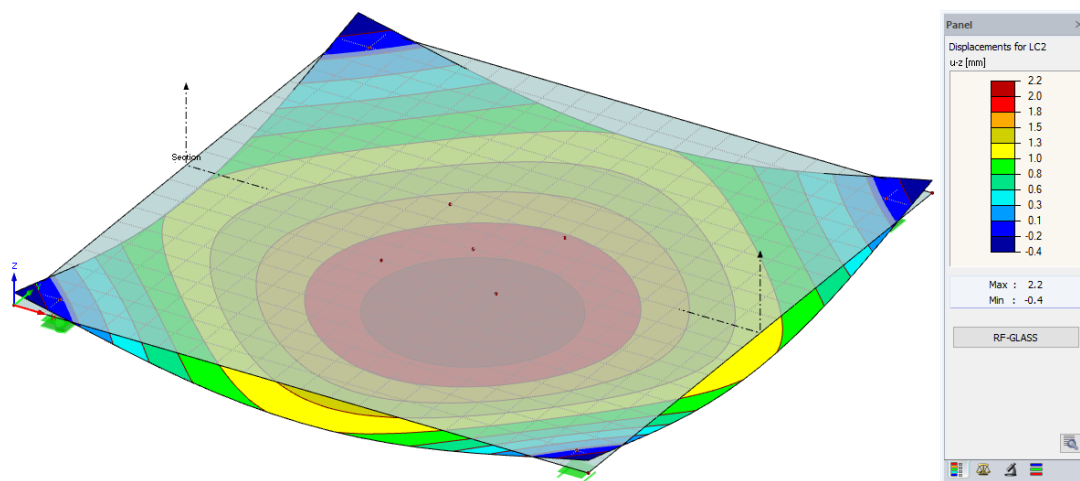
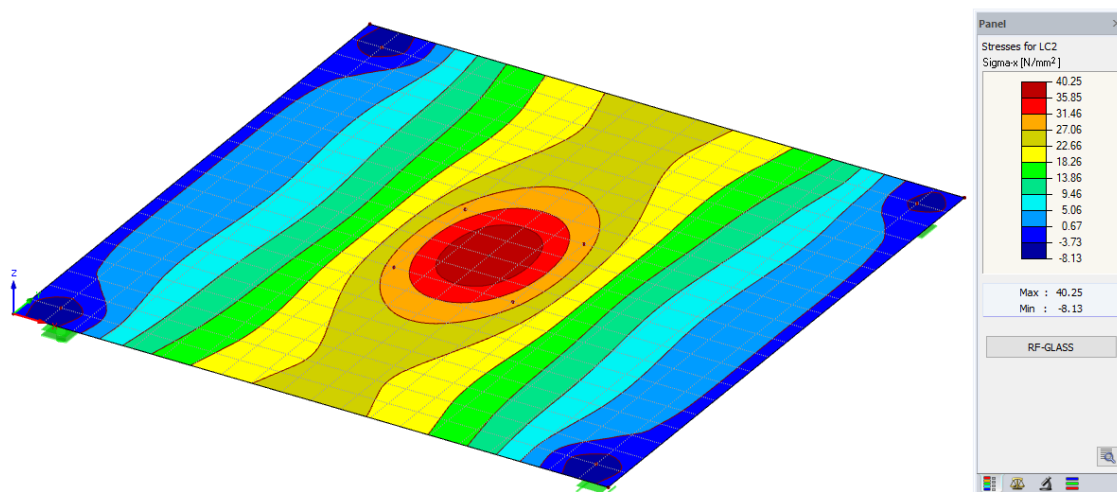
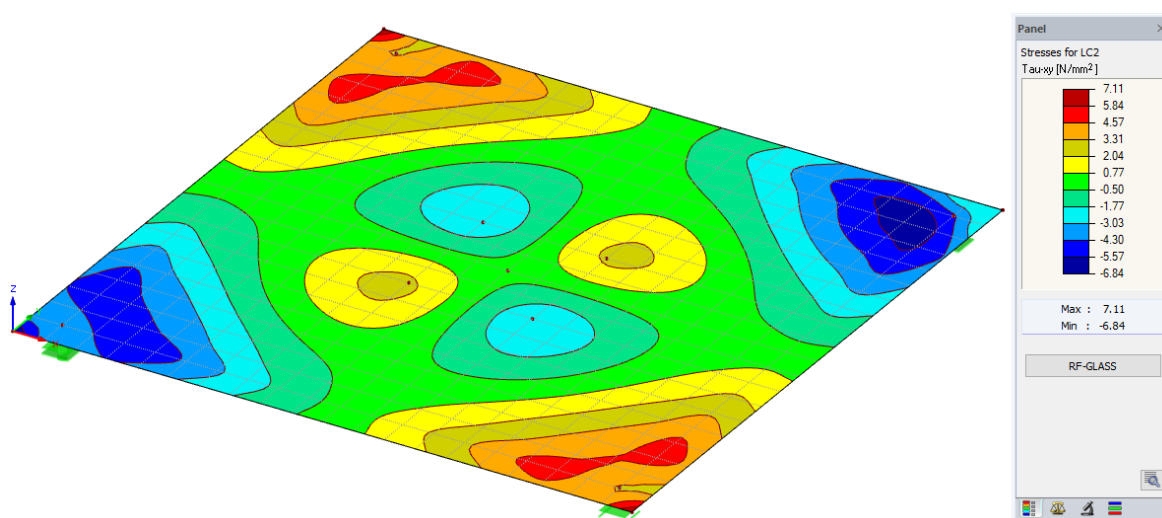


Рис.4.27. Ізополя критичних прогинів

Рис.4.28. Ізополя нормальних напружень σ_x вздовж осі x Рис.4.29. Ізополя дотичних напружень τ_{xy}

Трьохшарова скляна плита. Аналогічно двошаровим плитам, лінійний розрахунок трьохшарових скляних плит виконували в додатковому модулі RF-GLASS із заданим триплексом в перерізі плити, який складався з трьох шарів флоат-скла та двох шарів полімерної плівки (рис.4.30).

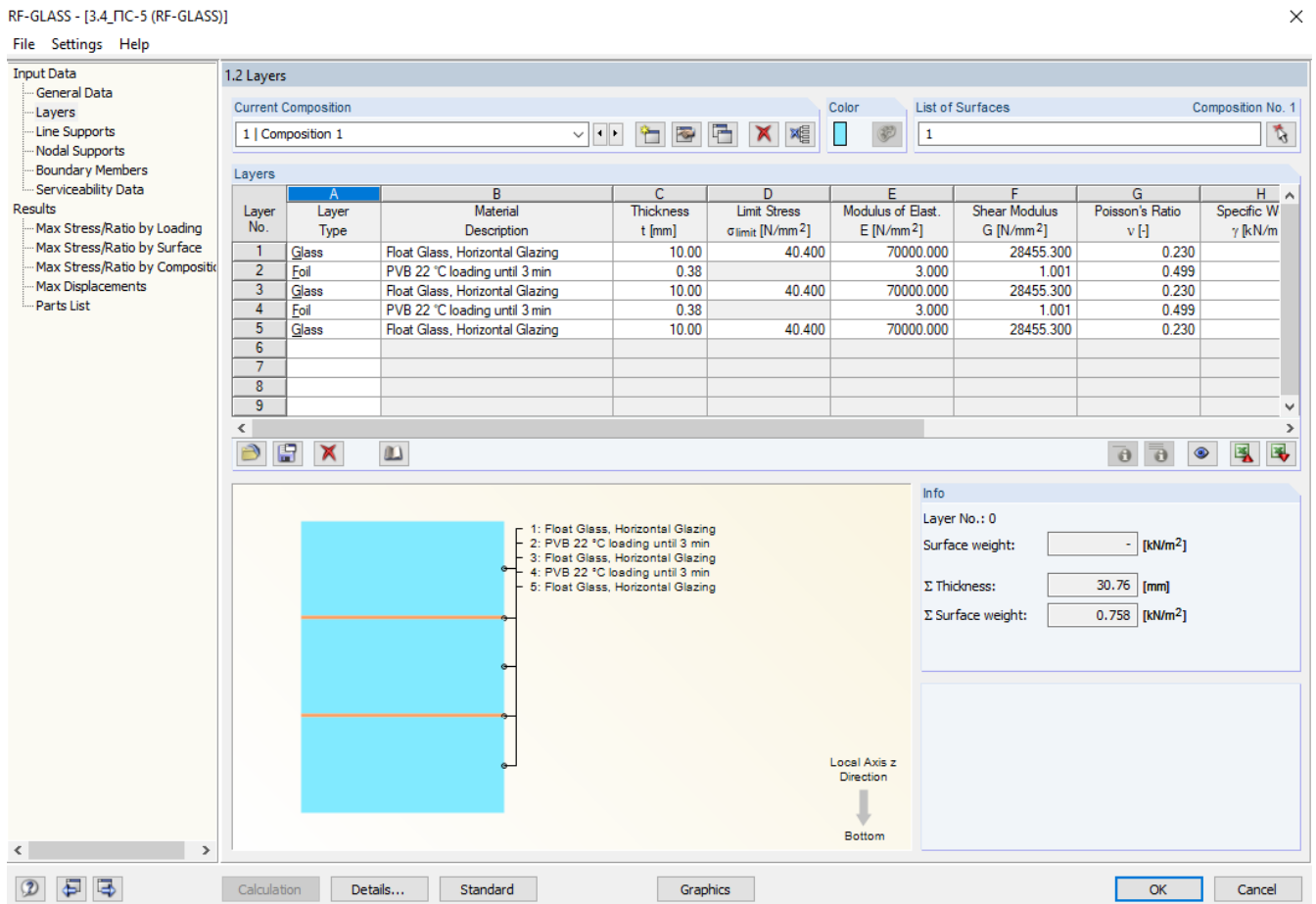


Рис.4.30. Задані характеристики матеріалу плити для лінійного розрахунку

Руйнування трьохшарової плити наступило при досягненні величини критичного навантаження, що становило $F_{cr,2}^{calc} = 9,5$ кН. Результати лінійного розрахунку трьохшарової плити при критичному навантаженні $F_{cr,2}^{calc} = 9,5$ кН показано на рис. 4.31...4.33.

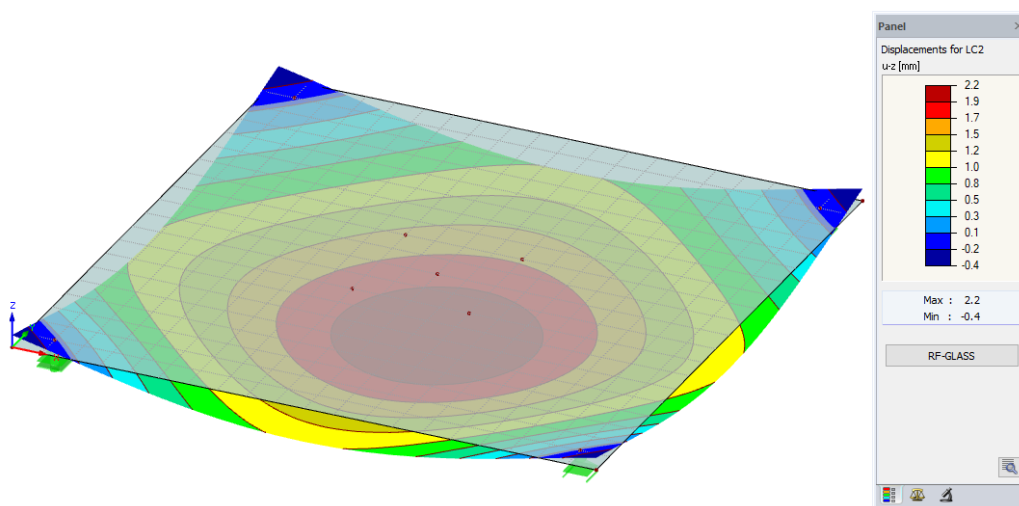
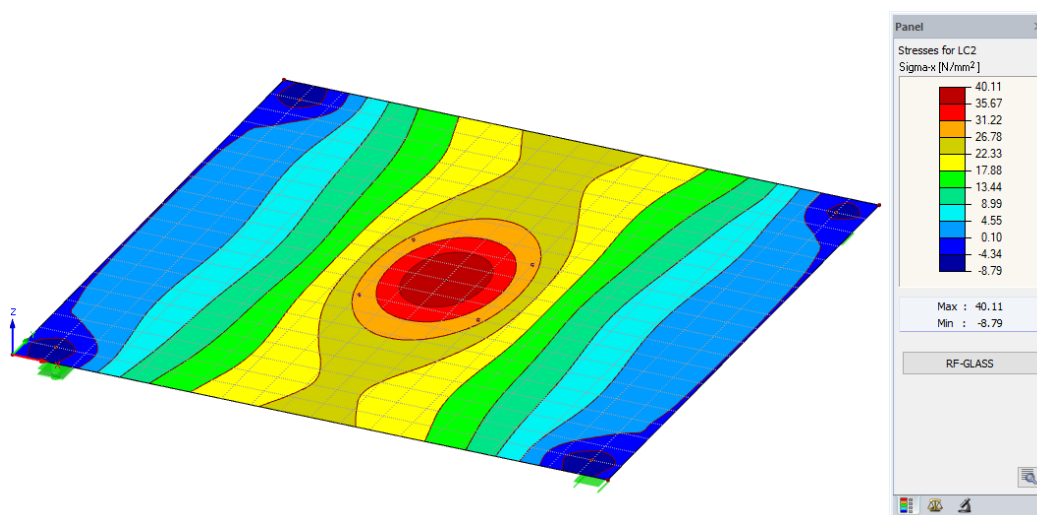
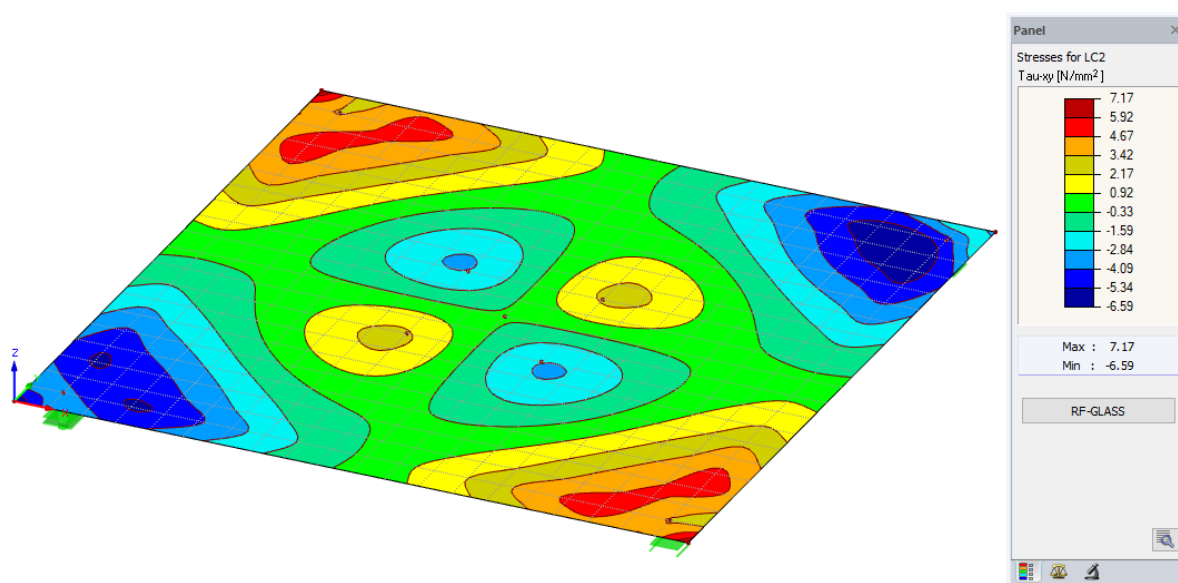


Рис.4.31. Ізополя критичних прогинів

Рис.4.32. Ізополя нормальних напружень σ_x вздовж осі x Рис.4.33. Ізополя дотичних напружень τ_{xy}

4.2.3. Аналіз та порівняння результатів чисельно-аналітичних методик розрахунку скляних плит.

В результаті проведених чисельно-аналітичних розрахунків та моделювання скляних плит на основі методу кінцевих елементів у програмному комплексі Dlubal RFEM були отримані значення руйнівних навантажень, прогинів, а також максимальних моментів, мембранних зусиль, нормальних та дотичних напружень. В табл.4.4.. табл.4.6 подано порівняння результатів розрахунку отриманих за допомогою двох чисельно-аналітичних методик (нелінійного розрахунку та лінійного розрахунку на основі теорії міцності Губера-Мізеса) з експериментальними значеннями для плит з різною кількістю шарів скла.

Таблиця 4.4.

Порівняння результатів чисельно-аналітичного розрахунку скляних плит із експериментальними значеннями для одношарових плит.

Методика розрахунку	Параметр	Одношарові плити	$K_{F,1}$	$K_{w,1}$
Нелінійний розрахунок	$F_{cr,1}^{calc}$, кН	1,8	1,79	-
	$w_{cr,1}^{calc}$, мм	2,0	-	0,98
Лінійний розрахунок	$F_{cr,2}^{calc}$, кН	2,55	1,26	-
	$w_{cr,2}^{calc}$, мм	2,8	-	1,37
Експериментальні дослідження	F_{cr}^{ex} , кН	3,23	-	-
	w_{cr}^{ex} , мм	2,04	-	-

Таблиця 4.5.

Порівняння результатів чисельно-аналітичного розрахунку скляних плит із експериментальними значеннями для двошарових плит.

Методика розрахунку	Параметр	Двошарові плити	$K_{F,2}$	$K_{w,2}$
Нелінійний розрахунок	$F_{cr,1}^{calc}$, кН	5,0	1,57	-
	$w_{cr,1}^{calc}$, мм	1,9	-	1,08
Лінійний розрахунок	$F_{cr,2}^{calc}$, кН	5,9	1,33	-
	$w_{cr,2}^{calc}$, мм	2,2	-	1,25
Експериментальні дослідження	F_{cr}^{ex} , кН	7,85	-	-
	w_{cr}^{ex} , мм	1,75	-	-

Таблиця 4.6.

Порівняння результатів чисельно-аналітичного розрахунку скляних плит із експериментальними значеннями для трьохшарових плит.

Методика розрахунку	Параметр	Трьохшарові плити	$K_{F,3}$	$K_{w,3}$
Нелінійний розрахунок	$F_{cr,1}^{calc}$, кН	14,0	1,28	-
	$w_{cr,1}^{calc}$, мм	1,0	-	0,53
Лінійний розрахунок	$F_{cr,2}^{calc}$, кН	9,5	1,88	-
	$w_{cr,2}^{calc}$, мм	2,2	-	1,17
Експериментальні дослідження	F_{cr}^{ex} , кН	17,92	-	-
	w_{cr}^{ex} , мм	1,88	-	-

В результаті проведеного порівняльного аналізу розрахунків руйнівних навантажень та прогинів скляних плит було отримано наступні коефіцієнти запасу для несучої здатності та прогинів скляних плит:

- для одношарових плит: середнє значення експериментальних розрахункових руйнівних навантажень перевищує розрахункові значення

- за нелінійною методикою на коефіцієнт $K_{F,1} = F_{cr}^{ex} / F_{cr,1}^{calc} = 3,23 / 1,8 = 1,79$ (табл.4.4), та відповідно $K_{F,1} = F_{cr}^{ex} / F_{cr,2}^{calc} = 3,23 / 2,55 = 1,26$ (табл.4.4) за лінійним розрахунком; співвідношення розрахункових значень прогинів до максимальних експериментальних прогинів рівне коефіцієнту - $K_{w,1} = w_{cr}^{ex} / w_{cr,1}^{calc} = 2,0 / 2,04 \text{ мм} = 0,98$ (табл.4.4) за нелінійним методом; та відповідно за лінійною методикою - $K_{w,1} = w_{cr,2}^{calc} / w_{cr}^{ex} = 2,8 / 2,04 = 1,37$ (табл.4.4).
- для двошарових плит: середнє значення експериментальних розрахункових руйнівних навантажень перевищує розрахункові значення за нелінійною методикою на коефіцієнт $K_{F,2} = F_{cr}^{ex} / F_{cr,1}^{calc} = 7,85 / 5,0 = 1,57$ (табл.4.5), та відповідно $K_{F,2} = F_{cr}^{ex} / F_{cr,2}^{calc} = 7,85 / 5,9 = 1,33$ (табл.4.5) за лінійним розрахунком; співвідношення розрахункових значень прогинів до максимальних експериментальних прогинів рівне коефіцієнту - $K_{w,2} = w_{cr,1}^{calc} / w_{cr}^{ex} = 1,9 / 1,75 \text{ мм} = 1,08$ (табл.4.5) за нелінійною методикою, та відповідно за лінійною методикою - $K_{w,2} = w_{cr,2}^{calc} / w_{cr}^{ex} = 2,2 / 1,75 = 1,25$ (табл.4.5).
 - для трьохшарових плит: середнє значення експериментальних розрахункових руйнівних навантажень перевищує розрахункові значення за нелінійною методикою на коефіцієнт $K_{F,3} = F_{cr}^{ex} / F_{cr,1}^{calc} = 17,92 / 14,0 = 1,28$ (табл.4.6), та відповідно $K_{F,3} = F_{cr}^{ex} / F_{cr,2}^{calc} = 17,92 / 9,5 = 1,88$ (табл.4.6) за лінійним розрахунком; співвідношення розрахункових значень прогинів до максимальних експериментальних прогинів рівне коефіцієнту - $K_{w,3} = w_{cr,1}^{calc} / w_{cr}^{ex} = 1,0 / 1,88 \text{ мм} = 0,53$ (табл.4.6), за нелінійним методом, та відповідно за лінійним методом - $K_{w,3} = w_{cr,2}^{calc} / w_{cr}^{ex} = 2,2 / 1,88 = 1,17$ (табл.4.6).

Проведений аналіз даних свідчить згідно використаних методик розрахунку, розрахункові руйнівні навантаження F_{cr}^{calc} були дещо менші порівняно з експериментальними значеннями F_{cr}^{ex} (див. табл. 4.4). Розрахункові максимальні прогини $w_{cr,1}^{calc}$ були дещо більшими порівняно з експериментальними w_{cr}^{ex} згідно лінійного розрахунку. Таким чином це дає можливість рахувати несучу здатність скляних плит за допомогою програмного забезпечення Dlubal RFEM з достатньою точністю та запасом несучої здатності, а також прогинів. Методика нелінійного розрахунку може бути рекомендована для подальших розрахунків несучої здатності скляних плит з різною кількістю шарів скла. Методика лінійного розрахунку дає можливість з високою достовірністю порахувати прогини скляних плит, та може бути рекомендована для подальших розрахунків.

4.3. Розрахунок довговічності одношарових скляних плит на основі лінійно-пружної механіки руйнування.

Згідно представленої методики розрахунку довговічності (часу експлуатації) скла на основі лінійно-пружної механіки руйнування представленої у п.1.4, було виконано розрахунок часу до руйнування відповідно до М. Вієнса [87] та Н. Немета [79] за формулою (4.7):

$$t_f = B \cdot \sigma_{IC}^{n-2} \cdot \sigma_a^{-n} \quad (4.7)$$

де σ_{IC} – критичні напруження при початковій довжині тріщини [87];

B – експериментально встановлений параметр росту тріщини який обчислюється за середнім часом до руйнування при відповідних прикладених напруженнях σ_a :

$$B = \frac{2}{v_0 \cdot Y^2 \cdot (n-2) \cdot K_{IC}^{-2}} \quad (4.12)$$

Для розрахунку довговічності застосовано критерії тріщиностійкості які було визначено шляхом проведення фрактографічного аналізу на поверхні руйнування дослідних зразків серії I (див.п.3.5). а також характеристичне значення міцності скла на розтяг при згині яка була визначали за допомогою квартильної функції

Вейбулла на основі отриманих експериментальних випробувань зразків скла серії I (див.п.3.1) $f_{gk,5\%} = 40,4$ МПа.

В результаті проведеного аналітичного розрахунку довговічності скляних балочних плит на основі лінійно-пружної механіки руйнування були отримані значення часу до руйнування при різних величинах прикладеного зовнішнього навантаження. Результати розрахунку, а також отримані коефіцієнти запасу по часу в результаті порівняння розрахункових значень та експериментальних даних подано в табл.4.7. На рис. 4.34 показано у графічному вигляді порівняння результатів розрахункового значення часу з експериментальними даними для балочних плит при аналогічних значеннях зовнішнього навантаження.

Таблиця 4.7

Результати аналітичного розрахунку часу для скляних балочних плит

Марка зразка	Величина навантаження від руйнівного	Експериментальні значення часу до руйнування t , хв.	Розрахункові значення часу до руйнування t_f , хв	$K_t = \frac{t}{t_f}$	$K_{t,сер}$
ПС-2.1	F	0,9	0,88	1,02	1,07
ПС-2.2		0,86		0,97	
ПС-2.3		0,9		1,02	
ПС-2.4		1,15		1,30	
ПС-2.5	0,75F	95	60,77	1,56	1,29
ПС-2.6		62		1,02	
ПС-2.7	0,7F	117	97,31	1,20	1,10
ПС-2.8		98		1,01	
ПС-2.9	0,6F	638	546,03	1,16	1,12
ПС-2.10		587		1,07	

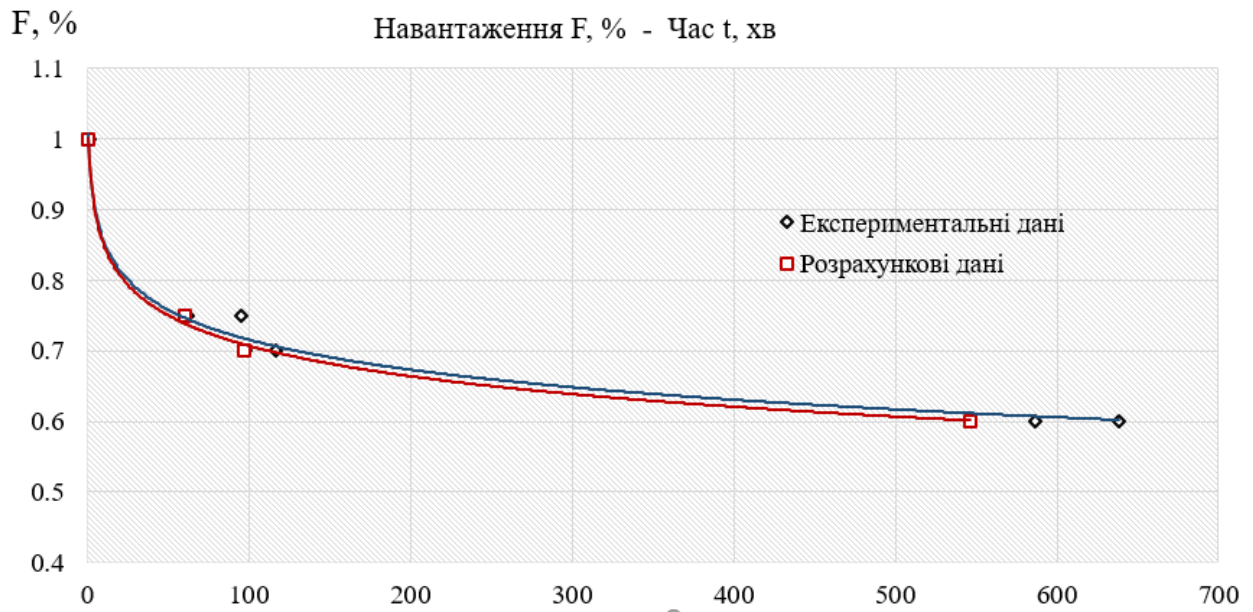


Рис. 4.34. Порівняння результатів аналітичного розрахунку часу до руйнування із експериментальними значеннями для скляних балочних плит.

На основі порівняння розрахункових та експериментальних значень часу до руйнування і отриманих коефіцієнтів запаси (табл.4.7), а також побудованих графіків (рис 4.34), можна зробити наступні висновки: експериментально отримані середні значення часу до руйнування $t_{сер}$ були дещо більші за розрахункові значення t_f , а коефіцієнт запасу по часу знаходиться в межах $K_t = 1,07 \div 1,29$. Перевищення експериментальних значень над розрахунковими підтверджує, що обрана методика розрахунку довговічності, а також методика проведення фрактографічного аналізу для встановлення параметрів тріщиностійкості дають можливість з достатньою точністю визначити час до руйнування для скляних одношарових плит.

4.4. Рекомендації щодо проектування скляних плит

За результатами проведених експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків скляних плит з різною кількістю шарів скла, які були шарнірно оперті по чотирьох кутах та працювали на згин у двох взаємно перпендикулярних напрямках, було розроблено наступні рекомендації щодо проектування:

1. Рекомендовано виготовляти скляні плити з флоат-скла згідно технології триплексації за допомогою одного шару полімерної плівки EVASAFE, а для збільшення несучої здатності плит та зменшення їх прогинів, а відповідно і надійності використовувати два або більше шарів скла.

2. Для розрахунку несучої здатності скляних плит рекомендовано використовувати чисельно-аналітичний нелінійний розрахунок за допомогою методу кінцевих елементів у програмному комплексі Dlubal RFEM (II методика), або аналітичний розрахунок скляних плит на основі ефективної товщини згідно теорії пластин Тимошенка Войновського-Кригера (I методика).

3. Для розрахунку прогинів скляних плит рекомендовано використовувати чисельно-аналітичний лінійний розрахунок за TRLV:2006-08 в додатковому модулі RF-GLASS на основі теорії міцності Губера-Мізеса (IV теорія міцності – критерій питомої потенціальної енергії деформації), або аналітичний метод розрахунку на основі теорії пластин Тимошенка Войновського-Кригера (I або II методика).

4. При розрахунку несучої здатності одношарових плит за нелінійним розрахунком у програмному комплексі Dlubal RFEM рекомендовано використовувати коефіцієнт запасу несучої здатності який становить $K_{F,1} = 1,79$, та для розрахунку прогинів за лінійним розрахунком коефіцієнт запасу по прогинах $K_{w,1} = 1,37$.

5. Для двошарових плит рекомендовано використовувати коефіцієнт запасу несучої здатності при розрахунку несучої здатності за нелінійним розрахунком у програмному комплексі Dlubal RFEM, який становить $K_{F,2} = 1,57$, та для розрахунку прогинів за лінійним розрахунком коефіцієнт запасу по прогинах для двошарових плит $K_{w,2} = 1,25$.

6. При розрахунку несучої здатності трьохшарових плит за нелінійним розрахунком у програмному комплексі Dlubal RFEM рекомендовано використовувати коефіцієнт запасу несучої здатності який становить $K_{F,3} = 1,79$,

та для розрахунку прогинів за лінійним розрахунком коефіцієнт запасу по прогинах $K_{w,3} = 1,17$.

7. Для розрахунку довговічності (часу до руйнування) скла рекомендовано використовувати розрахунок на основі лінійно-пружної механіки руйнування за рівнянням М. Вієнса та Н. Немета та за критеріями тріщиностійкості які визначено шляхом проведення фрактографічного аналізу на поверхні руйнування дослідних зразків.

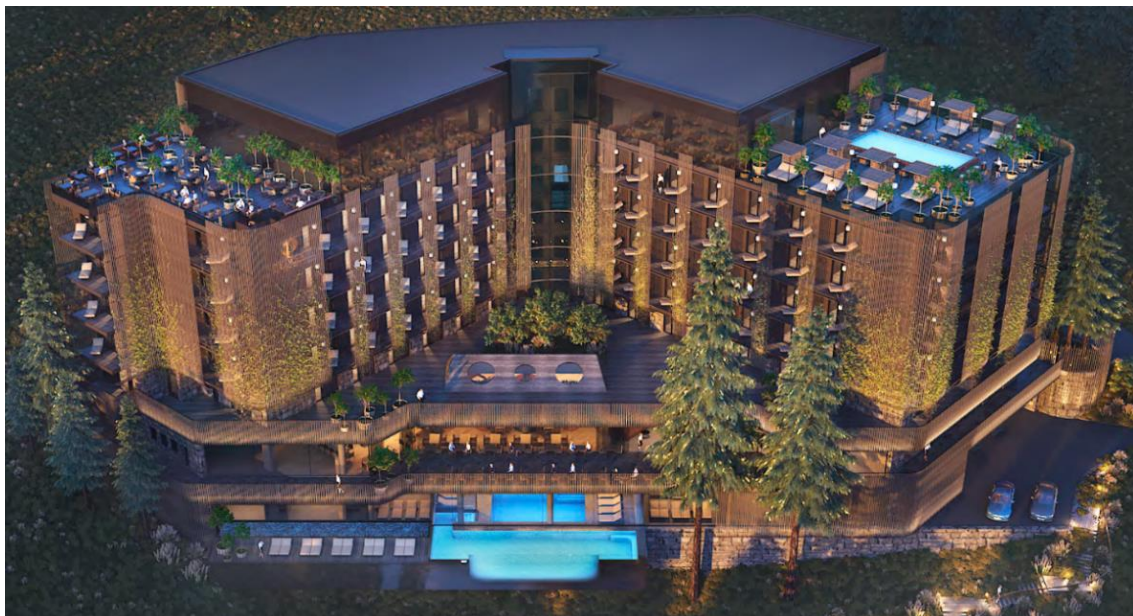
8. Аналітичний розрахунок прогинів скляних плит згідно з теорією пластин Тимошенка Войновського-Кригера (І методика) рекомендовано застосовувати для одношарових та двошарових плит. Для квадратної плити яка оперта по чотирьох кутах та навантажена зосередженим зусиллям F , максимальний прогин по середині плити рекомендовано знаходити за формулою (4.5). При цьому, коефіцієнти запасу по прогинах рекомендовано приймати: для одношарових плит – $K_{w,1} = 1,11$, та $K_{w,2} = 1,19$ для двошарових плит.

9. Для аналітичного розрахунку несучої здатності скляних плит згідно теорії пластин Тимошенка Войновського-Кригера, рекомендовано використовувати наступні коефіцієнти запасу несучої здатності: для одношарових плит - $K_{F,1} = 1,53$, для двошарових плит - $K_{F,2} = 1,34$ та для трьохшарових плит - $K_{F,3} = 1,07$.

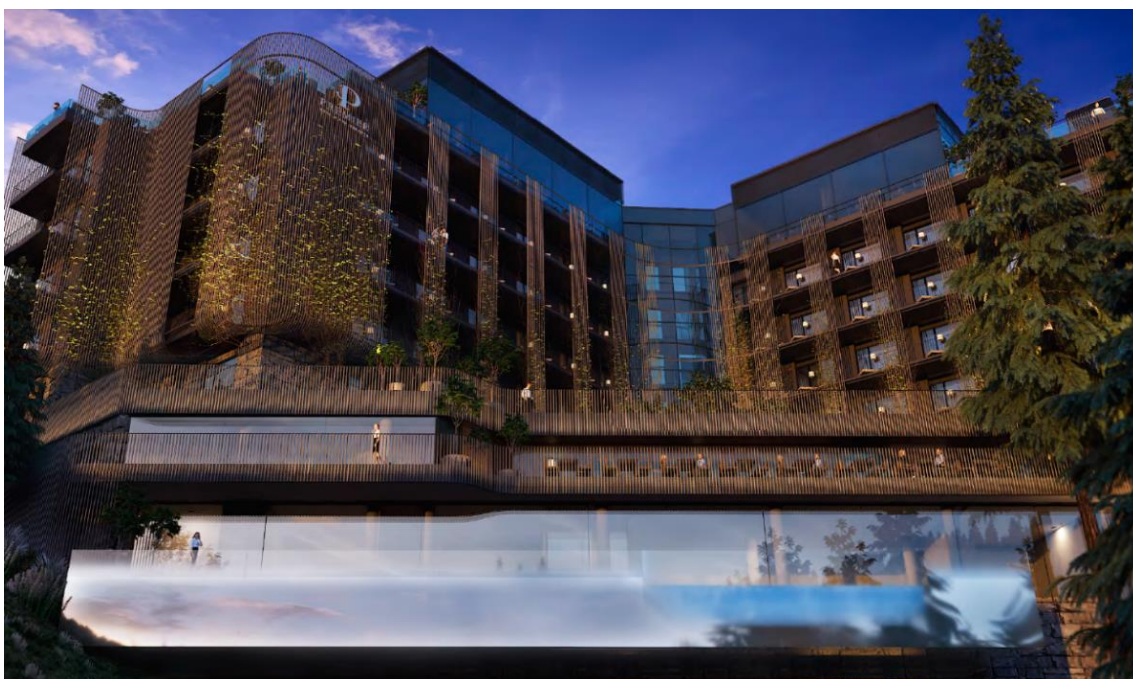
4.5. Впровадження результатів досліджень.

Представлені експериментальні результати дослідження скляних плит на згин, методики розрахунку їх несучої здатності, прогинів та довговічності, а також рекомендації щодо проектування які подано у дисертаційному дослідженні Гули В.О. були впровадженні під час проектування скляної багатошарової стінки консольного басейну в СПА-зоні житлового комплексу готельного типу в ур. Вишні, с. Поляниця Яремчанського району, Івано-Франківської області від ТЗОВ «ПЕЛЕ-ІНЖИНІГІНГ». Використання скляної клеєної триплексованої стінки дало можливість покращити загальний естетичний вигляд головного фасаду житлового комплексу готельного типу, а також інтер'єру у СПА-зоні. Дане рішення дозволило

реалізувати задум архітекторів з максимально прозорою скляною стіною басейну що відповідає сучасним тенденціям в сфері будівництва та архітектури будівель (рис.4.35, 4.36).



а)



б)

Рис.4.35. Загальний вигляд фасаду житлового комплексу готельного типу в ур. Вишні, с. Поляниця, Івано-Франківської області, де: а) вигляд басейну зверху; б) вигляд басейну знизу

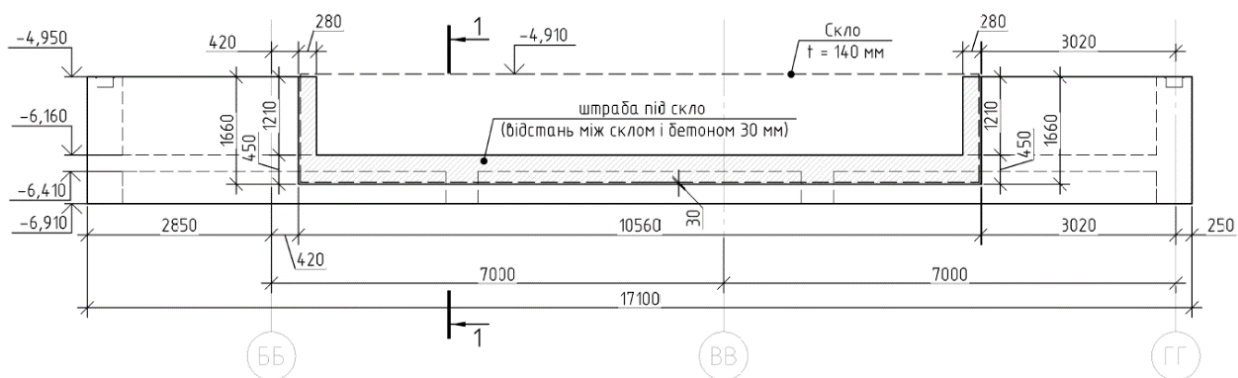


Рис.4.36. Проектне рішення щодо виконання скляної стінки басейну.

При проектуванні скляного покриття перголи на приватному об'єкті у м. Львові на вул. Ярославенка від ТЗОВ «Компанія ландшафтної архітектури Розквіт», було використано результати випробувань одношарових скляних плит та методу їх розрахунку. Таким чином, було запроєктовано та реалізовано на будівництві прозоре безригельне скляне покриття перголи з одношарових листів скла розміром 2300x1400 мм кожен лист, та загальним розміром покриття 5100x8000 мм (рис.4.37).



Рис.4.37 Пергола на приватному об'єкті у м. Львові на вул. Ярославенка

4.6. Висновки до розділу 4

1. Використано аналітичну методику розрахунку напружено-деформованого стану скляних плит з різною кількістю шарів звичайного флоат-скла на основі концепції ефективної товщини та теорії пружності пластин Тимошенка Войновського-Кригера. (I методика), яка дала задовільні результати в порівнянні з експериментами по несучій здатності плит та з наступними коефіцієнтами: для одношарових плит - $K_{F,1} = 1,53$, для двошарових плит - $K_{F,2} = 1,34$, для трьохшарових плит - $K_{F,3} = 1,07$, а також коефіцієнти для розрахунку прогинів: для одношарових плит - $K_{w,1} = 1,11$, для двошарових плит - $K_{w,2} = 1,19$, для трьохшарових плит - $K_{w,3} = 0,77$.

2. Розроблено та подано алгоритм розрахунку та моделювання напружено-деформованого стану за допомогою чисельно-аналітичного методу розрахунку допомогою методу кінцевих елементів у програмному комплексі Dlubal RFEM для скляних плит з різною кількістю шарів скла (II методика), який у свою чергу поділявся на два типи розрахунку: нелінійний розрахунок та лінійний розрахунок для аналізу розподілу напружень в перерізі скляних плит в додатковому модулі RF-GLASS на основі теорії міцності Губера-Мізеса. Згідно даної методики розрахунку було отримано коефіцієнти по запасу несучої здатності за нелінійним розрахунком: для одношарових плит - $K_{F,1} = 1,79$, для двошарових плит - $K_{F,2} = 1,57$, для трьохшарових плит - $K_{F,3} = 1,79$, а також коефіцієнти для розрахунку прогинів: для одношарових плит - $K_{w,1} = 1,37$, для двошарових плит - $K_{w,2} = 1,25$, для трьохшарових плит - $K_{w,3} = 1,17$.

3. Перевірено алгоритм аналітичного розрахунку довговічності скляних плит на основі тріщиностійкості та лінійно-пружної механіки руйнування, який дає можливість визначати час експлуатації скляних одношарових плит до руйнування з точністю 1,07 – 1,29.

4. На основі виконаного порівняльного аналізу результатів розрахунків з експериментальними даними, найбільш наближеною до експерименту методикою

розрахунку несучої здатності скляних плит є чисельно-аналітичний нелінійний розрахунок на основі методу кінцевих елементів у програмному комплексі Dlubal RFEM. Для розрахунку прогинів скляних плит найбільш наближений до експерименту є чисельно-аналітичний лінійний розрахунок у додатковому модулі RF-GLASS на основі теорії міцності Губера-Мізеса. А для розрахунку довговічності (часу до руйнування) – аналітичний розрахунок довговічності скляних плит на основі тріщиностійкості та лінійно-пружної механіки руйнування.

5. Впроваджено результати досліджень при проектуванні скляної багатошарової стінки консольного басейну в СПА-зоні житлового комплексу готельного типу в ур. Вишні, с. Поляниця Яремчанського району, Івано-Франківської області від ТзОВ «ПЕЛЕ-ІНЖИНІГІНГ» та скляного покриття перголи на приватному об'єкті у м. Львів на вул. Ярославенка від ТзОВ «Компанія ландшафтної архітектури Розквіт».

6. В результаті проведених теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень скляних плит з різною кількістю шарів скла, було розроблено рекомендації щодо проектування скляних плит які оперті по чотирьох кутах та працюють на згин, а також виконано впровадження отриманих результатів при проектуванні реальних будівельних об'єктів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі виконаного аналізу наявної наукової та нормативної літератури за тематикою дисертаційного дослідження, встановлено актуальність наукової проблеми, обґрунтовано основні напрямки досліджень несучої здатності, деформативності та довговічності скляних плит на згин, сформовано завдання дисертаційної роботи.

2. Виконано статистично-ймовірнісний аналіз експериментально встановлених значень міцності на згин скла за допомогою квантильної функції розподілу Вейбулла, з рівнем надійності 95% та межею ненадійності 5%. Для подальших розрахунків рекомендовано приймати характеристичне значення міцності скла на розтяг при згині $f_{gk,5\%} = 40,4$ МПа.

3. Отримано результати досліджень скляних плит на згин з різною кількістю шарів скла які були шарнірно оперті по чотирьох кутах та працювали у двох взаємно перпендикулярних напрямках на згин від короткочасного зосередженого навантаження. Було проведено аналіз характеру руйнування, несучої здатності та деформативності скляних плит, а також порівняння цих параметрів в залежності від кількості шарів скла. Проведено аналітичний розрахунок скляних плит на основі концепції ефективної товщини та теорії пружності пластин Тимошенка Войновського-Кригера. (I методика) та моделювання напружено-деформованого стану за допомогою чисельно-аналітичних нелінійної та лінійної методик розрахунку за допомогою МКЕ у програмному комплексі Dlubal RFEM (II методика). Подано алгоритм аналітичного розрахунку довговічності скляних плит на основі тріщиностійкості та лінійно-пружної механіки руйнування який дає можливість визначати час експлуатації скляних одношарових плит до руйнування з точністю 1,07 – 1,29.

4. Виконано порівняльний аналіз результатів розрахунків отриманих згідно представлених методик з отриманими експериментальними значеннями критичного навантаження та максимальних прогинів, в результаті чого було отримано високу збіжність результатів. Найбільш наближеною до експерименту

методикою розрахунку несучої здатності скляних плит є чисельно-аналітичний нелінійний розрахунок на основі методу кінцевих елементів у програмному комплексі Dlubal RFEM. Згідно даної методики розрахунку було отримано коефіцієнти по запасу несучій здатності за нелінійним розрахунком: для одношарових плит – $K_{F,1} = 1,79$, для двошарових плит – $K_{F,2} = 1,57$, для трьохшарових плит – $K_{F,3} = 1,28$. Для розрахунку прогинів скляних плит найбільш наближений до експерименту є чисельно-аналітичний лінійний розрахунок у додатковому модулі RF-GLASS, з наступними коефіцієнтами запасу по прогинах: для одношарових плит – $K_{w,1} = 1,37$, для двошарових плит – $K_{w,2} = 1,25$, для трьохшарових плит – $K_{w,3} = 1,17$.

5. Удосконалено та апробовано методику вимірювання деформацій зовнішніх поверхонь скляних плит за допомогою оптичного методу кореляції цифрових зображень (КЦЗ) при випробуванні їх несучої здатності та деформативності при згині. Отримано результати вимірювань відносних деформацій методом 2D КЦЗ. Проведено порівняльний аналіз результатів отриманих за допомогою механічних мікроіндикаторів та за допомогою методу КЦЗ який показав високу збіжність отриманих результатів з механічними мікроіндикаторами - усереднений перевідний коефіцієнт становить $k_c = 1,008$. Розроблено і подано рекомендації щодо застосування методики 2D КЦЗ на поверхні скляних плит із використанням цифрового без дзеркального фотоапарату SONY a6000 (Додаток Г).

6. Розроблено та представлено методику випробування скляних балочних плит на довговічність, а також методику визначення основних критеріїв тріщиностійкості за допомогою монокулярного цифрового USB мікроскопа. Запропоновано для подальших розрахунків скляних плит застосовувати критичний коефіцієнт інтенсивності напружень $K_{IC,5\%} = 0,47 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. За результатами досліджень скляних балочних плит на довговічність, отримано залежності часу випробувань (довговічності) від величини зовнішнього навантаження та прогинів від часу, а також на основі лінійно-пружної механіки руйнування отримано

розрахункові значення часу до руйнування скляних балочних плит при різних величинах навантажень як частки від руйнівного навантаження. Встановлено що залежність навантаження – час має досить високий параметр збіжності $R^2 = 0,994$, що свідчить про можливість використання такого підходу до розрахунку довговічності скляних одношарових плит.

7. За результатами проведених досліджень отримано патент України №151488 «Установка для випробування скляних плит на довговічність» та патент України №150703. «Комбінована скляна плита», рекомендації з проектування скляних плит використані при проектуванні реальних будівель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Демчина Б., Сурмай М., Ткач Р., Гула В. Визначення фізико-механічних властивостей скла на згин за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла // Будівельні конструкції. Теорія і практика. Київський національний університет будівництва і архітектури, 2020. № 6. Р. 94–113.
2. Demchyna V. Surmai M., Tkach R., Hula V., Kozak R. An analysis of using the method of two-dimensional digital image correlation in glass column research // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technology Center, 2020. Vol. 4, № 12–106. Р. 52–59.
3. Hula V., Demchyna V. Methodology and results of the series p-2 glass slabs durability test // Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. 2022. № 86. Р. 15–23.
4. Демчина Б.Г., Гула В.О., Осадчук Т., Немец Я. Тріщиностійкість скла на основі концепцій механіки руйнування // Прикладна механіка. 2022. Vol. 58, № 3. Р. 102–115.
5. Demchina B., Gula, V.; Osadchuk, T.; Nemets, Y Cracking Resistance of Glass in Terms of the Principles of Fracture Mechanics // International Applied Mechanics 2022 58:3. Springer, 2022. Vol. 58, № 3. Р. 336–347.
6. Surmai M. Tkach R., Hula V., Kozak R. Glass as a material of bearing columns // 9-th International Youth Science Forum «Litteris Et Artibus». Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2019. Р. 96–98.
7. Ткач Р.О. Анотація дисертаційної роботи «Несуча здатність та деформативність скляних багатошарових колон» [Electronic resource]. URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2021/radaphd/12196/anotaciya-disertacii.pdf>.
8. Демчина Б.Г., Гула В.О., Немец Я. Дослідження міцності скла на згин з використанням статистичного розподілу Вейбулла // VII Міжнародна науково-технічна конференція “Нові технології в будівництві.” Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2020. Р. 78–79.

9. Demchyna B., Niemiec J., Hula V. Metoda badania próbek szkła na wytrzymałość na zginanie // Інтелектуальні конструкції та інноваційні будівельні матеріали. Випуск 2. Херсон, 2021. Р. 5–8.
10. Демчина Б.Г., Гула В.О., Козак Р.П. Методика проведення фрактографічного аналізу поверхні зруйнованих скляних зразків // XXII Міжнародна науково-практична конференція “Interaction of society and science: prospects and problems.” London, 2021. Р. 33–34.
11. Демчина Б.Г., Гула В.О. Методика дослідження скляних плит на довговічність // Science, innovations and education: problems and prospects. VII international scientific and practical conference. Tokyo, 2022. Р. 301–307.
12. Demchyna B., Hula V., Vozniuk L. The experimental research of flexural strength and deformation of one-layer glass slabs that work on bending. Applied mechanics 11/2022. International Scientific Session. 2022.
13. Демчина Б.Г., Гула В.О., Осадчук Т.Ю. Патент на корисну модель №150703 Комбінована скляна плита: pat. 150703 USA. Україна: Український інститут інтелектуальної власності, 2022.
14. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Гула В.О. Патент на корисну модель №151488 Установа для випробування скляних плит на довговічність: pat. 151488 USA. Україна: Український інститут інтелектуальної власності, 2022.
15. Glass - Chemistry Encyclopedia - structure, reaction, water, uses, elements, metal, property [Electronic resource]. URL: <http://www.chemistryexplained.com/Ge-Hy/Glass.html> (accessed: 16.09.2022).
16. All About Glass | Corning Museum of Glass [Electronic resource]. URL: <https://www.cmog.org/article/glass-nature> (accessed: 16.09.2022).
17. Paskal R. Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture. [Electronic resource]. URL: <http://surl.li/hbpoe>
18. Window and Glazing Topics-Glass timeline. [Electronic resource]. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://tangram.co.uk/wp-content/uploads/Window-and-Glazing-Topics-Glass-timeline.pdf>
19. Springer Handbook of Glass. [Electronic resource]. URL: <http://surl.li/hbpol>.

20. ДСТУ Б В.2.7-122:2009 Будівельні матеріали. Скло листове. Технічні умови (EN 572:2004, NEQ). 2009.
21. British Standards Institution. EN 12758:2019. Glass in building. Glazing and airborne sound insulation. Product descriptions, determination of properties and extension rules. 2019. 20 p.
22. ДСТУ Б В.2.7 - 123 - 2004 Скло багатошарове будівельного призначення. Київ: Державний комітет України з будівництва та архітектури, 2004.
23. Feldmann M., Kasper R., Abeln B., et al. Guidance for European Structural Design of Glass Components. 2014.
24. Vedrtnam A., Pawar S.J. Laminated plate theories and fracture of laminated glass plate // Eng Fract Mech. Elsevier Ltd, 2017. Vol. 186. P. 316–330.
25. Ткач Р.О. et al. Дослідження зчеплення скляних пластин між собою за дії статичного навантаження // Theory and Building Practice. Lviv Polytechnic National University, Львівська політехніка, національний університет, 2019. Vol. 1, № 2. P. 21–29.
26. ДСТУ EN 1863-2:2008 Скло в будівництві. Скло загартоване вапняно-натрієве силікатне. Частина 2. Оцінювання відповідності продукції. 2008.
27. ДСТУ EN 356 2005. Захисне скління.Випробування та класифікація за тривкістю щодо ручного зламування. 2005.
28. ДСТУ EN 12600 2017 Скло в будівництві. Випробування маятником. Метод випробування на удар і класифікація для плаского скла (EN 12600 2002, IDT). 2017.
29. British Standards Institution., Technical Committee B/520 G. and G. in Building.S.B., European Committee for Standardization. EN 1063: Glass in building - security glazing - testing and classification of resistance against explosion pressure. BSI, 2000. 9 p.
30. prEN 16613 - Glass in building - Laminated glass and laminated safety glass - Determination of the load resistance of glass panes by calculation.
31. The status of Flat Soda Lime Silicate Glass and its raw materials under REACH. 2006. Vol. 1907.

32. Лосик М.В., Звір О.М. Технологічні та фізико-хімічні властивості скла. 2018.
33. EN 572-1:2004 Glass in building - Basic soda lime silicate glass products - Part 1:Definitions and general physical and mechanical properties.
34. EN 572-2:2012 Glass in building - Basic soda lime silicate glass products - Part 2: Float glass.
35. ДСТУ EN 12150-2 2008 Скло в будівництві. Загартоване вапняно-натрієве силікатне захисне скло. Частина 2. Оцінювання відповідності продукції (EN 12150-2 2004, IDT).
36. Демчина Б.Г., Черевко М.В. Дослідження міцності та деформативності скляних балок з вертикальним розміщенням шарів // Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва. 2015. № 823. Р. 113–116.
37. Демчина Б., Осадчук Т. 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. 2018. № 19. Р. 57–60.
38. Демчина Б.Г., Осадчук Т.Ю., Демчина Х.Б. Міцність та деформативність багат шарових скляних плит з різних типів скла, які працюють на згин // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2017. № 69. Р. 30–37.
39. Осадчук Т.Ю., Демчина Б.Г. Дослідження міцності багат шарових скляних плит, які працюють на згин від зосередженого навантаження штампом // Будівельне виробництво. Науково-дослідний інститут будівельного виробництва, 2016. № 60. Р. 58–63.
40. Демчина Б.Г., Осадчук Т.Ю. Визначення міцності та довговічності скла на основі лінійно-пружної механіки руйнування // Опір матеріалів і теорія споруд. Київський національний університет будівництва і архітектури, 2018. № 100. Р. 40–58.
41. Осадчук Т.Ю., Демчина Б.Г. Дослідження деформацій багат шарових скляних плит за допомогою кореляції цифрових зображень // Комунальне

- господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура. Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, 2017. № 134. Р. 153–163.
42. Surmai M., Tkach R., Hula V., Kozak R. The Experimental Research of Glass Multilayer Columns with a Central Compression // 8th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus.” Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2018. Р. 55–60.
 43. Демчина Б.Г., Сурмай М., Ткач Р., Шидловський Я. Експериментальне дослідження багатошарових скляних колон квадратного перерізу // Наука та будівництво. Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій, державне підприємство, 2018. № 4. Р. 74–80.
 44. Demchyna V., Surmai M., Tkach R. Експериментальне дослідження скляних багатошарових колон на центральний стиск // Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва. 2018. № 888. Р. 52–58.
 45. Demchyna V., Surmai M., Tkach R. The experimental study of glass multilayer columns using digital image correlation // Archives of Materials Science and Engineering. International OCSCO World Press, 2019. Vol. 96, № 1. Р. 32–41.
 46. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О. Патент на корисну модель №134878 Спосіб випробування скляної колони: pat. 134878 USA. Україна: Український інститут інтелектуальної власності, 2018.
 47. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О., Осадчук Т. Патент на корисну модель №140007 Зразок для випробування зчеплення пластин між собою: pat. 140007 USA. Україна: Український інститут інтелектуальної власності, 2019.
 48. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О. Патент на корисну модель №128990 Скляна колона: pat. 128990 USA. Україна: Український інститут інтелектуальної власності, 2018.
 49. Демчина Б.Г., Козак Р., Майхер П., Немец Я. Визначення фізико-механічних характеристик скла на згин: порівняння значень міцності за різних умов

- орієнтації дослідного зразка // Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2022. № 10. P. 11–23.
50. Demchyna B., Osadchuk T. Flexural strength of glass using weibull statistic analysis // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. International OCSCO World Press, 2018. Vol. 87, № 2. P. 49–61.
51. Surmai M., Tkach R. Analysis of strength and deformativity of glass plate joints under static loading // Technology audit and production reserves. Private Company Technology Center, 2020. Vol. 2, № 1(52). P. 38–41.
52. Осадчук Т.Ю. Міцність та деформативність скляних багатошарових плит. 2020.
53. Ткач Р.О. Несуча здатність та деформативність скляних багатошарових колон. 2021.
54. Blikharskyu Y., Pavliv A. Formation of a complete stress-strain curve of concrete using digital image corellation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technology Center, 2021. Vol. 3. P. 37–44.
55. Blikharskyu Ya.Z., Kopiika N.S. Digital image correlation method for analysis of reinforced concrete structures // Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. 2020. № 78. P. 27–33.
56. Бліхарський Я.З. Залишковий ресурс залізобетонних конструкцій з пошкодженнями термічно-зміцненої арматури. Львів: Національний університет “Львівська політехніка,” 2021.
57. Sobczak-Piastka J. Deformability of glued laminated beams with combined reinforcement // Buildings. MDPI AG, 2020. Vol. 10, № 5.
58. Sobczak-Piastka J. Method of Experimental Research of New Construction of Beams from Glued Wood with Combined Reinforcement // IOP Conf Ser Mater Sci Eng. IOP Publishing, 2021. Vol. 1203, № 3. P. 032037.
59. Gomon P., Polishchuk M. Deflections of reinforced and non-reinforced beams of rectangular section of glued wood // Modern structures of metal and wood. Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2022. № 26. P. 88–96.

60. Dvorkin L. Mechanical Properties and Design of Concrete with Hybrid Steel and Basalt Fiber // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. Vol. 264.
61. Клімов Ю.А., Солдатченко О.С., Орешкін Д.О. Експериментальні дослідження зчеплення композитної неметалевої арматури з бетоном // Вісник Національного університету "Львівська Політехніка". 2010. Vol. 662, № 214. P. 207.
62. Клімов Ю.А., Вітковський Ю.А., Солдатченко О.С. Використання неметалевої композитної арматури для армування бетонних конструкцій. Знання, 2011.
63. Демчина Б., Осадчук Ю. Визначення міцності та довговічності скла на основі лінійно-пружної механіки руйнування // Опір матеріалів і теорія споруд/Strength of Materials and Theory of Structures. 2018. № 100. [Electronic resource]. URL: http://opir.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-100/04-100_demchina_osadchuk.pdf
64. Overend M., de Gaetano S., Haldimann M. Diagnostic Interpretation of Glass Failure // Structural Engineering International . 2007. Vol. 2.
65. Toshihiko O., Allaire R.A. Fracture Analysis, a Basic Tool to Solve Breakage Issues Technical Information Paper. 2004.
66. Paris P., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws // Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME. 1963. Vol. 85, № 4. P. 528–533.
67. Quinn G.D. NIST Recommended Practice Guide Fractography of Ceramics and Glasses. Gaithersburg, MD, 2016.
68. Quinn G.D. Guidelines for measuring fracture mirrors // Ceramic Transactions. 2007. Vol. 199. P. 163–187.
69. Griffith, A.A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 221, 163-198. - References - Scientific Research Publishing [Electronic resource]. URL: <http://surl.li/hbpqk> (accessed: 24.10.2022).

70. Wiederhorn S.M. et al. Griffith Cracks at the Nanoscale // *Int J Appl Glass Sci.* 2013. Vol. 4, № 2. P. 76–86.
71. Guin J.P., Wiederhorn S.M. Surfaces formed by subcritical crack growth in silicate glasses // *Int J Fract.* 2006. Vol. 140, № 1–4. P. 15–26.
72. Célarié F., Ciccotti M., Marlière C. Stress-enhanced ion diffusion at the vicinity of a crack tip as evidenced by atomic force microscopy in silicate glasses // *J Non Cryst Solids.* 2007. Vol. 353, № 1. P. 51–68.
73. ASTM C1256-93. Standard Practice for Interpreting Glass Fracture Surface Features. – West Con-shohocken, PA: ASTM International. 2013.
74. Wiederhorn S.M., Bolz L.H. Stress Corrosion and Static Fatigue of Glass // *Journal of the American Ceramic Society.* 1970. Vol. 53, № 10. P. 543–548.
75. Wiederhorn S.M. Strength of glass-A fracture mechanics approach. 1974.
76. Landes J.D. Stress Analysis and Fracture Mechanics. Practices in Failure Analysis.
77. Clark A.B.J., Irwin G.R. Crack-propagation behaviors // *Experimental Mechanics* 1966 6:6. Springer, 1966. Vol. 6, № 6. P. 321–330.
78. ASTM C1322-15R19 - Standard Practice for Fractography and Characterization of Fracture Origins in Advanced Ceramics - European Standards. 2019.
79. Nemeth N.N. et al. Cares/life ceramics analysis and reliability evaluation of structures life prediction program. 2003.
80. Shand E.B. Experimental Study of Fracture of Glass:I, The Fracture Process // *Journal of the American Ceramic Society.* John Wiley & Sons, Ltd, 1954. Vol. 37, № 2. P. 52–59.
81. Evans A.G. High Temperature Slow Crack Growth in Ceramic. 1974.
82. Fatemi A. Fundamentals of LEFM & applications to fatigue crack growth.
83. Forman R.G. et al. Fatigue Crack Growth Database for Damage Tolerance Analysis [Electronic resource]. URL: <http://surl.li/hbprq> (accessed: 14.12.2022).
84. Schijve J. Fatigue of structures and materials // *Fatigue of Structures and Materials.* Springer Netherlands, 2009. P. 1–622.
85. Michalske T.A. Fractography of Stress Corrosion Cracking in Glass // *Fractography of Glass.* Springer, Boston, MA, 1994. P. 111–142.

86. Overend M., Zammit K. A computer algorithm for determining the tensile strength of float glass.
87. Viens M.J. Fracture toughness and crack growth of Zerodur. 1990.
88. Scholze H. Glass: Nature, Structure, and Properties [Electronic resource]. URL: <http://surl.li/hbprm> (accessed: 15.12.2022).
89. Eckersley O’Callaghan - Engineers - Apple Store [Electronic resource]. URL: <https://www.eocengineers.com/en/projects/apple-west-14th-street-71> (accessed: 22.09.2022).
90. Hungarian Academy of Arts Structural Glass Atrium (Hungary) | GLASSCON GmbH – Architectural Building Skins, Façade Solutions, Curtain Walls, Glazing, Solar Shading, Brise Soleil [Electronic resource]. URL: <https://www.glasscon.com/projects/hungarian-academy-arts-structural-glass-atrium-hungary> (accessed: 22.09.2022).
91. Best Project, Specialty Construction: Grand Hall PVM | 2020-09-17 | Engineering News-Record [Electronic resource]. URL: <https://www.enr.com/articles/50099-best-project-specialty-construction-grand-hall-pvm> (accessed: 22.09.2022).
92. Oikonomopoulou F. et al. The construction of the Crystal Houses façade: challenges and innovations // Glass Structures and Engineering. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2018. Vol. 3, № 1. P. 87–108.
93. Hána T., Eliášová M., Sokol Z. Structural Performance of Double Laminated Glass Panels with EVA and PVB Interlayer in Four-Point Bending Tests // International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research. Science Publications, 2018. Vol. 2, № 1. P. 164–177.
94. prEN 16612 - Glass in building - Determination of the load resistance of glass panes by calculation [Electronic resource]. URL: <http://surl.li/hbpqn> (accessed: 23.09.2022).
95. Galuppi L., Royer-Carfagni G. The effective thickness of laminated glass plates // J Mech Mater Struct. 2012. Vol. 7, № 4. P. 375–400.
96. Führer T., Heuer N., Niemi A.H. A DPG method for Reissner-Mindlin plates. 2022.

97. Fröling M. Strength design methods for glass structures. Division of Structural Mechanics, Department of Construction Sciences, Lund University, 2013.
98. [Electronic resource]. URL: <http://surl.li/hbppr>.
99. Molnár G. et al. Finite element analysis of laminated structural glass plates with polyvinyl butyral (PVB) interlayer // Periodica Polytechnica Civil Engineering. Budapest University of Technology and Economics, 2012. Vol. 56, № 1. P. 35–42.
100. Sable L. et al. Correlation between Numerical and Experimental Tests of Laminated Glass Panels with Visco-elastic Interlayer // Procedia Eng. Elsevier Ltd, 2017. Vol. 172. P. 945–952.
101. ASTM C158-02 Standard Test Methods for Strength of Glass by Flexure (Determination of Modulus of Rupture).
102. EN 1288-1:2000 Glass in building - Determination of the bending strength of glass - Part 1: Fundamentals of testing glass.
103. ASTM C158-02(2017) - Standard Test Methods for Strength of Glass by Flexure (Determination of Modulus of Rupture) [Electronic resource]. URL: <http://surl.li/hbpqq> (accessed: 26.09.2022).
104. [Electronic resource]. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ndibv.kiev.ua/wp-content/uploads/2016/06/Osadchuk.pdf>.
105. ASTM C1161 Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature.
106. EN 1288-2:2000 Glass in building — Determination of the bending strength of glass — Part 2: Coaxial double-ring test on flat specimens with large test surface areas.
107. Hijazi A., Friedl A., Kähler C.J. Influence of camera's optical axis non-perpendicularity on measurement accuracy of two-dimensional digital image correlation // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 2011. Vol. 5, № 4. P. 373–382.
108. Lehoucq R.B., Reu P.L., Turner D.Z. A Novel Class of Strain Measures for Digital Image Correlation // Strain. 2015. Vol. 51, № 4. P. 265–275.

109. Pisonero J. et al. A Comparative Study of 2D and 3D Digital Image Correlation Approaches for the Characterization and Numerical Analysis of Composite Materials // IEEE Access. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. Vol. 9. P. 160675–160687.
110. Hijazi A., Rawashdeh N., Kähler C.J. Effect of Camera's Focal Plane Array Fill Factor on Digital Image Correlation Measurement Accuracy // The 5th International Conference on Advances in Mechanical Engineering At. Istanbul, 2019.
111. Wang W.C. et al. Displacement measurement of interior wall of hollow cylinder by digital image correlation method using fisheye lens // Procedia Eng. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 79. P. 437–446.
112. Thai T.Q. et al. Importance of Exposure Time on DIC Measurement Uncertainty at Extreme Temperatures // Exp Tech. Springer International Publishing, 2019. Vol. 43, № 3. P. 261–271.
113. Gdoutos E.E. Digital Image Correlation (DIC) // Solid Mechanics and its Applications. Springer Science and Business Media B.V., 2022. Vol. 269. P. 251–259.
114. Kujawińska M., Malesa M., Malowany K. Measuring structural displacements with digital image correlation // SPIE Newsroom. SPIE-Intl Soc Optical Eng, 2013.
115. Speranzini E., Agnetti S. The technique of digital image correlation to identify defects in glass structures // Struct Control Health Monit. John Wiley and Sons Ltd, 2014. Vol. 21, № 6. P. 1015–1029.
116. DIC Algorithms [Electronic resource]. URL: <http://www.ncorr.com/index.php/dic-algorithms> (accessed: 12.09.2022).
117. Datsiou K.C., Overend M. Weibull parameter estimation and goodness-of-fit for glass strength data // Structural Safety. Elsevier B.V., 2018. Vol. 73. P. 29–41.
118. Agnetti S. Strength on cut edge and ground edge glass beams with the failure analysis method // Frattura ed Integrita Strutturale. Gruppo Italiano Frattura, 2013. Vol. 26. P. 31–40.
119. EN 12603:2002 Glass in building - Procedures for goodness of fit and confidence intervals for Weibull distributed glass strength data.

120. EN 61649:2008 Weibull analysis.
121. Digital Image Correlation (DIC) Technique in Measuring Strain Using Opensource Platform Ncorr [Electronic resource]. URL: <http://surl.li/hbprc> (accessed: 01.11.2022).
122. Pan B. et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review // Meas Sci Technol. IOP Publishing, 2009. Vol. 20, № 6. P. 062001.
123. Newman J.C., Raju I.S. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack // Engineering Fracture Mechanics. 1981. Vol. 15, № 2. 185–192 p.
124. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of plates and shells. McGraw-Hill, 1959. 580 p.
125. prEN 13474-1 - Glass in building - Design of glass panes - Part 1: General basis of design; German version prEN 13474-1-1999 [Electronic resource]. URL: <https://standards.globalspec.com/std/1327258/din-en-13474-1> (accessed: 06.02.2023).
126. TRLV:2006-08. Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen.

ДОДАТОК А. Акти про впровадження результатів дисертаційних досліджень

«PELE-ENGINEERING»
Limited Liability Company
EDRPOU: 43273856
Ukraine, 79034
Lviv, 2 Buika str.
Email: inbox@pelex.com.ua



Товариство з обмеженою
відповідальністю
«ПЕЛЕ-ІНЖИНІРИНГ»
СДРПОУ: 43273856
Україна, 79034
м. Львів, вул. Буйка 2
Email: inbox@pelex.com.ua

№ 05/10/2022
від 5 жовтня 2022

ДОВІДКА

Про впровадження результатів

При розробці проектної документації житлового комплексу готельного типу в ур. Вишні, с. Поляниця Яремчанського району, Івано-Франківської області, в проєкті було передбачено застосування скляної багатошарової плити для влаштування стінки басейну у СПА-зоні.

Рішення про застосування скляної клеєної триплексованої стінки було прийнято за результатами дисертаційного наукового дослідження Гули Василюк Олегівни на тему «Міцність та довговічність скляних плит на основі лінійно-пружної механіки руйнування». Було використано рекомендації з проектування скляних плит.

Використання скляної багатошарової стінки давало можливість покращити загальний естетичний вигляд фасаду житлового комплексу готельного типу, а також інтер'єру СПА-зони. Дане рішення дозволило реалізувати задум архітекторів з максимально прозорою скляною стіною басейну що відповідає сучасним тенденціям в будівництві та архітектурі будівель.

Директор
ТзОВ «ПЕЛЕ-ІНЖИНІРИНГ»



Мудрий І.Б.



ТЗОВ «Компанія ландшафтної
архітектури Розквіт»
вул. Окружна 57А каб.301
м. Львів, Україна, 79029
+38 (097) 747 4374
info@rozkvit.com
www.rozkvit.com

09/12/2022
від 9 грудня 2022

ДОВІДКА

Про впровадження результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційної роботи Гули Васи́лини Оле́гівни на тему «Міцність та довговічність скляних плит на основі лінійно-пружної механіки руйнування» було використано під час проектування скляного покриття перголи на приватному об'єкті, за адресою: вул.Ярославенка, м.Львів.

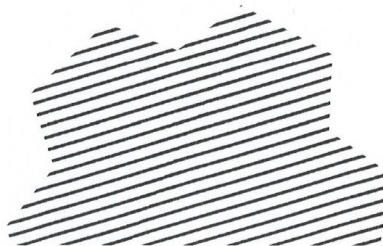
Під час проектування перголи було прийнято рішення запроєктувати прозоре безригельне скляне покриття з одношарових листів скла з розміром листів 2300x1400мм, та загальним розміром покриття 5100x8000мм. Для проектування скляного покриття було використано результати випробування одношарових скляних плит та рекомендації з проектування, які представлено у дисертаційному дослідженні Гули В.О.

В результаті використання даних рішень було запроєктовано скляне покриття перголи, яке дозволило реалізувати концепцію прозорої покрівлі та максимально використовувати сонячне світло. Скляний дах доповнив ансамбль з металевого каркасу конструкції перголи, створивши відчуття легкості та невагомості, не дивлячись на складність конструктивних рішень.

Директор



Верхоляк Д.В.



ДОДАТОК Б. Протоколи дослідження деформацій скляних плит з використанням методу кореляції цифрових зображень

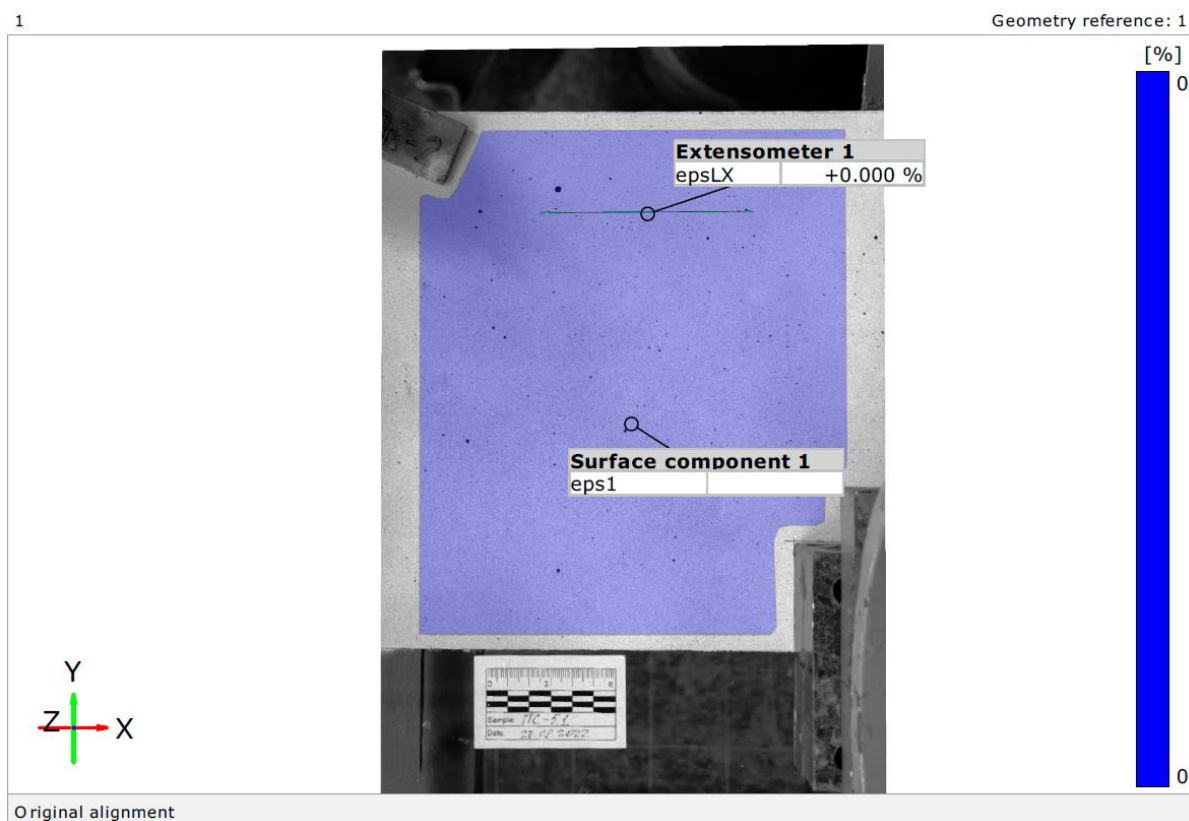


Рис.Б.1 Протоколи випробувань скляної плити марки ПК-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 1



Рис.Б.2 Протоколи випробувань скляної плити марки ПК-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 2

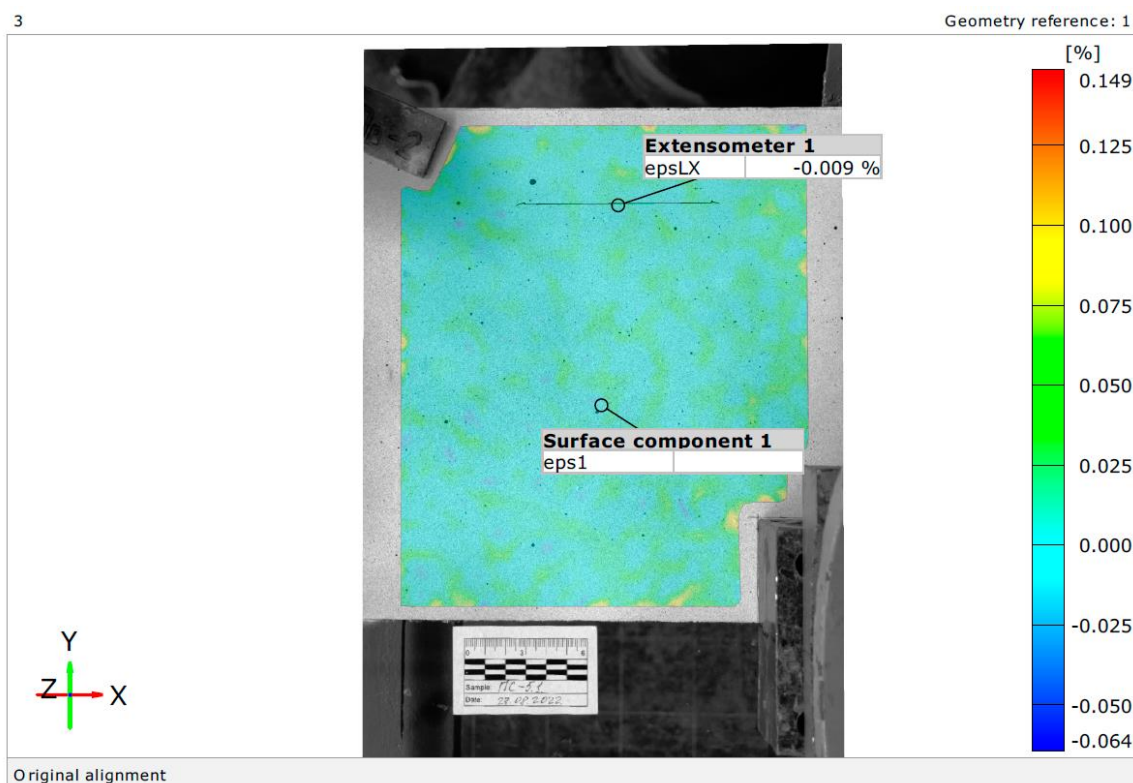


Рис.Б.3 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 3

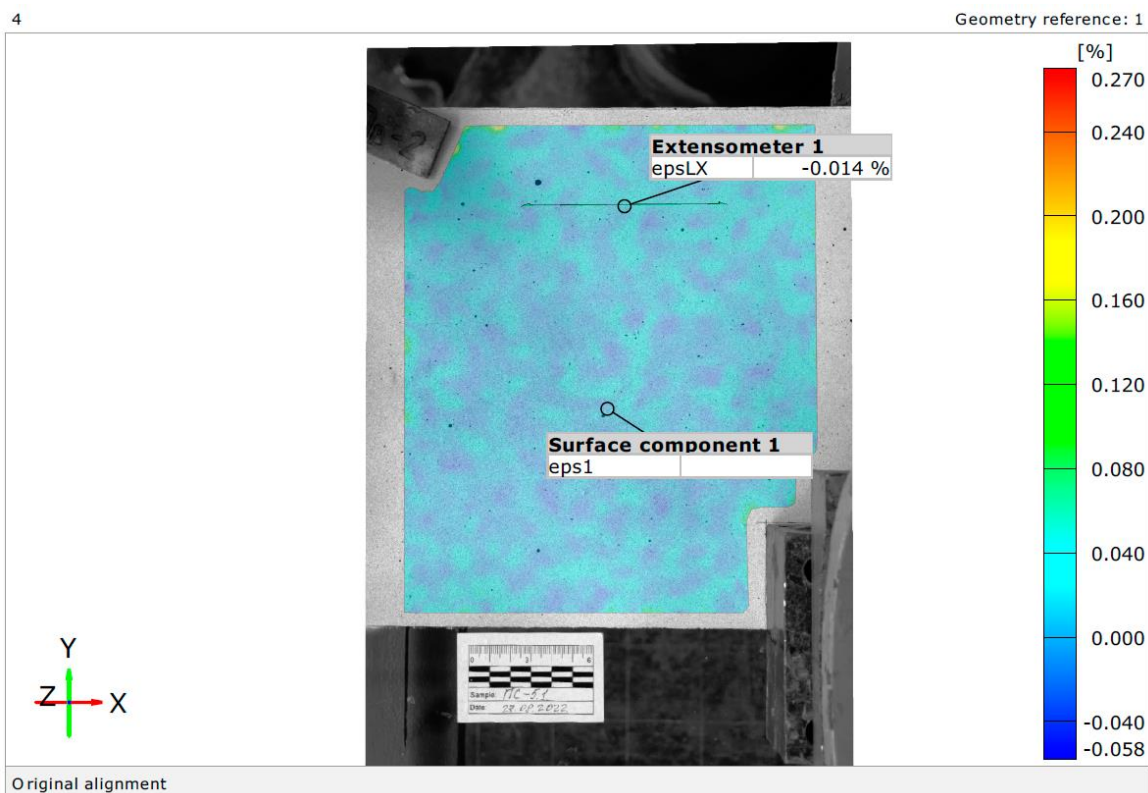


Рис.Б.4 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 4

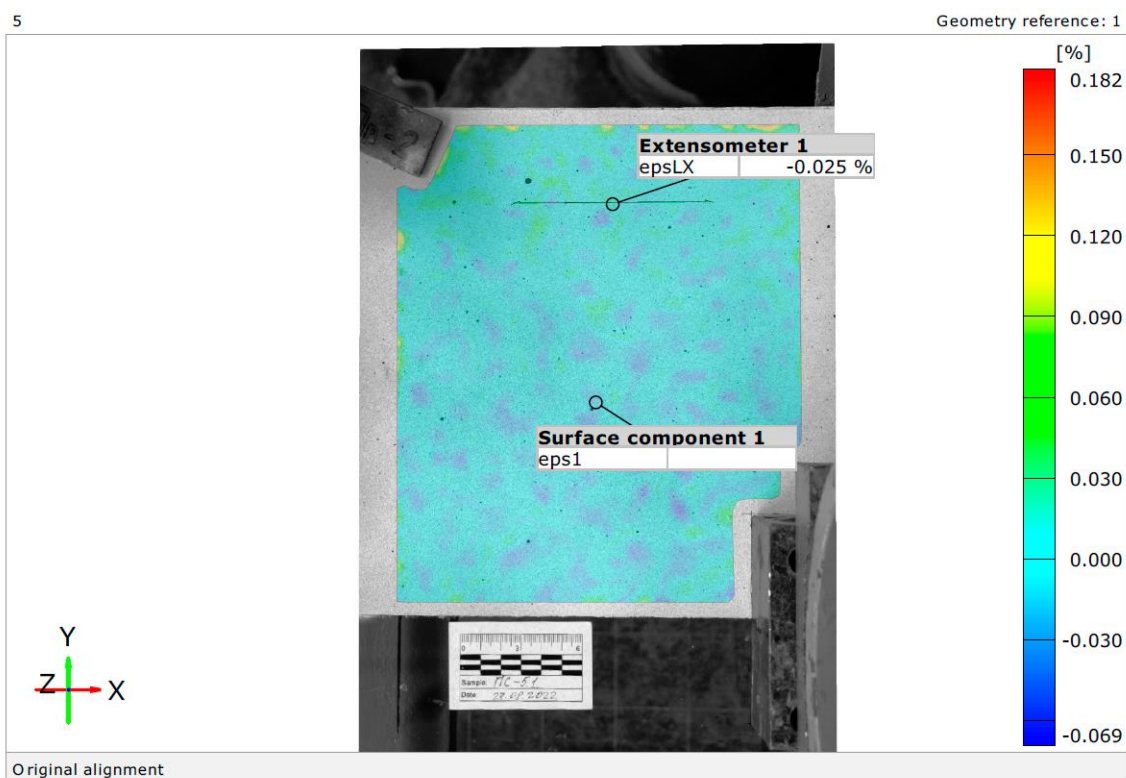


Рис.Б.5 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 5

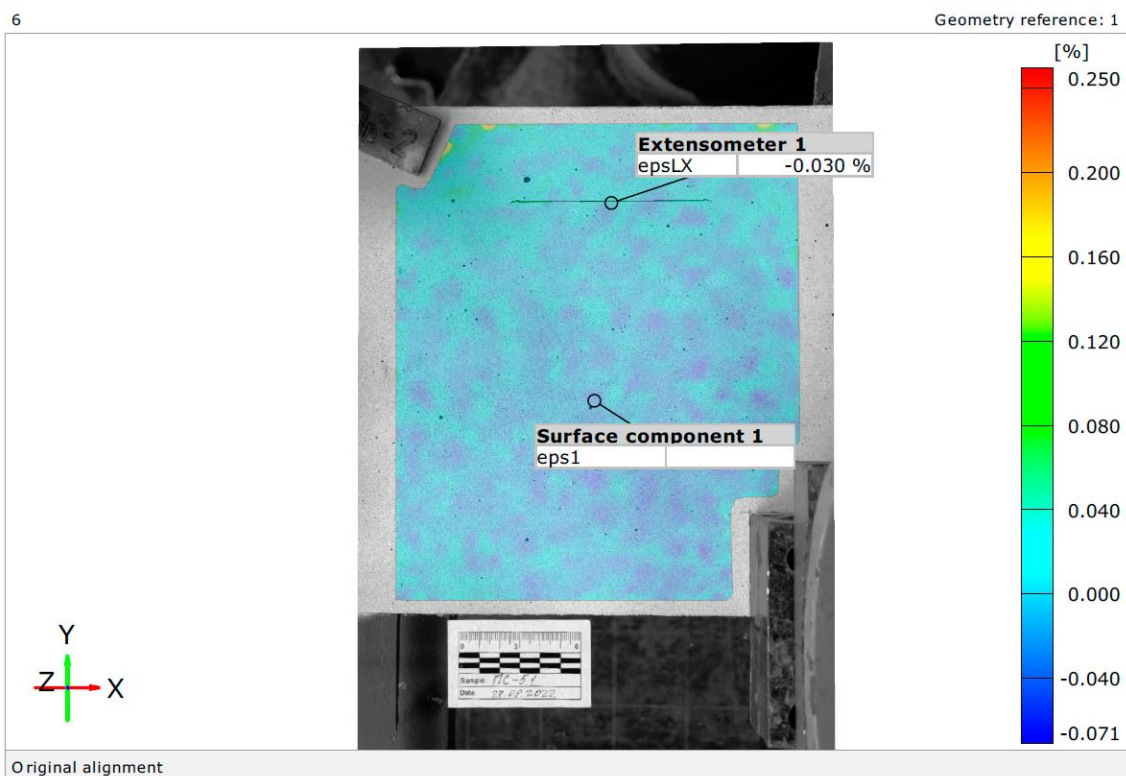


Рис.Б.6 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 6

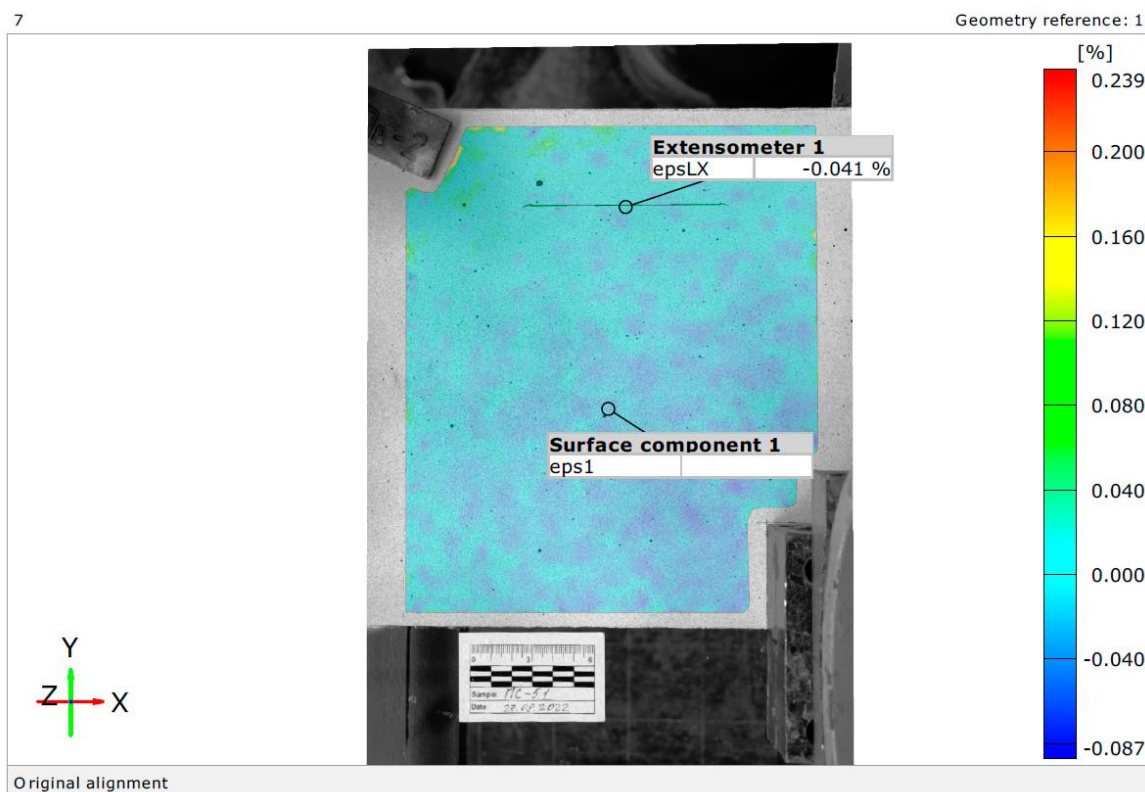


Рис.Б.7 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 7

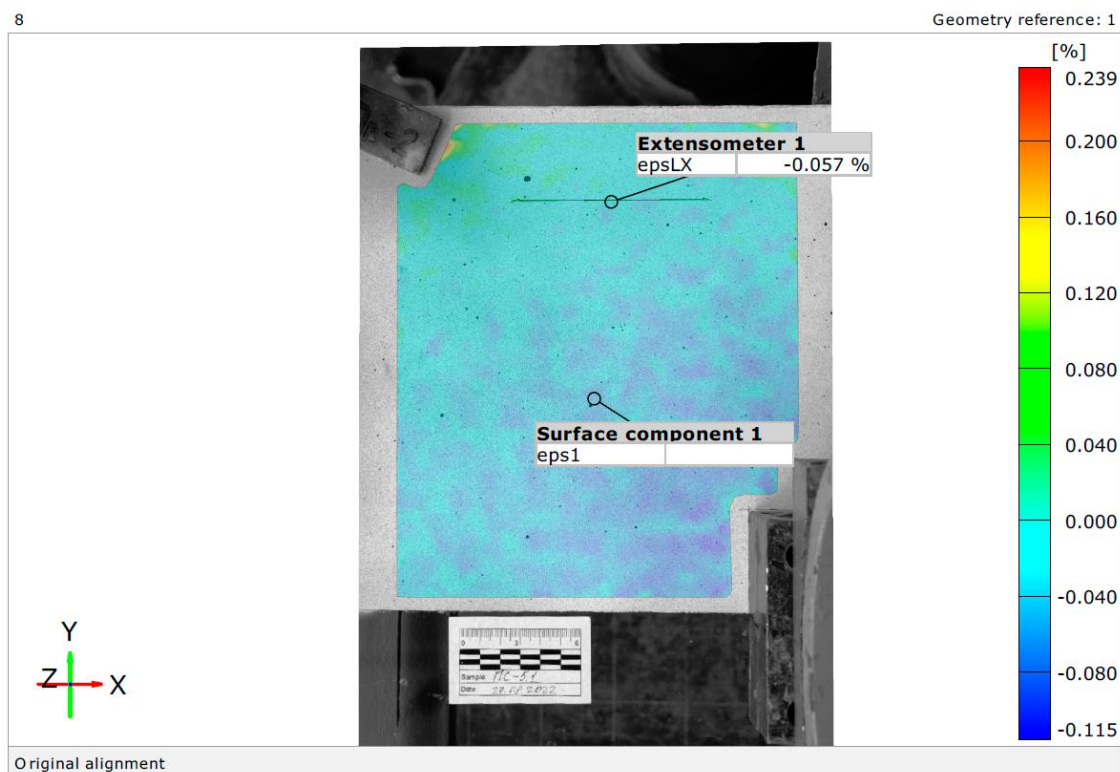


Рис.Б.8 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 8



Рис.Б.9 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 9

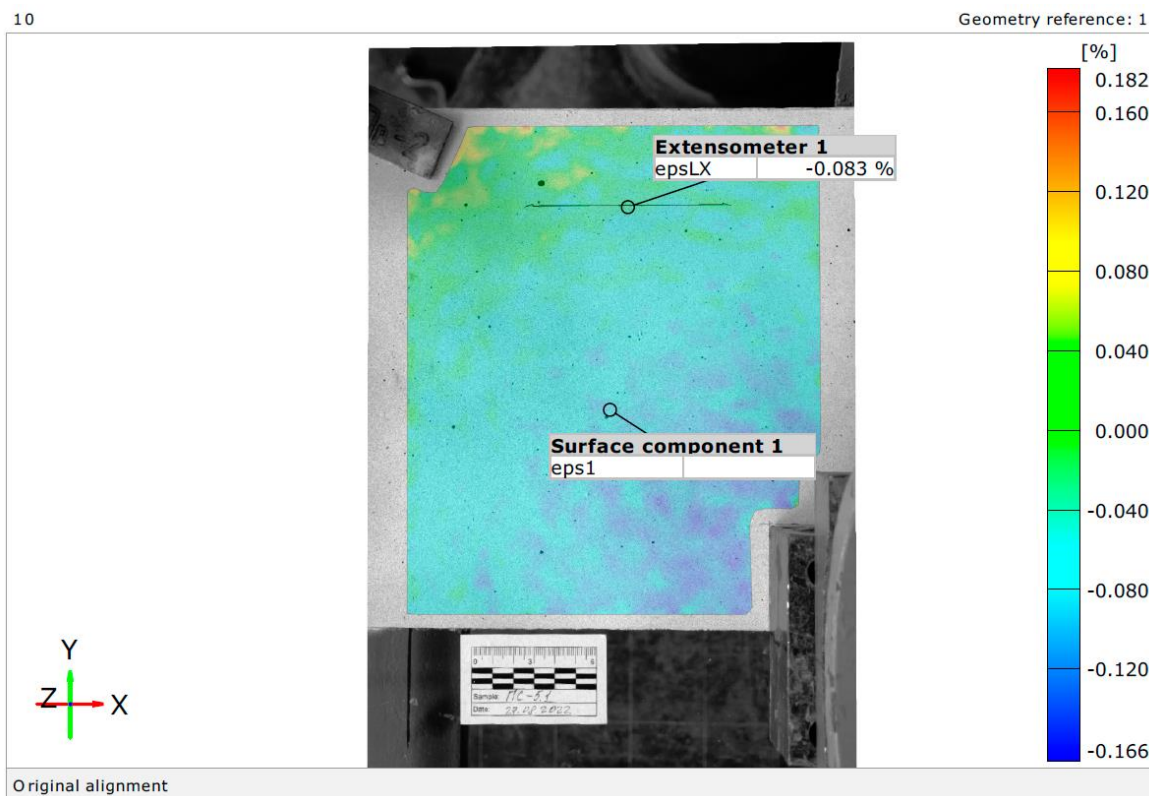


Рис.Б.10 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 10



Рис.Б.11 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 11



Рис.Б.12 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 12



Рис.Б.13 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 13

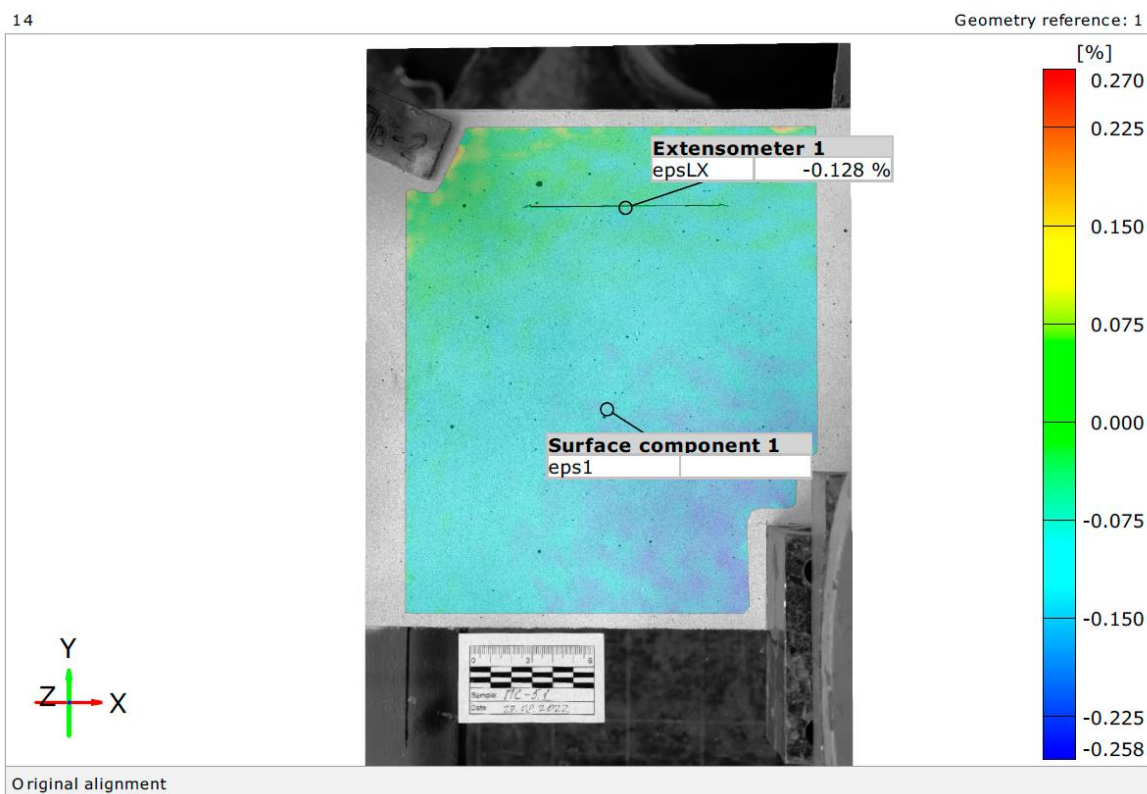


Рис.Б.14 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 14

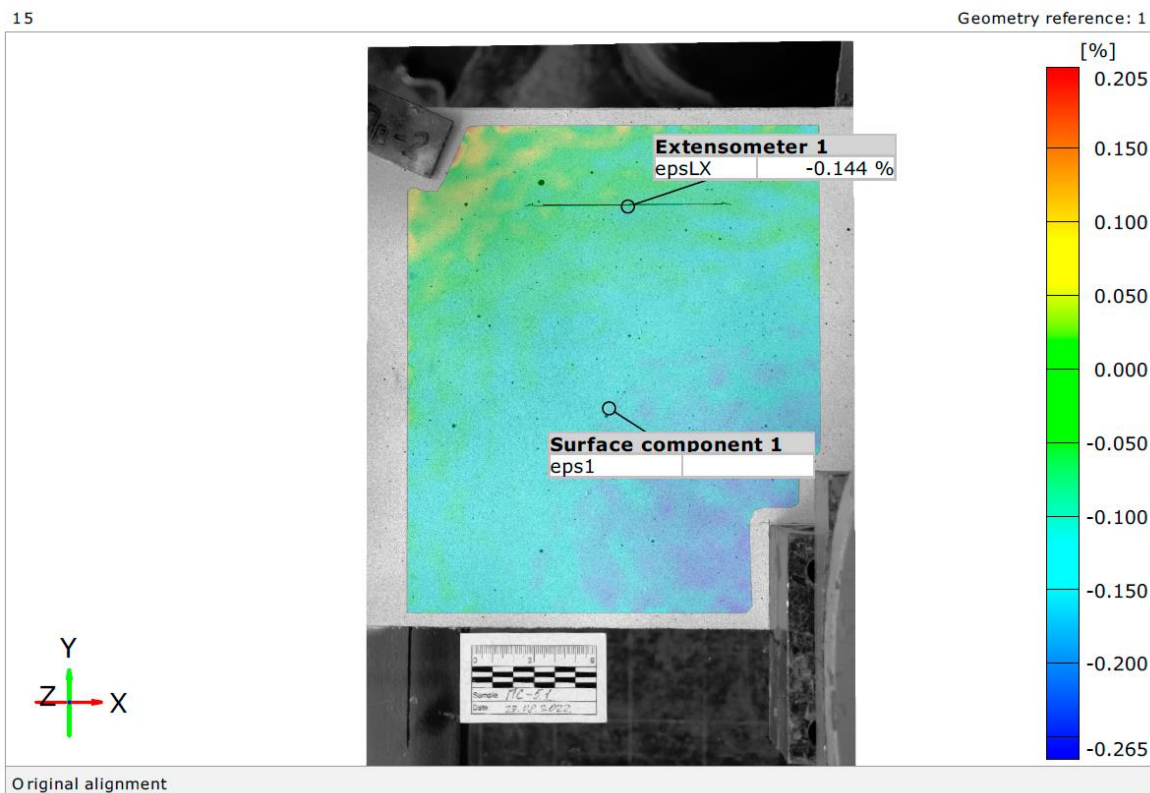


Рис.Б.15 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 15



Рис.Б.16 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 16

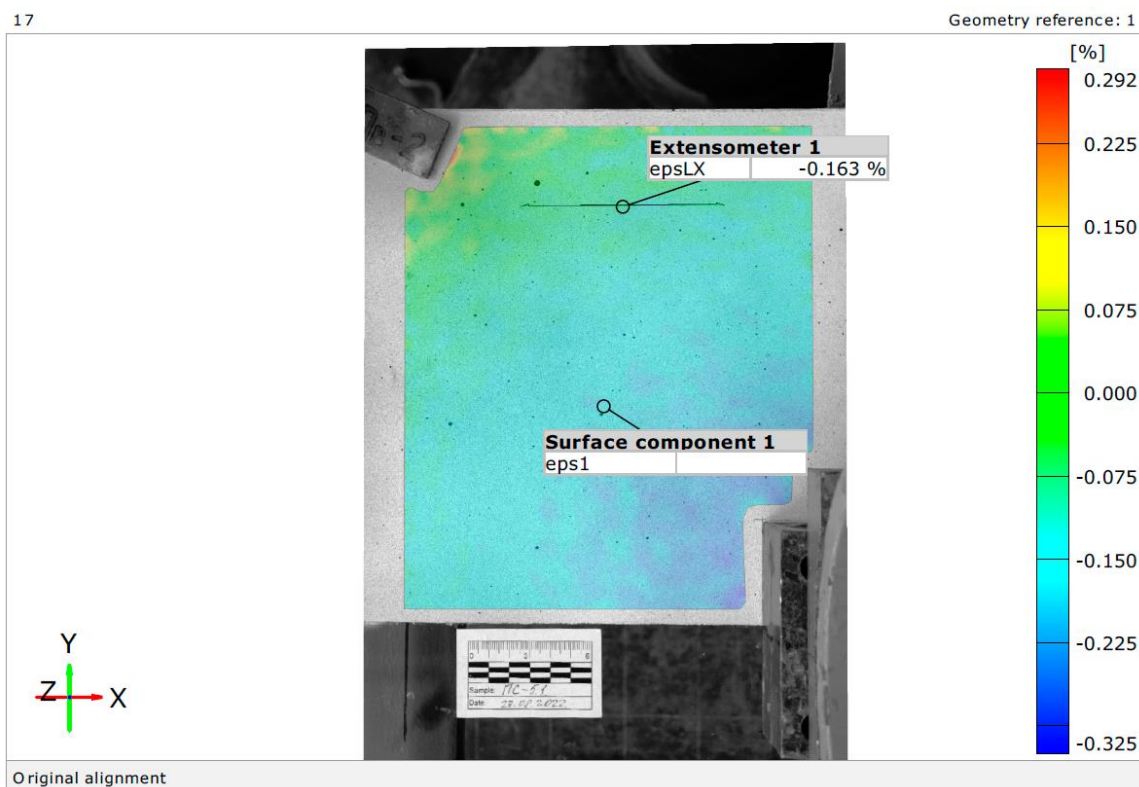


Рис.Б.17 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КІЗ. Етап 17

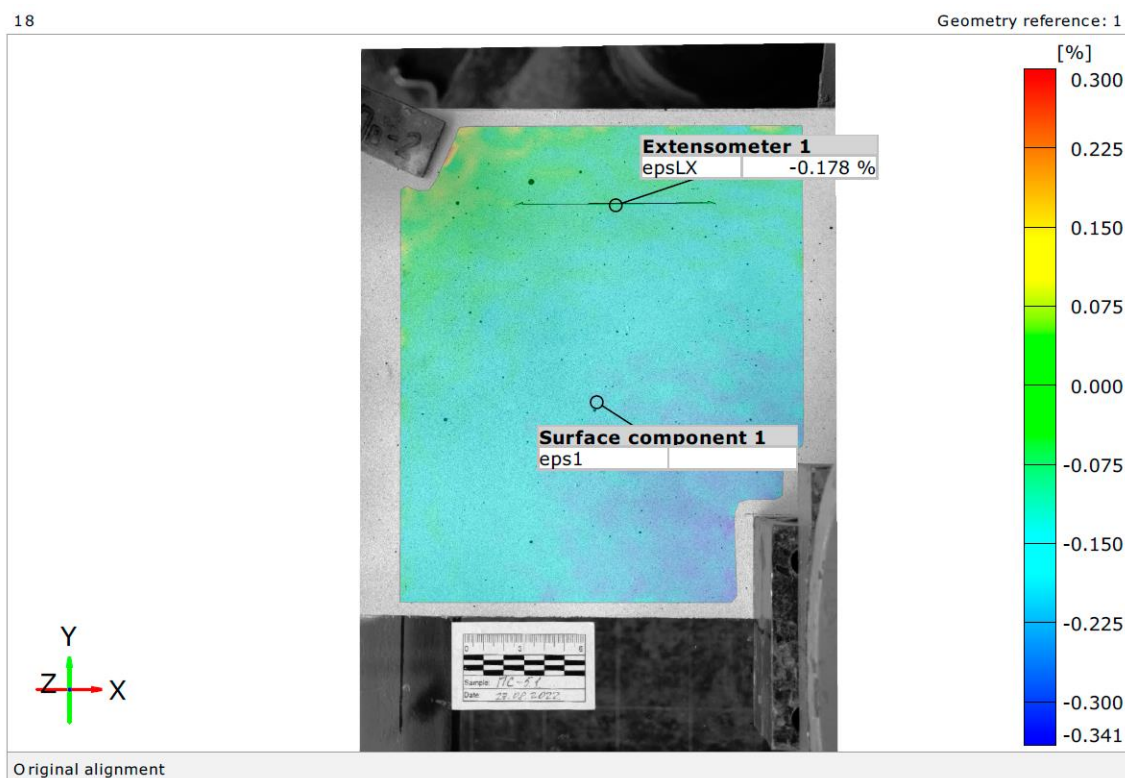


Рис.Б.18 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КІЗ. Етап 18



Рис.Б.19 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КІЦЗ. Етап 19

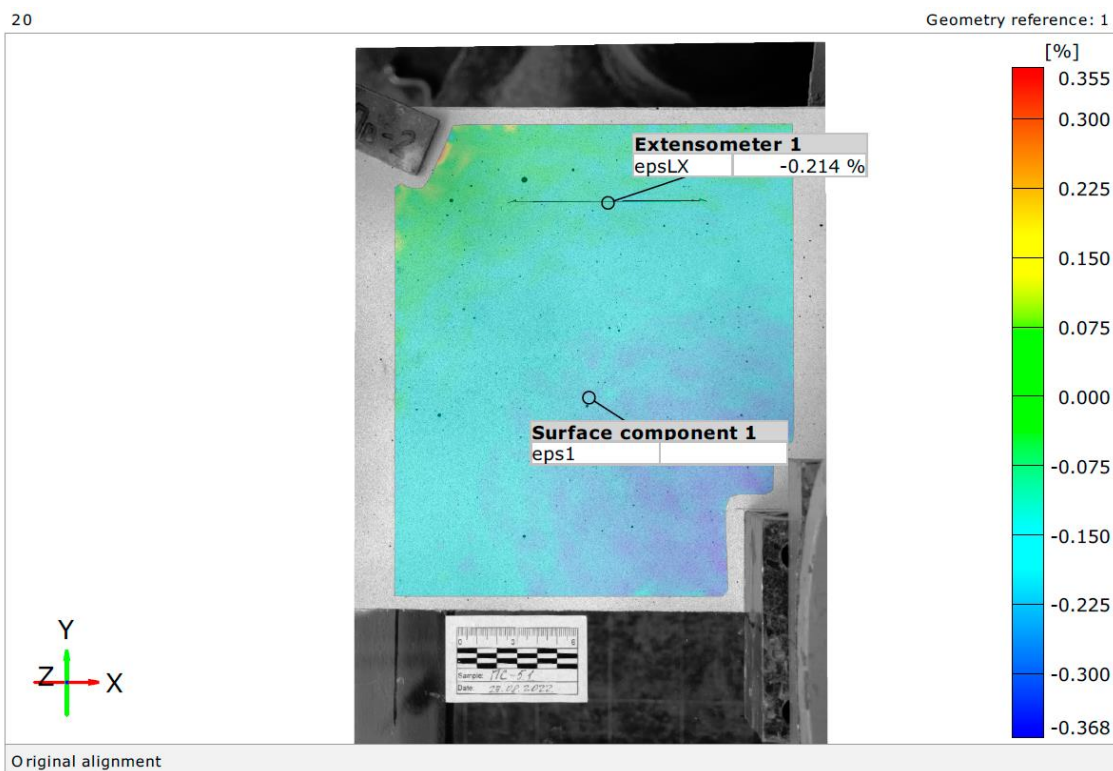


Рис.Б.20 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КІЦЗ. Етап 20



Рис.Б.21 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 21



Рис.Б.22 Протоколи випробувань скляної плити марки ПС-5.1
методом 2D КЦЗ. Етап 22

**ДОДАТОК В. Публікації здобувача та апробація результатів за темою
дисертаційного дослідження**

Статті в наукових фахових виданнях України:

1. Демчина Б. Г., Сурмай М. І., Ткач Р.О., Гула В. О., Визначення фізико-механічних властивостей скла на згин за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла, *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. Київ: КНУБА, 06/2020. №6. С94-113. DOI: 10.32347/2522-4182.6.2020.94-113. *Особистий внесок здобувача: представлення результатів дослідження фізико-механічних властивостей скла, аналіз отриманих результатів.*

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

2. Demchyna B., Surmai M., Tkach. R., Hula. V., Kozak. R. An analysis of using the method of two-dimensional digital image correlation in glass column research // *Eastern-European J. Enterp. Technol. Technology Center*, 4/12 (106) 2020, P52-59. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209761. (НМБД: SCOPUS, CrossRef, Index Copernicus, Scilit та ін.). *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, представлення результатів аналізу застосування методу двовимірної кореляції цифрових зображень.*

3. Демчина Б. Г., Гула В. О., Осадчук Т. Ю., Немец Я. Тріщиностійкість скла на основі концепцій механіки руйнування // *Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України. Прикладна механіка*, 58/68 (3) 2022, С102-115. (НМБД: Google Scholar, та ін.). *Особистий внесок здобувача: розрахунок критеріїв тріщиностійкості скла на основі положень лінійно-пружної механіки руйнування, дослідження розгалужень тріщин, аналіз отриманих результатів.*

4. Hula V, Demchyna B. Methodology and results of the series p-2 glass slabs durability test // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. №86 2022 С. 15–23. DOI: 10.31650/2415-377X-2022-86-15-23 (НМБД: Index Copernicus, Google scholar). *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень скляних балочних плит на довговічність;*

апробація методики випробувань скляних зразків на довговічність, представлення результатів випробувань.

5. Demchina, B. G., Gula, V. O., Osadchuk, T. Y., Nemets, Y. Cracking Resistance of Glass in Terms of the Principles of Fracture Mechanics // *International Applied Mechanics*, 58 (3) 2022, P336-347. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10778-022-01159-w>. (НМБД: SCOPUS, Google Scholar). *Особистий внесок здобувача: проведення фрактографічного аналізу на поверхні зруйнованих скляних зразків, аналіз останніх публікацій та досліджень по даній тематиці.*

Тези доповідей за темою дисертаційної роботи на міжнародних конференціях:

6. Демчина Б.Г., Гула В.О., Козак Р.П. Методика проведення фрактографічного аналізу поверхні зруйнованих скляних зразків, *Interaction of society and science: prospects and problems. Abstracts of XXII International Scientific and Practical Conference*. London, England, april 20-23, 2021. P33-36. *Особистий внесок здобувача: представлення методики проведення фрактографічного аналізу скляних зразків після руйнування.*

7. Bohdan Demchyna, Janusz Niemec, Hula V.O., Kozak R.P. Metoda badania próbek szkła na wytrzymałość na zginanie, *Інтелектуальні конструкції та інноваційні будівельні матеріали: зб. наук. пр.: Вип.2.* – Херсон: ХДАЕУ, 15 квітня 2021. С5-8. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних випробувань скляних зразків на згин, представлення отриманих результатів.*

8. Surmai M., Tkach R., Hula V, Kozak R., Glass as a material of bearing columns, *9-th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”*, Proceedings. – Lviv, Ukraine: Lviv Polytechnic National University, november 21-23-th 2019, P96-98. *Особистий внесок здобувача: досліджено можливість використання скла в несучих конструкціях.*

9. Surmai M., Tkach R., Hula V., Kozak R., The Experimental Research of Glass Multilayer Columns with a Central Compression, *8-th International Youth Science*

Forum "Litteris et Artibus", Proceedings. – Lviv, Ukraine: Lviv Polytechnic National University, november 22-24-th 2018, P55-60. Особистий внесок здобувача: представлення результатів експериментальних випробувань скляних колон на центральний стиск та порівняльний аналіз отриманих результатів різних серій.

10. Демчина Б.Г., Гула В.О., Немец Я, Дослідження міцності скла на згин з використанням статистичного розподілу Вейбулла, *VII Міжнародна науково-технічна конференція "Нові технології в будівництві"* – Київ, Україна: Київський національний університет будівництва та архітектури, 19 листопада 2020, С78-79. *Особистий внесок здобувача: досліджено міцність скляних зразків на згин, аналіз отриманих результатів міцності скла на згин за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла.*

11. Демчина Б.Г., Гула В.О., Методика дослідження скляних плит на довговічність, *Science, innovations and education: problems and prospects. Proceedings. – VII international scientific and practical conference, february 9-11, 2022. Tokyo, Japan, P301-307. Особистий внесок здобувача: представлення методики випробувань скляних балочних плит на довговічність.*

Список публікацій здобувача за темою дисертаційної роботи, які додатково відображають основні наукові результати:

12. Демчина Б.Г., Гула В.О., Осадчук Т.Ю. (2022) «Комбінована скляна плита», Патент України на корисну модель №150703, E04B 1/28, E04C 2/54, заява № u202106289 від 08.11.2021, опубліковано 16.03.2022, бюл. №11. *Особистий внесок здобувача: патентний пошук, розробка конструкції скляної комбінованої плити.*

13. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Гула В.О. (2022) «Установка для випробування скляних плит на довговічність», Патент України на корисну модель №151488, G01N 3/00, E04C 2/54, заява № u202107242 від 14.12.2021, опубліковано 03.08.2022, бюл. №31. *Особистий внесок здобувача: патентний пошук, розробка установки для випробування скляних плит на довговічність.*

Відомості, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

Основні результати дисертаційного дослідження були оприлюднені та обговорені на:

9-му Міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus» (м. Львів, 21-23 листопада 2019 р., НУЛП);

VII Міжнародній науково-технічній конференції «Нові технології в будівництві» (м. Київ, 19 листопада 2020р., КНУБА)

Міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні конструкції та інноваційні будівельні матеріали» (м. Херсон, 15 квітня 2021р., ХДАЕУ);

XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Interaction of society and science: prospects and problems» (м. Лондон, Великобританія, 20-23 квітня 2021р.);

VII Міжнародній науково-практичній конференції «Science, innovations and education: problems and prospects» (м. Токіо, Японія, 9-11 лютого 2022р.);

Наукових семінарах Національного університету «Львівська політехніка» кафедри «Будівельні конструкції та мости» (2019-2023.).

**ДОДАТОК Г. Рекомендації щодо застосування методики 2D КЦЗ на поверхні
скляних плит із використанням цифрового без дзеркального фотоапарату
SONY a6000**

За результатами проведених експериментальних досліджень та аналізу отриманих результатів за допомогою методу 2D КЦЗ для вимірювання деформацій на поверхні скляних плит, із використанням цифрового без дзеркального фотоапарату SONY а6000, було розроблено наступні рекомендації щодо використання даної методики:

1. Характеристики цифрового без дзеркального фотоапарату SONY а6000: матриця розміром 24.3 мега пікселі; тип матриці - APS-C CMOS; процесор – BIONZ Sony CXD4132; розмір сенсору – 23,5 x 15,6 мм; розширення сенсору - 6058x4012 пікселів; площа сенсору – 366,6 мм²; розмір одного пікселя 3,88 μм.

2. На попередньо очищений та обезжирений дослідний зразок рекомендовано нанести за допомогою маркера зону вимірювання. Далі слід створити спекл-поверхню за допомогою нанесення спочатку білої фарби, а після її висихання необхідно нанести чорну аерозольну фарбу шляхом розпилення. Після повного висихання фарби на зразок рекомендовано наклеїти масштабну лінійку, оскільки масштабна лінійка є вказівником для масштабування та виставлення балансу білого кольору у процесі подальшої обробки.

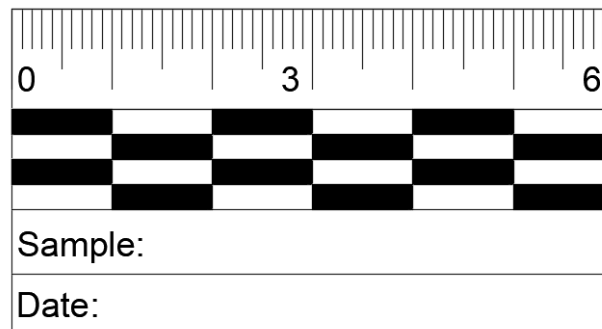


Рис.Г.1. Масштабна лінійка для спекл-кореляції

3. Далі необхідно нерухомо закріпити фотоапарат перпендикулярно до площини вимірювання над спекл-поверхнею дослідного зразка. Для усунення опуклості необхідно розташовувати фотоапарат таким чином, щоб фокусна віддаль становила в еквіваленті 50 мм.

4. Перед проведенням експерименту, рекомендовано забезпечити постійне джерело світла у зоні вимірювання. Оскільки, баланс білого кольору в загальній

експозиції впливає на забарвлення сірих пікселів, які в свою чергу, залежно від свого забарвлення впливають на визначення деформацій.

5. Зображення рекомендовано фіксувати у форматі ARW для більш детальної подальшої обробки у фоторедакторі та підготовки в спеціалізованому програмному забезпеченні. У процесі обробки зображень, їх необхідно остаточно обезбарвити у монохромні кольори та конвертувати у формат JPGE. Далі кожному зображенню слід присвоїти порядкові номери залежно від етапу навантаження. Після цього зображення готові для використання у спеціалізованому програмному забезпеченні GOM Correlate.