

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КОЗАК РОМАН ПЕТРОВИЧ

УКД 624.072.221+666.11

ДИСЕРТАЦІЯ

НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ТОНКИХ БАГАТОШАРОВИХ СКЛЯНИХ БАЛОК

Спеціальність 192 – будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань 19 – архітектура та будівництво

Подается на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



Роман КОЗАК

Науковий керівник Демчина Богдан Григорович, доктор технічних наук,
професор

АНОТАЦІЯ

Козак Р.П. Тема дисертації: «Несуча здатність тонких багатошарових скляних балок». 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.

Дисертаційна робота присвячена експериментальним та теоретичним дослідженням несучої здатності скляних балок, які працюють на чотириточковий згин у лабораторних умовах. Досліджувані зразки скляних балок відрізнялись між собою висотою та кількістю шарів скла. Усі балки поділені на серії зразків відповідно до розробленої методики експериментальних досліджень. Методика випробування скляних балок полягала у дослідженні однопролітних статично визначених балок на чотириточковий згин. Балки навантажувались статичним навантаженням протягом певного періоду часу до повного їх руйнування. Було досліджено фізико-механічні властивості скляних зразків, із яких було виготовлено скляні балки. Для дослідження скляних балок був використаний оптичний метод кореляції цифрових зображень для заміру деформівних характеристик на поверхні скляних балок, а також механічні прилади для замірів відносних деформацій, прогинів та бокових деформацій. В результаті проведених досліджень був виконаний аналіз несучої здатності скляних балок, які працюють на чотириточковий згин. Визначено характеристичну та розрахункову міцність скла на розтяг при згині. Наведено аналітичні розрахунки та розрахунки методом скінченних елементів. Надані рекомендації щодо проектування скляних конструкцій та було проведено апробацію на реальних об'єктах.

У першому розділі виконано огляд актуальних досліджень за тематикою дисертаційного дослідження. Наведено існуючі приклади дослідження скляних конструкцій, які працюють на згин, та сучасні підходи до розрахунку скляних балок за несучою здатністю та втратою стійкості. За результатами аналізу джерел було обрано основні напрямки та сформовано завдання наукового дослідження несучої здатності скляних балок, які працюють на чотириточковий згин.

Свій початок як несучий елемент скло бере із середини XIX століття, з тих пір його активно застосовують в різних архітектурних формах. Перший факт використання скла як несучого елементу породив сплеск в пошуках нових технологій виробництва. Еволюційній процес виробництва привів до появи в середині XX століття технології флоат скла. В сучасному світі виробництво флоат скла заповнило ринок будівельного скла.

Існуючі методи для випробування міцності скляних зразків на згин є гнучкими і можуть бути налаштовані для різних типів зразків за їх геометричними характеристиками. Отже, не існує одного універсального методу визначення міцності. Описані вище методи дослідження мають свої обмеження через розміри зразків і доступне обладнання. Зазвичай для оцінки міцності скла на згин використовуються методи з трьома або чотирма точками. Для статистичного аналізу результатів міцності скла, що піддається випадковим впливам, такими як впливи під час виготовлення, внутрішні дефекти скла, які неможливо виявити під час процесу виготовлення, мікротріщини після порізки листів скла тощо. Тому рекомендується використовувати модель Вейбулла для статистичного аналізу міцнісних характеристик скла. Цей математичний підхід дозволяє врахувати вплив випадкових факторів на міцність скла.

Кореляція цифрових зображень є популярним інструментом для дослідників різних галузей. Цей оптичний метод дослідження дозволяє спостерігати за об'єктом дослідження протягом тривалого часу, уникаючи прямого контакту з ним. Для досліджень із використанням даного методу науковці застосовують різні типи джерел зчитування, як із монохромними та кольоровими матрицями, використовують, як і швидкісні, так і користувацькі камери. Застосування користувацьких камер із кольоровою матрицею надає досліднику ряд переваг та недоліків. До недоліків можна віднести складність в підготовці та подальшій роботі із отриманими зображеннями. До переваг, це те, що в таких фотокамерах застосовуються сенсори більшого розміру, із більшою роздільною здатністю та меншими розмірами пікселів.

Використання скляних елементів, які працюють на згин є одним із найбільш розповсюджених способів використання скла в будівництві. Скляні балки не є новинкою та продовження роботи щодо їх дослідження є актуальним. Оскільки залишається чимало невирішених завдань, до яких дослідники різних країн застосовують різні підходи. Випадкові фактори, що впливають на руйнування, та великі коефіцієнти надійності, порівняно з іншими матеріалами, залишають без відповіді багато питань. Дослідження, спрямовані на розуміння втрати стійкості скляних балок, потребують подальшого розвитку. Створення єдиної методики для оцінки цієї роботи залишається важливим, особливо враховуючи можливість раптового та непередбачуваного руйнування скляних балок.

У другому розділі наведено обсяг та методики, які були застосовані для експериментального досліджень скляних зразків для визначення міцності на розтяг при згині та балок різних серій.

Для виконання дослідження міцності скла на розтяг при згині було виготовлено 16 зразків та розподілено у дві серії. Скляні зразки досліджувались на триточковий згин. Зразки серії 1 досліджувались на згин із горизонтальною орієнтацією скляного зразка відносно осі прикладання навантаження. Зразки серії 2 досліджувались із вертикальною орієнтацією зразка. Дослідження відбувалися в лабораторії будівельних конструкцій вищої школи технічно економічної в м. Ярославі (Польща). Для аналізу результатів дослідження скляних зразків було використано двопараметричний розподіл Вейбулла.

Для проведення досліджень на чотириточковий згин було запроектовано та виготовлено зразки скляних балок. Компанією «Склоресурс» було виготовлено 24 балки. Балки було поділено на три серії відповідно до висоти перерізу балки. Дослідження відбувалися у лабораторіях НДЛ-23 Національного університету «Львівська політехніка» та лабораторії будівельних конструкцій вищої школи технічно економічної в м. Ярославі (Польща).

Частина балок серії 1 марки Вm-1.1.1, Вm-1.1.2, Вm-1.1.5, Вm-1.1.6, Вm-1.2.1, Вm-1.2.2, було випробувано на чотириточковий згин із безперервним приростом навантаження виходячи із технологічних можливостей обладнання. Для

запису значень відносних деформацій для балок із безперервним приростом навантаження було використано тензорезистори. Балки серій 1, 2, 3 досліджувались із ступінчастим приростом навантаження було виготовлено установку для дослідження скляних балок, на яку було отримано патент України №153096, G01N 3/20, G01M 5/0'0, E04C 2/54, E04C 3/02, E04C 3/28. Для цих балок записувались значення відносних деформацій за допомогою методу кореляції цифрових зображень та механічних екстензометрів, а значення прогинів та бокових деформацій було записано за допомогою механічних прогиномірів.

Розроблено методику використання користувацьких бездзеркальних фотокамер із кольоровою матрицею для дослідження скляних балок на чотириточковий згин. Покрокова методика полягала у виборі правильного апаратного забезпечення та визначення характеристик фотокамери, що дозволяло отримувати більше інформації із готових зображень, та проводити подальшу підготовку зображення для аналізу. За допомогою фоторедактора зображення знебарвлювались та змінювались налаштування балансу білого. Готові до аналізу зображення передавались в спеціалізоване програмне забезпечення GOM Correlate Pro.

У *третьому розділі* представлено результати проведених експериментальних досліджень, фізико-механічні характеристики скляних зразків, параметри несучої здатності скляних балок на чотириточковий згин, та деформівні параметри досліджуваних балок.

За результатами дослідження скляних зразків було визначено характеристичні значення міцності на розтяг при згині. Для серії 1, зразків які досліджувались із горизонтальною орієнтацією, характеристична міцність скла становила $f_{g,k} = 35,8$ МПа. Для зразків серії 2, із вертикальною орієнтацією зразка – $f_{g,k} = 32,23$ МПа. За отриманими значення результатів було визначено розрахункове значення міцності скла на розтяг при згині згідно із prEN 16612, яке становило $f_{g,d} = 17.93$ МПа.

Усі балки окрім, балки Вm-2.3.1, мали однаковий характер руйнування: спочатку утворювалась тріщина у нижній розтягненій зоні, яка потім

поширювалась у вигляді тюльпанової пелюстки до верхньої зони. Балки зруйнувались внаслідок вичерпання несучої здатності на згин. Значення руйнівного напруження для великої кількості досліджених балок перевищувало характеристичне значення міцності на розтяг при згині $f_{g,k}$. Для прогнозування руйнування тонких скляних балок, які працюють на згин, рекомендовано занижувати міцність на коефіцієнт 1.6, який відповідає значенню коефіцієнта надійності за матеріалом для звичайного флоат скла згідно із prEN 16612.

Тривалість та швидкість прикладання навантаження мають прямий вплив на несучу здатність скляних балок. Скляні балки які досліджувались із постійним приростом навантаження мали значно вище значення нормального напруження в момент навантаження N_i . Для одношарових балок різниця у відносних деформаціях при навантаженні $N_i = 1$ кН, склала до 3-х разів. Для двошарових балок при $N_i = 1$ кН значення відрізнялись до 5-ти разів, та у 2.7 рази при навантаженні $N_i = 5$ кН. При цьому значення руйнівних навантажень відрізнялись у 1.2 рази, однаково для одношарових та двошарових балок.

Порівняння балок при контрольних навантаженнях показало, що як і збільшення кількості шарів скла так і збільшення висоти балки позитивно впливають на значення запасу несучої здатності. При значенні $N_i = 1$ кН найбільш ефективним було застосування балки серії 1, вистою 100 мм і двома шарами скла із значенням напруження $\sigma_i = 10.4$ МПа. Для навантаження $N_i = 5$ кН – балки серії 2 висотою, 150 мм із двома шарами скла та напруженнями $\sigma_i = 8.9$ МПа. При $N_i = 10$ кН – двошарову балку серії 3 із висотою 200 мм або тришарову балку серії 2, значення напружень при цьому становили $\sigma_i = 11.1$ МПа та $\sigma_i = 10.6$ МПа відповідно. Використання балок із 1 шаром скла не є рекомендованим, оскільки вони схильні до великих бокових деформацій та небезпечні під час повного руйнування конструкцій.

Використання користувацьких фотокамер із кольоровим сенсором виправдало себе в рамках даного дослідження. При порівнянні значень відносних деформацій отриманих за допомогою методу КЦЗ та механічних приладів, отримано високу збіжність результатів.

У четвертому розділі аналіз результатів дослідження скляних балок на чотириточковий згин, виконаний аналітичний розрахунок балок на дію моменту із урахуванням втрати стійкості, проведене чисельно-аналітичне моделювання експерименту методом скінчених елементів, наведено рекомендації щодо проектування скляних балок.

Виконано аналітичний розрахунок тонких багат шарових скляних балок на чотириточковий згин із понижувальними коефіцієнтами втрати стійкості згідно із CNR-DT-210. Визначення коефіцієнта втрати стійкості було виконано за кривими втрати стійкості із використанням коефіцієнтів $\alpha_0 = 0.2$ та $\alpha_{LT} = 0.26$. Даний метод показав достатній запас міцності для скляних балок та може бути використаний для проектування скляних балок.

Виконано розрахунок скляних балок на чотириточковий згин із використанням методу скінчених елементів. Розрахунок полягав у використанні нелінійних залежностей матеріалу та об'ємних скінчених елементів для моделювання скляних багат шарових балок. Даний метод показав велику збіжність із аналітичними розрахунками та може бути використаний у проектуванні скляних конструкцій.

Додатковий модуль для розрахунку та проектування скляних конструкцій RF -Glass, який входить до програмного комплексу Dlubal RFEM, був використаний для розрахунку скляних балок, які працюють на чотириточковий згин. Даний модуль базується на методі скінчених елементів із використанням пластинчатих SE та лінійною залежністю для характеристик матеріалів. Результати максимальних напружень отримані даним методом були більшими за значення, отримані аналітично.

За результатами досліджень наведено рекомендації щодо проектування тонких багат шарових скляних балок, які працюють на чотириточковий згин.

Результати дисертаційного дослідження скляних балок на згин отримали практичне застосування при проектуванні та розрахунку скляних конструкцій на реальних об'єктах. У підтвердження цього подано акти впровадження дисертаційного дослідження. Також отримано патент України «Установка для

випробування скляних балок на чотириточковий згин», Патент України на корисну модель №1 153096, G01N 3/20, G01M 5/00, E04C 2/54, E04C 3/02, E04C 3/28 заява № u202205097 від 28.12.2022, опубліковано 17.05.2023, бюл. №20.

Ключові слова: несуча здатність, балка, скляна балка; згин, чотириточковий згин; міцність, міцність скла на згин, двопараметричний розподіл Вейбулла, фізико-механічні характеристики скла, кореляція цифрових зображень; метод скінчених елементів, розрахунок.

ABSTRACT

Kozak R.P. Thesis topic: "Bearing capacity of thin multilayer glass beams". Submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the speciality 192 - Civil Engineering and Construction. Fields of knowledge 19 - architecture and construction - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2023.

This thesis is devoted to experimental and theoretical studies of the bearing capacity of glass beams subjected to four-point bending in the laboratory. The glass beam samples under study differed in height and number of glass layers. All beams were divided into a series of samples in accordance with the developed experimental research methodology. The test methodology for glass beams consisted of testing single-span statically determined beams for four-point bending. The beams were loaded with a static load for a certain period until their complete destruction. The physical and mechanical properties of the glass samples from which the glass beams were made were investigated. To study the glass beams, an optical method of digital image correlation was used to measure the deformation characteristics on the surface of the glass beams, as well as mechanical gauges to measure relative deformations, deflections, and lateral deformations. As a result of the research, the bearing capacity of glass beams subjected to four-point bending was analyzed. The characteristic and calculated tensile strength of glass in bending were determined. Analytical and finite element calculations are presented. Recommendations for the design of glass structures are given and tested on real objects.

The first chapter reviews current research on the topic of this dissertation. Existing examples of research on bending glass structures and modern approaches to the calculation of glass beams in terms of bearing capacity and loss of stability presented. Based on the results of the analysis of sources, the main directions selected and the tasks of scientific research on the bearing capacity of glass beams working in four-point bending formed.

Glass as a supporting element date back to the mid-nineteenth century, and since then it has been actively used in various architectural forms. The first fact of using glass

as a load-bearing element gave rise to a surge in the search for new production technologies. The evolutionary process of production led to the emergence of float glass technology in the mid-20th century. In the modern world, float glass production has flooded the construction glass market.

Existing methods for testing the flexural strength of glass specimens are flexible and can be customized for different types of specimens according to their geometric characteristics. Therefore, there is no single universal method for determining strength. The test methods described above have their limitations due to the size of the specimens and the available equipment. Typically, three- or four-point methods are used to evaluate the bending strength of glass. To statistically analyse the strength results of glass subjected to random influences, such as influences during manufacturing, internal defects in the glass that cannot be detected during the manufacturing process, microcracks after cutting glass sheets, etc. Therefore, it is recommended to use the Weibull model for statistical analysis of the strength characteristics of glass. This mathematical approach allows you to consider the influence of random factors on the strength of glass.

Digital image correlation is a popular tool for researchers in various fields. This optical research method allows you to observe the object of study for a long time without having to come into direct contact with it. For research using this method, scientists use different types of reading sources, both with monochrome and colour matrices and use both high-speed and custom cameras. The use of custom cameras with colour the disadvantages include the difficulty in preparing and further working with the images obtained. The advantages are that such cameras use larger sensors with higher resolution and smaller pixel sizes.

The use of bending glass elements is one of the most common ways to use glass in construction. Glass beams are not new, and continuing work on their research is relevant. There are still many unresolved problems to which researchers in different countries apply different approaches. Random factors affecting fracture and high-reliability factors compared to other materials leave many questions unanswered. Research aimed at understanding the loss of stability of glass beams requires further development. Establishing a unified methodology for evaluating this work remains

important, especially given the possibility of sudden and unpredictable failure of glass beams.

The second chapter describes the scope and methods used for the experimental study of glass specimens for determining the bending tensile strength and beams of different series.

To test the tensile strength of glass in bending, 16 specimens were made and divided into two series. The glass specimens were tested for three-point bending. Specimens of series 1 were tested for bending with the glass specimen oriented horizontally relative to the axis of load application. Specimens of series 2 were tested with a vertical orientation of the specimen. The tests were carried out in the laboratory of building structures of the Higher School of Technical Economics in Jarosław (Poland). The two-parameter Weibull distribution was used to analyze the results of the glass samples.

To conduct the four-point bending tests, samples of glass beams were designed and manufactured. Sklorezurs manufactured 24 beams. The beams were divided into three series according to the height of the beam section. The research took place in the laboratories of Research Laboratory 23 of Lviv Polytechnic National University and the Laboratory of Building Structures of the Higher School of Technical and Economic Studies in Jarosław (Poland).

Some of the Series 1 beams of the Bm-1.1.1, Bm-1.1.2, Bm-1.1.5, Bm-1.1.6, Bm-1.2.1, and Bm-1.2.2 grades were tested for four-point bending with continuous load increment based on the technological capabilities of the equipment. Strain gauges were used to record the values of relative deformations for the beams with a continuous load increase. Beams of series 1, 2, 3 were studied with a stepwise increase in load. A glass beam testing apparatus was manufactured, for which a patent of Ukraine No. 153096, G01N 3/20, G01M 5/00, E04C 2/54, E04C 3/02, E04C 3/28 was obtained. For these beams, the values of relative deformations were recorded using the method of correlation of digital images and mechanical extensometers, and the values of deflections and lateral deformations were recorded using mechanical deflectometers.

A methodology was developed for using custom mirrorless cameras with a color matrix to investigate glass beams for four-point bending. The step-by-step methodology consisted of choosing the right hardware and determining the characteristics of the camera, which allowed us to obtain more information from the finished images and further prepare the image for analysis. Using a photo editor, the images were de-colored and the white balance settings were changed. The images ready for analysis were transferred to specialized software GOM Correlate Pro.

The third chapter presents the results of experimental studies, physical and mechanical characteristics of glass samples, parameters of the bearing capacity of glass beams in four-point bending, and deformation parameters of the studied beams.

Based on the results of the glass specimens, the characteristic values of tensile strength in bending were determined. For Series 1, the specimens tested with a horizontal orientation, the characteristic strength of the glass was $f_{g,k} = 35.8 \text{ MPa}$. For samples of series 2, with a vertical orientation of the sample, $f_{g,k} = 32.23 \text{ MPa}$. Based on the results obtained, the calculated value of the glass tensile strength in bending according to prEN 16612 was determined, which was $f_{g,d} = 17.93 \text{ MPa}$.

All beams, except for beam Bm-2.3.1, had the same failure pattern: first, a crack formed in the lower tensile zone, which then spread in the form of a tulip petal to the upper zone. The beams collapsed because of exhaustion of the bending load-bearing capacity. For many the beams tested, the value of the fracture stress exceeded the characteristic value of the bending tensile strength $f_{g,k}$. To predict the failure of thin glass beams in bending, it is recommended to underestimate the strength by a factor of 1.6, which corresponds to the value of the material reliability factor for ordinary float glass according to prEN 16612.

The duration and rate of load application have a direct impact on the load-bearing capacity of glass beams. Glass beams tested with a constant load increase had a significantly higher value of normal stress now of loading N_i . For single-layer beams, the difference in relative deformations at $N_i = 1 \text{ kN}$ was up to 3 times. For double-layer beams at $N_i = 1 \text{ kN}$, the values differed by up to 5 times, and by 2.7 times at $N_i = 5 \text{ kN}$.

At the same time, the values of the destructive loads differed by a factor of 1.2, equally for single-layer and double-layer beams.

A comparison of the beams under control loads showed that both an increase in the number of glass layers and an increase in the height of the beam have a positive effect on the value of the bearing capacity margin. At $N_i = 1 \text{ kN}$, the most effective was the use of a series 1 beam with a standoff of 100 mm and two layers of glass with a stress value of $\sigma_i = 10.4 \text{ MPa}$. For a load of $N_i = 5 \text{ kN}$, we used beams of series 2, 150 mm high, with two layers of glass and stresses of $\sigma_i = 8.9 \text{ MPa}$. At $N_i = 10 \text{ kN}$, a double-layer beam of series 3 with a height of 200 mm or a three-layer beam of series 2, with stresses of $\sigma_i = 11.1 \text{ MPa}$ and $\sigma_i = 10.6 \text{ MPa}$, respectively. The use of beams with 1 layer of glass is not recommended, as they are prone to large lateral deformations and are dangerous in case of complete structural failure.

The use of user cameras with a colour sensor proved to be justified in this study. When comparing the values of relative deformations obtained using the FEA method and mechanical devices, a high convergence of results was obtained.

The fourth chapter analysis of the results of the study of glass beams for four-point bending, analytical calculation of beams for moment action about loss of stability, numerical analytical modelling of the experiment by the finite element method, and recommendations for the design of glass beams.

The analytical calculation of thin multilayer glass beams for four-point bending with decreasing coefficients of stability loss in accordance with CNR-DT-210 performed. The determination of the loss of stability coefficient performed using the loss of stability curves with the coefficients $\alpha_0 = 0.2$ and $\alpha_{LT} = 0.26$. This method showed a sufficient safety margin for glass beams and can be used for the design of glass beams.

The calculation of glass beams for four-point bending using the finite element method. The calculation was based on the use of nonlinear material dependencies and volumetric finite elements for modelling glass laminated beams. This method showed great agreement with analytical calculations and can be used in the design of glass structures.

An additional module for the calculation and design of glass structures, RF-Glass, which is part of the Dlubal RFEM software package, used to calculate glass beams

subjected to four-point bending. This module is based on the finite element method using lamellar FE and a linear relationship for material characteristics. The maximum stress results obtained by this method were higher than those obtained analytically.

Based on the results of the research, recommendations for the design of thin laminated glass beams subjected to four-point bending presented.

The results of the dissertation study of glass beams in bending have practically applied in the design and calculation of glass structures at real objects. In confirmation of this, the acts of implementation of the dissertation research submitted. Also received a patent of Ukraine "Installation for testing glass beams for four-point bending", Patent of Ukraine for utility model No. 153096, G01N 3/20, G01M 5/00, E04C 2/54, E04C 3/02, E04C 3/28 application No. u202205097 dated 12/28/2022, published on 05/17/2023, bulletin No. 20.

Key words: bearing capacity, beam, glass beam; bending, four-point bending; strength, glass bending strength, two-parameter Weibull distribution, physical and mechanical characteristics of glass, correlation of digital images; finite element method, calculation.

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

Статті в наукових фахових виданнях України:

1. B. Demchyna, R. Kozak, P. Majcher, J. Niemiec, Determination of physical and mechanical characteristics of glass bending comparison of strength values under different conditions of the orientation of a test sample // Building construction. Theory and Practice. 2022. № 10. P. 11–23, (HMБД Index Copernicus (2020), Google Scholar, CrossRef).
2. B. Demchyna, R. Kozak, Research of glass beams for four-point bending using the method of digital image correlation // Building construction. Theory and Practice. 2023. № 12. P. 16-26, (HMБД Index Copernicus (2020), Google Scholar, CrossRef).

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

3. 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 Journal of Enterprise Technologies*, 4/12 (106) 2020, P52-59. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209761. (НМБД: Scopus Q3, CrossRef, Index Copernicus, Scilit та ін.).
4. Justyna Sobczak-Piąstka, Demchyna Bogdan, Roman Kozak, Paula Majcher, Janusz Niemiec; Assessment of the effect of lateral loss of stability for flat glass beams. AIP Conf. Proc. 17 August 2023; 2949 (1): 020016. (НМБД: Scopus).

Тези доповідей за темою дисертаційної роботи на міжнародних конференціях:

5. 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.
6. Bohdan Demchyna , Janusz Niemiec, 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.*
7. 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.
8. 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.
9. Sobczak-Piąstka Justyna, Demchyna Bohdan, Roman Kozak, Paula Mejcher, Janusz Niemiec, Assessment of the effect of lateral loss of stability for flat glass

beams: *11th International Scientific Session Applied Mechanics*. Bydgoszcz, Poland, November 18, 2022, P31.

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

10. Демчина Б.Г., Козак Р.П., Пелех А.Б., Гула В.О., Кунанець Ю.М. (2023) «Установка для випробування скляних балок на чотирьохточковий згин», Патент України на корисну модель №1 153096, G01N 3/20, G01M 5/00, E04C 2/54, E04C 3/02, E04C 3/28 заява № u202205097 від 28.12.2022, опубліковано 17.05.2023, бюл. №20.

Відомості, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

Основні результати дисертаційного дослідження були оприлюднені та обговорені на:

8-му Міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus» (м. Львів, 22-24 листопада 2018 р., НУЛП);

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 2021 р., ХДАЕУ);

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

11-тій Міжнародній науковій сесії прикладної механіки (м. Бидгощ Польща 18 листопада 2022 р.)

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

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	9
ЗМІСТ	17
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СТАН НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ	24
1.1. Історія скла як конструктивного матеріалу.....	24
1.2. Скло як будівельний матеріал. Дослідження фізико-механічних характеристик скла.....	26
1.3. Метод кореляції цифрових зображення для дослідження будівельних конструкцій	30
1.4. Дослідження та використання скляних балок.....	35
1.5. Висновки до розділу 1	45
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. МАТЕРІАЛИ ТА КОНСТРУКЦІЯ ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ	47
2.1. Обсяг експериментальних досліджень	47
2.1.1. Зразки для визначення фізико-механічних характеристик скла на згин	47
2.1.2. Дослідні зразки скляних балок для дослідження на чотириточковий згин.....	49
2.2. Методика випробування міцності скла на розтяг при згині.....	54
2.3. Дослідження скляних балок на згин із безперервним приростом навантаження	56
2.4. Дослідження скляних балок на згин із контрольованим ступінчастим приростом навантаження.....	58
2.5. Використання методу кореляції цифрових зображень для визначення деформацій в процесі дослідженні скляних балок	63
2.6. Висновки до розділу 2	67
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	69

3.1.	Результати випробування міцності скла на розтяг при згині	69
3.2.	Результати дослідження скляних балок на чотирьох-точковий згин ..	75
3.2.1.	Серія 1. Балки висотою 100 мм із безперервним приростом навантаження	75
3.2.2.	Серія 1. Балки висотою 100 мм	81
3.2.3.	Серія 2. Балки висотою 150 мм	91
3.2.4.	Серія 3. Балки висотою 200 мм.	102
3.3.	Аналіз результатів досліджень скляних балок.....	114
3.4.	Висновки до розділу 3	129
РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРОЕКТУВАННЯ СКЛЯНИХ БАЛОК.....		
132		
4.1.	Аналітичний розрахунок скляних балок на згин із урахуванням втрати стійкості	132
4.2.	Розрахунок скляних балок, які працюють на згин методом скінчених елементів	135
4.3.	Рекомендації щодо проектування тонких скляних балок.....	140
4.4.	Висновки до розділу 4	141
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ		
143		
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		
146		
ДОДАТОК А. АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ		
161		
ДОДАТОК Б. ПРОТОКОЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛЯНИХ ПЛОСКИХ БАЛОК З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ КОРЕЛЯЦІЇ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ		
164		
ДОДАТОК В. ПРОТОКОЛ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛЯНИХ БАЛОК ІЗ СТУПІНЧАСТИМ ПРИРОСТОМ НАВАНТАЖЕННЯ.....		
179		
ДОДАТОК Г. АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА		
186		

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження: Світ будівництва не стоїть на місці та пропонує все нові технології для втілення фантастичних ідей архітекторів у вигляді нових форм. Одним із найрозповсюдженіших матеріалів, який використовують в таких спорудах – це скло. Завдяки своїм естетичним властивостям скло дозволяє створити щось футуристичне, споруди які будуть захоплювати подих, створюючи ефект прозорості та легкості.

Сучасну людину уже не здивувати скляними конструкціями. Здебільшого повністю виготовлені із скла будівлі – це малі архітектурні форми, мезоніни, теплиці, елементи фасаду. Також скло використовують як один із елементів перекриття для того, щоб створити ефект прозорості. Все більше появляються справді вражаючі споруди великих прольотів, які повністю виготовлені із скла, скляні мости, басейни, сходи, накриття.

Основним елементом будь-яких пролітних конструкцій є балки. Логічним, виходячи із технологічного процесу виготовлення скла, є рішення виготовляти балки із вертикальною орієнтацією листів скла до осі прикладання навантаження. Такий підхід дозволяє економити дорогий матеріал, однак має чимало недоліків, основний із яких, втрата стійкості балок із площини. Іншим недоліком, але уже скла як матеріалу – є крихкість та доволі великий розкид міцнісних характеристик, які враховуються великими коефіцієнтами надійності, що коливаються від 1.5 до 1.8. Сам характер руйнування скла має раптовий характер і його руйнування може наступити до появи великих прогинів тощо. Технологія триплексування дозволяє виготовляти багатошарові скляні елементи з підвищеною експлуатаційною безпекою.

В Україні на даний момент відсутні нормативні документи, які б прописували чіткі правила для проектування скляних конструкцій, оскільки в українському будівництві скляні конструкції розглядаються здебільшого як огорожуючі конструкції. Тому, проведення наукових досліджень із вивчення роботи скляних конструкцій, а саме балок, дозволить розширити можливості використання скляних конструкцій як несучих елементів.

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

Об'єкт дослідження – несуча здатність скляних балок, що працюють на чотириточковий згин.

Предмет дослідження – скляні балки із різною висотою та кількістю шарів скла.

Мета – встановити несучу здатність скляних плоских балок, що працюють на чотириточковий згин під дією статичного навантаження.

Для досягнення мети було поставлено наступні завдання:

1) виконати дослідження міцності скляних зразків скла на розтяг при згині із різною орієнтацією зразків відносно ширини поперечного перерізу;

2) виконати експериментальні дослідження скляних балок під дією статичного навантаження на чотириточковий згин із різною кількістю шарів та різною висотою;

3) провести аналіз отриманих результатів випробувань, визначити фактори які впливають на міцність скляних балок, що працюють на чотириточковий згин;

4) апробувати метод кореляції цифрових зображень з уточненням параметрів його використання та використання користувачьких цифрових фотокамер широкого вжитку для визначення деформацій бокових поверхонь скляних балок;

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

Методи дослідження:

- експериментальні дослідження фізико-механічних характеристик скла на розтяг при згині та несучої здатності скляних балок із використанням механічних приладів та методу кореляції цифрових зображень;

- статистично-ймовірнісний аналіз даних експериментальних досліджень з визначенням характеристичної міцності скла на розтяг при згині за допомогою статистичного розподілу Вейбулла;

- аналіз отриманих експериментальних даних з випробувань скляних балок різної висоти та різною кількістю шарів скла;
- чисельний метод скінчених елементів (МСЕ) для теоретичного аналізу несучої здатності скляних балок які працюють на чотириточковий згин.

Наукова новизна отриманих результатів:

- отримано нові результати дослідження фізико-механічних характеристик скла на розтяг при згині зразків із різною орієнтацією відносно прикладання навантаження та проведено статистичний аналіз отриманих результатів;
- отримано нові експериментальні дані несучої здатності скляних балок різної висотою та різною кількістю шарів скла, що працюють на чотириточковий згин;
- вдосконалено та апробовано методику використання методу кореляції цифрових зображень із використанням користувацьких цифрових фотокамер із кольоровою матрицею;
- вдосконалено методику теоретичного розрахунку скляних балок на згин із урахуванням втрати стійкості та виконано розрахунок скляних балок об'ємними скінченими елементами.

Особистий внесок здобувача:

Усі основні результати дисертаційного дослідження та наукові розробки одержані автором самостійно. У співавторстві автору належать публікації: [1] визначення фізико-механічних характеристик скла із різною орієнтацією зразків на розтяг при згині; [2,3] – використання методу кореляції цифрових зображень для дослідження скляних конструкцій; [4,5] – дослідження скляних балок на чотириточковий згин.

Апробація матеріалів дисертації:

Основні результати дисертаційної роботи були оприлюднені та обговорені на: 8-му Міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus» (м. Львів, 22-24 листопада 2018 р., НУ ЛП); 9-му міжнародному молодіжному

науковому форумі «Litteris et Artibus» (м. Львів, 21-23 листопада 2019 р., НУЛП); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Нові технології в будівництві» (м. Київ, 19 листопада 2020р., КНУБА); Міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні конструкції та інноваційні будівельні матеріали» (м. Херсон, 15 квітня 2021р., ХДАЕУ); XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Interaction of society and science: prospects and problems» (м. Лондон, Великобританія, 20-23 квітня 2021р.); 11-тій Міжнародній науковій сесії прикладної механіки (м. Бидгощ, Польща, 18 листопада 2022 р.); Наукових семінарах кафедри «Будівельні конструкції та мости» Національного університету «Львівська політехніка» (2019-2023).

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 143 найменувань; 4 додатки. Загальна кількість аркушів становить 189, з яких 125 основного тексту, 86 рисунків, 16 таблиць, 16 сторінок списку виконаних джерел, 29 сторінок додатків.

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

Тема дисертації «Несуча здатність тонких багат шарових скляних балок» відповідає науковому напряму кафедри будівельних конструкцій та мостів «Теоретичні та експериментальні дослідження звичайних та попередньо напружених залізобетонних, металевих, дерев'яних та інших конструкцій будівель, споруд, мостів і фундаментів та методів їх підсилення з врахуванням різних видів армування, бетонування, способів та інтенсивності навантаження, дії агресивного середовища, підвищених температур», дата затвердження на Вченій раді Інституту будівництва та інженерії доквілля - 08.10.2019, протокол №3; дата уточнення теми дисертації на Вченій раді Інституту будівництва та інженерних систем - 13.06.2023, протокол №10.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні методики дослідження несучої здатності скляних балок на чотирьохточковий згин та імплементації методу кореляції цифрових зображень для цифрових фотокамер

широкого вжитку. Отримані результати досліджень та розроблені рекомендації із проектування скляних балок на згин 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 №153096 «Установка для випробування скляних балок на чотириточковий згин», заява № u202205097 від 28.12.2022, опубліковано 17.05.2023.

Отримано акти про впровадження результатів досліджень (Додаток А) 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 для сучасного мультифункціонального мистецького простору шляхом нового будівництва на вул. Стефаника, 3, у м. Львові від ФОП «Семенченко Наталія Олександрівна».

РОЗДІЛ 1. ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СТАН НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ

1.1. Історія скла як конструктивного матеріалу

Історія скла як матеріалу бере свій початок ще за Кам'яної Ери, там воно зустрічалось у вигляді природного обсидіану (рис.1.1 [6]), що завдяки своїм крихким властивостям дозволяло використовувати його як ідеальний матеріал для ріжучих інструментів [7], оскільки він легко піддавався обробці та заточуванню.



Рис.1.1. Уламок обсидіану який використовувався в Кам'яну Епоху.

Перші штучно виготовлені зразки скла з'явилися близько шести тисяч років тому, що значно швидше, ніж людство розпочало плавку металевих руд [7]. Археологи знаходили скляні артефакти на територіях сучасного Лівану, Сирії, колишньої Месопотамії та на територіях які належали давньому Єгипту [8], це були вази, тарілки та інші елементи побуту, але у зв'язку із недостатнім розвитком технологій вони не змогли зберегтись у своєму першочерговому вигляді.

З роками вдосконалювалися методи виготовлення скла та фактично виробу з нього залишалися здебільшого декоративного характеру: прикраси, елементи побуду, посуд та вітражі в сакральних спорудах і палацах. Та у XV ст. на острові Мурано була винайдена технологія виготовлення дзеркал [9], а саме метод розкатування гарячих скляних циліндрів, що потім став основою для виготовлення перших шибок для вікон.

Револьюційним стало використання скла в споруді Кристал Пелес [10,11] у Лондоні для світової виставки 1851 року (рис.1.2.). Палац був великою садовою конструкцією із скла та сталі спроектованою Джозефом Пакстоном. Архітектор надихався теплицями, багато яких проектував раніше, та в поєднанні із вікторіанським стилем створив шедевр інженерного мистецтва [12].

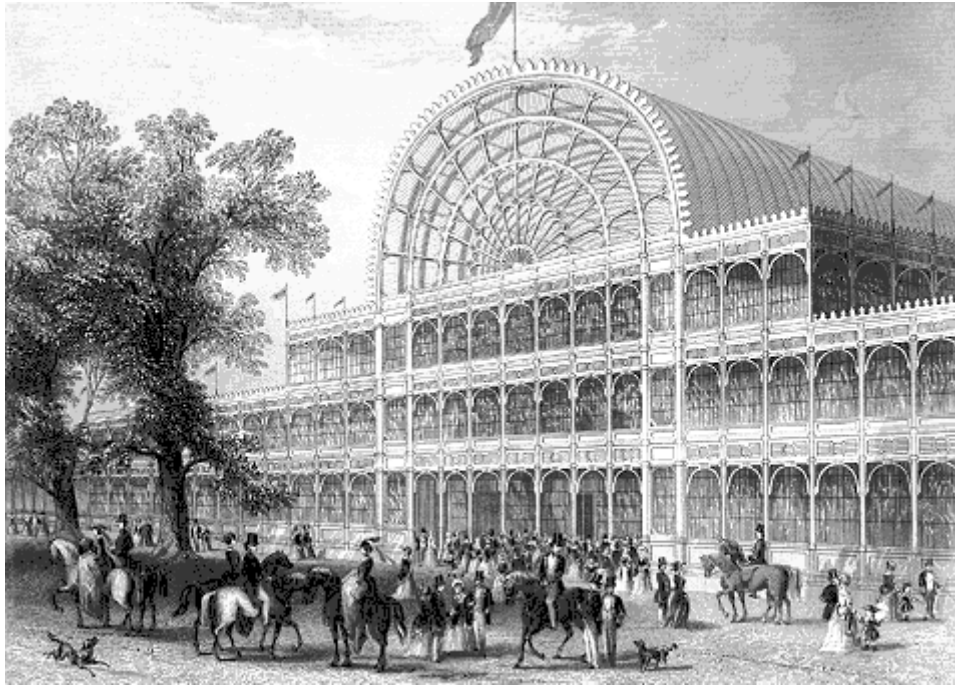


Рис.1.2. Передній фасад Кришталевого Палацу 1851р. [13].

Кришталевий Палац тим самим надихнув багато архітекторів використовувати скло у своїх проектах малих архітектурних форм. Цей факт спричинив бурхливий розвиток технологій виробництва скла і Британська королівська компанія стала першою хто застосував революційний на той час метод розкатування валиками скла [14]. Нагрітий елемент скла спочатку видували в суцільний циліндр, розрізали та поки скло було пластичним його вирівнювали за допомогою валиків. Таке виробництво дозволило широко застосовувати його в архітектурі, але через не до кінця досконалу технологію виробництва, готове скло не було достатньо гладким рис. 1.3 в порівнянні із сучасним флоат склом.

Майже одночасно із технологією розкатування скла почала зароджуватись технологія флоат. Перші спроби виконати скло таким методом були у 1843 у сера Генрі Бесемера [15,16], який активно просував ідеї автоматизованого виробництва скла. Через недостатній розвиток технологій у вікторіанський час ці ідеї не набули

подальшого розвитку. Наприкінці XIX - початку XX століття була спроба використовувати метод наближений до сучасного флоат скла. Так на підготовлену металеву поверхню виливали скляну сировину і потім полірували її з обох сторін, але такий метод був дуже дорогим та трудомістким.



Рис.1.3. Порівняння флоат скла та скла, яке виготовлене технологією розкатування [17].

Поворотним моментом в історії виробництва стала середина XX століття. Сер Аластер Піклінгтон [18–20] та Кеннет Бікерстафф, які були на чолі британської компанії «Піклінгтон Бразерс», запровадили революційний метод – виготовлення флоат скла [21–24]. Це було перше успішне застосування безперервного виробництва скла за даною технологією. Технологія полягала у використанні ванни із плавленим оловом, по якій скло стікало під дією сили тяжіння, що дало неймовірний результат – отримували скляний лист рівномірної товщини із гладкою поверхнею (рис.3.1). З того часу дана технологія заповнила ринок та дотепер найчастіше використовується для виготовлення будівельного скла.

1.2. Скло як будівельний матеріал. Дослідження фізико-механічних характеристик скла

Скло будівельне зазвичай не сильно відрізняється від звичайного за своїм хімічним складом - це все теж натрій-кальцій силікатне скло виготовлене за технологією флоат [25, 26].

В українській нормативній документації будівельне скло нормується стандартом ДСТУ [27] та має мати фізико-механічні характеристики не нижчі, ніж наведені у табл.1.1. Як зазначено у п. 6.4.5 [27] дані величини не є точними вимогами та при розрахунку необхідно враховувати додатково такі показники як міцність скла, опір різниці температур, раптову зміну температури, а також якість обробки кромки, тип скла та конструкції.

Табл.1.1

Фізико-механічні характеристики скла листового [27]

Назва	Позначення	Од. виміру	Значення
Густина (за температури 18 °С)	ρ	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	2500
Модуль Юнга (модуль пружності)	E	Па	$7 \cdot 10^{10}$
Характеристична міцність на розтяг при згині	$f_{g,k}$	МПа	45

Зважаючи на аморфні характеристики матеріалу характеристична міцність скла не є достатньо однозначною, оскільки існує вплив багатьох випадкових параметрів. Такі дослідження були проведені в Японії [28], де визначали фізико-механічні характеристики при різних атмосферних впливах, а саме дії низьких температур. Результати досліджень показали дуже великий розкид даних, що свідчило про суттєві впливи різних факторів на міцність скла. До цих факторів можна віднести впливи під час виготовлення, внутрішні дефекти скла, які неможливо виявити під час процесу виготовлення, мікро тріщини після порізки листів скла [29]. Така велика кількість випадкових впливів не дозволяє використовувати класичні інструменти статистичного аналізу для визначення міцності скла. Тому, для цього була необхідна модель, яка може враховувати випадкові фактори. Такою моделлю для визначення міцності скла стала модель параметричного розподілу Вейбулла [30–33]. Даний метод статистичного розподілу апробований дослідниками скла із НУ «Львівська політехніка», у роботах Б. Демчини, Т. Осадчука, Р. Ткача та В. Гули [34–36]. За результатами

досліджень ними була отримана характеристична міцність скла на розтяг при згині, що є близькою до значення у [27].

Одним із головних факторів, що впливає на міцність скла, є стан обробки країв. Зазвичай прорізка скла виконується за допомогою струменя води під високим тиском. Це дає можливість отримати гладкий суцільний край, але не оберігає від появи мікротріщин, які сильно впливають на міцність скла шляхом утворення концентраторів напруження в місцях утворення [37,38].

Загалом випробування скла на міцність при згині регулюється стандартами європейських [39] та американських норм [40]. Ці стандарти рекомендують застосовувати чотириточковий згин із горизонтальною орієнтацією перерізу (лежачи) зразків. Обидва стандарти фактично дублюють методику один одного, але також мають досить суттєву різницю у підходах до розмірів дослідних зразків. Так стандарту ASTM [40] рекомендує використовувати зразок розмірами – $10 \times 1 \frac{1}{2}$ in. (250×38.2 мм), а стандарт EN [39] використовує великогабаритні зразки розмірами 1100×300 мм. Як уже згадано вище стан кромки є важливим фактором дослідження зразків на міцність при згині, що у свою чергу доволі сильно обмежує використання [40], оскільки за сучасного техпроцесу отримати відшліфовані кромки є доволі складним завданням при таких розмірах зразків.

Доволі цікавими є напрацювання, які зображають різноманітні підходи до визначення міцності скла на розтяг при згині. Так у роботах Пепі [30,41,42] міцність скла визначають за допомогою витискування круглого зразка скла між двома кільцями.

Не зважаючи на доволі високу міцність на розтяг при згині, важливим питанням залишається визначення розрахункової міцності скла. У світовій практиці широко використовують для проектування скляних несучих конструкцій кілька популярних стандартів, а саме DIN 18008:2010-12 [43], TRLV:2006-08 [44] та prEN 16612 [45].

TRLV:2006-08 обмежує максимальне напруження залежно від розміщення листа скла. Для горизонтально розміщеного (характерне для плит) звичайного

флоат скла значення дозволеного напруження складає $\sigma_{allow} = 12$ МПа, а для вертикально розміщеного скла (балки, елементи фасаду) $\sigma_{allow} = 15$ МПа.

У свою чергу DIN 18008:2010-12 використовує підхід близький до дерев'яних конструкцій [46], що регулює значення міцності за допомогою коефіцієнту k_{mod} . Згідно табл.6 [43] k_{mod} становить 0.25 для постійного навантаження, 0.40 для навантаження середньої тривалості та 0.7 для коротко тривалого навантаження. Розрахункова міцність скла при цьому визначається згідно формули 1.1.

$$R_d = \frac{k_{mod} \cdot f_{g,k}}{\gamma_M}, \quad (1.1)$$

де, $\gamma_M = 1.8$ – коефіцієнт надійності за матеріалом для звичайного флоат скла згідно із [43].

Окрім того, залежно від розміщення скла відносно навантаження, як і у [44], DIN 18008:2010-12 вимагає зниження міцності скла на згин. Для вертикально розміщеного елемента, значення R_d необхідно домножити на 0.8.

У свою чергу prEN 16612 [45] – нормує саме міцнісну характеристику, а саме розрахункову міцність скла $f_{g;d}$, яка визначається за формулою 1.2.

$$f_{g;d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{sp} \cdot f_{g,k}}{\gamma_{M;A}} \quad (1.2)$$

У випадку даного дослідження для балок із постійною витримкою навантаження:

$k_{mod} = 0.89$ – коефіцієнт тривалості навантаження табл.6 [45], як для змінного навантаження тривалістю більше 30 секунд;

$k_{sp} = 1$ – коефіцієнт типу поверхні табл.5 [45], як для звичайного флоат скла;

$f_{g,k}$ – характеристичне значення міцності матеріалу на розтяг при згині п.8.1.1 [45].

$\gamma_{M;A} = 1.6$ – коефіцієнт надійності за матеріалом табл.6 [45].

На даному етапі розвитку нормативної документації із проектування скляних конструкцій визначення розрахункової міцності скла має багато різних підходів. В Україні поки немає норм та стандартів які б регулювали це питання.

1.3. Метод кореляції цифрових зображення для дослідження будівельних конструкцій

Метод кореляції цифрових зображень (далі КЦЗ) [47–50] є оптичним методом дослідження, який використовує методику реєстрації двовимірних змін поверхонь у пікселях зображення. На відміну від використання класичних механічних методів вимірювання деформацій, метод КЦЗ дозволяє отримати інформацію про деформування поверхонь протягом усього експерименту, аж до руйнування зразка. Чудовим напрацюванням із детальним аналізом розвитку, сучасного використання та подальших перспектив наведені у роботі проф. Бліхарського Я.З. [51] на основі використання КЦЗ для дослідження залізобетонних конструкцій. У роботі [52] дослідники також виконали порівняльний аналіз великої кількості досліджень пов'язаних із КЦЗ. Зібрані ними дані дозволяють проаналізувати, яке саме обладнання було використано для методу кореляції цифрових зображень та описано різноманітні типи конструкцій, що використовувались для досліджень.

Історично даний метод бере свій початок із 80-х років минулого століття та появою цифрових фотокамер, що дозволяли записувати інформацію на світлочутливих матрицях і з появою методу кросс-кореляції [53–55]. Кросс-кореляція – це метод вимірювання подібності двох серій функцій, які мають зміщення одна відносно одної. У загальному випадку КЦЗ можна поділити на два підвиди: моно (2D) та стерео (3D) [56,57] кореляцію. У загальному випадку кореляція – це пошук взаємозалежності між двома випадковими величинами. Тобто у випадку КЦЗ – це взаємозв'язок між деформацією групи пікселів та деформацією досліджуваного зразку (рис.1.4).

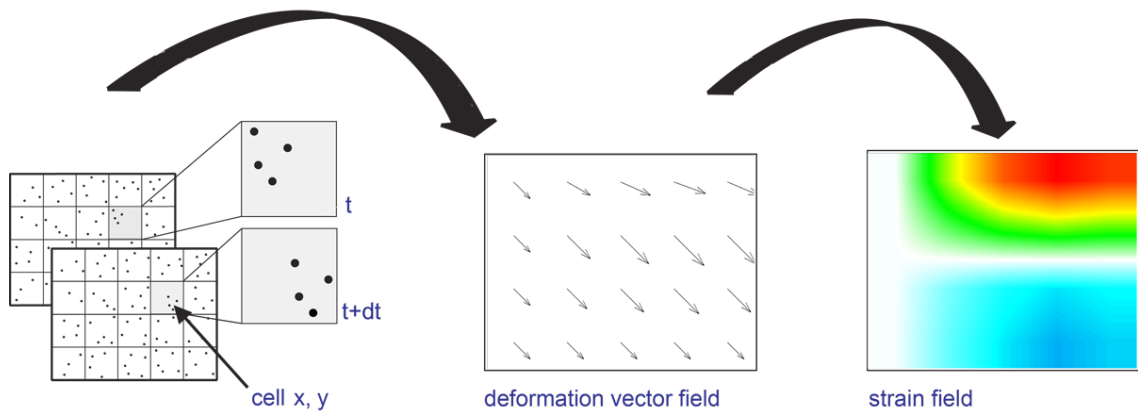


Рис.1.4. Принцип який закладений у метод кореляції цифрових зображень [58].

Значення отримані за допомогою кросс-кореляції визначаються як зсув двох подібних двовимірних функцій [59]:

$$r = \frac{\sum_{x=-l}^l \sum_{y=-k}^k [(f(x, y) - \bar{f})(g(x, y) - \bar{g})]}{\sqrt{[\sum_{x=-l}^l \sum_{y=-k}^k (f(x, y) - \bar{f})^2][\sum_{x=-l}^l \sum_{y=-k}^k (g(x, y) - \bar{g})^2]}} \quad (1.3)$$

де, r – коефіцієнт кореляції;

$f(x, y), g(x, y)$ – дискретні двовимірні функції які описують;

\bar{f}, \bar{g} – середнє значення функцій $f(x, y), g(x, y)$.

Кореляція цифрових зображень зарекомендувала себе як максимально універсальний інструмент для досліджень. Даний метод використовують для аналізу поведінки взуття під час бігу [60]. Так компанія Adidas за допомогою швидкісних камер ARAMIS провела дослідження своїх виробів (рис.1.5).



Рис.1.5. Дослідження поведінки взуття під час бігового навантаження за допомогою КЦЗ [60].

Один із основних напрямів застосування кореляції цифрових зображень – це галузь матеріалознавства та прикладної механіки [61–63]. Доволі цікавими є напрацювання [64,65] в яких дослідники використовували кореляцію цифрових зображень, де вони одночасно співставляли їх із симуляцією роботи конструкції за допомогою методу скінчених елементів.

Кореляція цифрових зображень частот використовується для аналізу окремих елементів будівельних конструкцій. Наприклад, для аналізу роботи дерев'яних конструкцій [66,67]. У роботі [68], дослідники за допомогою КЦЗ досліджували дерев'яні з'єднання із вуглепластиком.

КЦЗ добре показав себе в дослідженні залізобетонних конструкцій [69–72]. У дослідженнях [73] кореляція цифрових зображень показала чудовий результат у виявленні та аналізі тріщин у попередньо напружених мостових плитах.

Найширшого застосування КЦЗ отримало у дослідженнях металевих конструкцій [74–76]. В усіх випадках даний метод показав себе як достойний інструмент аналізу деформацій. Варто звернути також увагу на дослідження втоми конструкцій за допомогою методу КЦЗ [77] та дослідження металевих з'єднань [78–80].

Отже, метод кореляції цифрових зображень добре себе зарекомендував для різноманітних типів досліджень. Не зважаючи на популярність КЦЗ, одним із найбільших його недоліків є складність в підготовці та забезпеченні необхідних умов його використання. Згідно із [81] для досягнення якісних результатів необхідно виконати наступні умови для моно КЦЗ:

1. Наявність пристрою зчитування, який дозволить збирати та записувати інформацію.

У вище згаданих дослідженнях можна помітити факт використання у даних дослідження спеціалізованих фото- та відеокамер. Рекомендації щодо апаратного забезпечення наведені у п.2.2.1 [81]: рекомендовано використовувати бездзеркальні монохромні матриці із квадратною сіткою пікселів.

Провівши аналіз ринку спеціалізованих камер, можна побачити що виробники використовують у спеціалізованих камерах для кореляції цифрових

зображень кольорові матриці типу CMOS (рис.1.7). Такі матриці можна побачити в камерах від LaVision [82] та Flir Grasshopper [83]. У більшості, розміри матриць для спеціалізованих камер не мають великих розмірів, зазвичай не більше 16 мегапікселів. Такий розмір матриці є виправданим, оскільки це універсальний інструмент для КЦЗ і виробником передбачено дослідження із необхідністю застосування високошвидкісної серійної зйомки, використовуючи при цьому усю матрицю. Великі матриці не дозволяють це робити, оскільки процесор фотокамери не може обробити багато кадрів такого розміру дуже швидко.

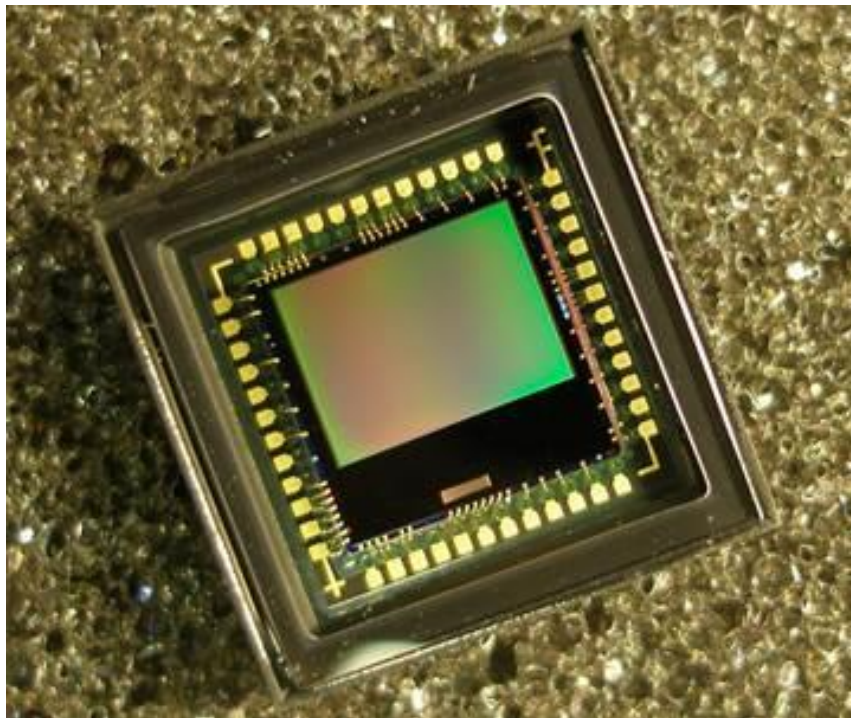


Рис.1.7. Вигляд фото сенсора типу CMOS [82].

Оцінку точності камер із різними типами сенсорів виконав А. Балді [84]. У своїй роботі вчений порівнював CCD сенсори із 3CCD та MFA сенсорами для кореляції цифрових зображень. Два останні використовуються сьогодні в користувацьких камерах. Варто зазначити, що сенсор типу CMOS є аналогічним до 3CCD. Балді використовував в своєму дослідженні цифрову користувацьку камеру із 12.1 мега піксельним CMOS сенсором та розміром пікселя 8.45 μm . За результатами отриманих досліджень, дослідник дійшов висновку, що неопрацьовані після експерименту кольорові зображення будуть давати поганий результат. Похибка складатиме близько 0.025 від розміру пікселя. Балді дійшов до висновку, що не рекомендує використовувати кольорові сенсори для КЦЗ без

післяобробки зображення. Також, важливим у висновку є те, що використання більших за розмірами кольорових сенсорів може надати перевагу дослідникам. Тобто, можна зробити висновок, що із зменшенням розміру пікселя буде зменшуватись і величина похибки.

Це підтверджують наступні дослідження [85–91]. Дослідники використовували користувацькі камери із кольоровими CMOS сенсорами для кореляції цифрових зображень. В окремих випадках, вони використовували повністю кольорове зображення для аналізу результатів експерименту. Використання таких камер показало достатню збіжність із результатами досліджень отриманих за допомогою інших приладів і це дало можливість використовувати такі камери в експериментах.

1. Наявність попередньо підготовленої спекл поверхні на предметі дослідження та достатня освітленість предмету дослідження.

Дана умова є доволі легкою для виконання оскільки питання освітленості вирішується за допомогою додаткового постійного джерела світла. Створення спекл поверхні доволі простий процес, основна мета якого наситити досліджувану ділянку предмету дослідження максимальною можливою кількістю різноманітних відтінків сірого. Загалом є кілька способів створення такої поверхні. Наприклад, у роботі [92] створення спекл поверхні виконується за допомогою перенесення спеціально виконаного рисунку на дослідний зразок методом просочування. У роботах [93,94] дослідники використовували метод напилення фарби на поверхню.



Рис.1.8. Спекл поверхня нанесена методом розпилювання фарби [95].

2. Забезпечення плоскої двовимірної площини при дослідженні.

Площина забезпечується використанням оптики із фокусною віддаллю величиною в еквіваленті 50 мм. Саме ця фокусна віддаль дозволяє перенести плоске зображення досліджуваного предмета на матрицю зчитувального пристрою.

Кореляцію цифрових зображень із використанням користувацьких камер використовували для дослідження скляних конструкцій в лабораторіях НУ «Львівська політехніка». Було досліджено колони [2,3,94–96] та плити [93,97–99]. У роботі [93] дослідник Т. Осадчук використав перехідні коефіцієнти для того, щоб зв'язати результати дослідження отримані за допомогою КЦЗ та механічних приладів, що дало добрий результат. У дослідженнях скляних колон Р. Ткача [94], не рекомендовано використовувати двовимірну кореляцію зображень. Оскільки скляна колона відразу із початком експерименту деформувалася у двох площиннах. У роботі В. Гули [99], використовувалась користувацька камера із CMOS сенсором для визначення відносних деформацій. Результати дослідження показали повну збіжність результатів заміру деформацій механічними приладами з результатами отриманими за допомогою КЦЗ.

Кореляція цифрових зображень – це метод оптичного спостереження, що отримав широке застосування у багатьох галузях. Найкраще себе даний метод показав у роботі із монохромними фото-сенсорами типу CCD, що забезпечувало найвищу точність вимірювання. Не дивлячись на це, виробник як спеціалізованого, так і користувацького обладнання часто використовує кольорові сенсори типу CMOS. Проаналізовані дослідження підтверджують коректність використання користувацьких камер із кольоровими сенсорами типу CMOS, як пристрою зчитування для кореляції цифрових зображень.

1.4. Дослідження та використання скляних балок

У відповідності до технології виготовлення та доволі великої міцності скла на стиск та розтяг, скло можна найчастіше зустріти у конструкціях, які працюють на згин. Сучасні технології дозволяють все більше застосовувати скло для великопролітних конструкцій під великі змінні навантаження.

Прикладами елементів невеликих прольотів зазвичай є малі архітектурні форми, такі як теплиці, навіси, накриття, мезоніни тощо. Дані елементи використовують із естетичної точки зору для створення специфічного інтер'єру та атмосфери. Прикладом такого використання скла є накриття внутрішнього дворику у ресторані «Королівська пивоварня» у Львові (рис. 1.9). Тут використана система скляних плоских балок виготовлених із триплексу та прольотами до чотирьох метрів. Зверху по балках змонтовані двошарові скляні плити.



Рис.1.9. Накриття внутрішнього дворику ресторану «Королівська пивоварня» у Львові (фото. Eugen Mironyuk).

Скляні конструкції та елементи стали невід'ємною частиною концепції торгових майданчиків компанії Apple [100–102]. Усім відомим є скляний куб який є входом в Apple Store у Нью Йорку. Та не менш цікавим є їхній магазин у Гамбурзі [103] (рис.1.10). Основний елемент у інтер'єрі – сходи виконані із багат шарового скла. Сходи застосовано прольотом 12 метрів, вага кожної панелі склала 4 тони.



Рис.1.10. Сходи у магазині компанії Apple у Гамбурзі [103].

Ще одним із прикладів великопрольотної конструкції став міст в музеї BMW, що у м. Мюнхен [104,105]. Цей скляний міст (рис.1.11) складається із двох багат шарових плоских балок висотою 1.5 м та прольотом більше 25 м.

Та мало не найвідомішою скляною конструкцією став уже реалізований проект «СкайПул» [106], Лондон. «СкайПул» - це перший у світі прозорий підвісний басейн, розташований між двома будинками на висоті десятого поверху. Проліт цього басейну складає 12 метрів. Конструкції «СкайПул» першочергово повинні були бути виконані із скла та після детального аналізу енергоефективності та несучої здатності було прийнято рішення замінити бокові стінки басейну на РММА (поліметилметакрилат), відомим також як акрил (рис.1.12).

Тенденція використовувати скло для немасових конструкцій в архітектурі продовжується і набирає все більше обертів завдяки технологічному процесу, який дозволяє виготовляти такі конструкції, що підтверджує актуальність даних досліджень.



Рис.1.11. Скляний міст в музеї BMW [107].



Рис.1.12. Кострукції басейну «СкайПул» на етапі монтажу [106].

Тенденція використовувати скло для немасових конструкцій в архітектурі продовжується і набирає все більше обертів завдяки технологічному процесу, який дозволяє виготовляти такі конструкції, що підтверджує актуальність даних досліджень.

Дослідження скляних балок не є новинкою, вони беруть свій початок із зародження концепції скла, як конструктивного матеріалу. У стінах Національного університету «Львівська політехніка» такими дослідженнями почали займатись у 2012 році під керівництвом проф. Б. Демчини [108,109]. Дослідники працювали над дослідженням балок із горизонтальними та вертикальним розташуванням шарів товстого скла $t=19$ мм (рис.1.13), з відношенням між шириною та висотою балки близьким до 1:1 - 1:2. Балки досліджувались на чотириточковий згин

В основному дослідження [108,109] розкривають вплив кількості шарів плівки, що використовувалась як з'єднувальний матеріал, на несучу здатність. Результати вказують на те, що кількість шарів плівки несуттєво впливає на величину несучої здатності балки. Руйнування відбувалось із розкриттям тріщини у нижній зоні яка поширювалась вгору. Балки руйнувались у зоні між роликками прикладання навантаження, тобто в зоні чистого згину. Таку форму руйнування автори назвали «тюльпаноподібною».



Рис.1.13. Характер руйнування скляних балок у дослідженнях [106].

Окрім скляних балок в лабораторіях Львівської політехніки досліджували скляні колони [2,3,94–96] та плити [93,97–99]. У результаті дослідження скляних плит Т. Осадчуком та В. Гулою було розроблено методику розрахунку скляних плит та досліджено механіку їх руйнування. Методика розрахунку плит базувалася на застосуванні еквівалентної товщини елемента, що була меншою за фізичні розміри багатошарової плити.

Дослідження скляних колон [94] виконувались із урахуванням різного закріплення: жорсткого та шарнірного на кінцях колон. Колони були досліджені на центральний стиск. Результатом даного дослідження стали рекомендації з проектування скляних колон та розробка методики розрахунку скляних колон на центральний стиск.

У дослідженнях скляних балок, які працюють на згин, із вертикальним розміщенням шарів, дослідники стикаються із боковою втратою стійкості поперечного перерізу [110–119].

У дослідженнях [119], подано результати дослідження втрати стійкості скляних балок із урахуванням практичного розкріплення балок іншими скляними елементами, такими як фасади, плити тощо (рис.1.14). Балки прольотом 3.1 метри із одно- та двошарового скла висотою 300 мм навантажувалась зосередженою силою по середині перерізу. У нижній зоні балки мали додаткове розкріплення із площини, яке розташовувалось із кроком 500 мм. Результати показали близькі значення величини критичної сили до значення отриманого розрахунками та моделюванням скінченими елементами. Дослідники також пропонують при проектуванні враховувати недосконалості трьох типів: 1) від можливого внутрішнього повороту, величиною $\frac{h}{300}$; 2) відхилення від центрально осі – 5 мм; 3) недосконалості під час виготовлення – 1 мм. Сумарно ці значення створюють складний напружено-деформований стан, при якому балки працюють на згин відносно двох площин. Це значно ускладнює розрахунок та моделювання, тому дослідники рекомендують користуватись кривими втрати стійкості для проектування балок.

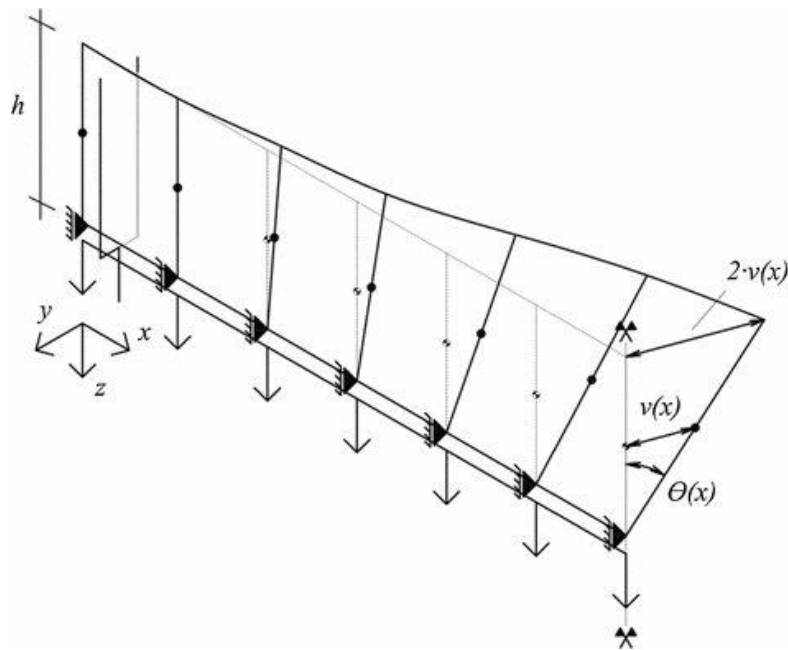


Рис.1.14. Форма втрати стійкості скляних балок із безпервною боковою опорою у дослідженні [119]

Науковці університету Цінхуа [120] проводили дослідження скляних балок на предмет втрати стійкості із великою кількістю різних шарів, від одного до шести. В дослідженнях експериментальні значення порівнювались із значеннями отриманими методом скінчених елементів. У більшості випадків результат отриманий за МСЕ та експериментальні значення були рівними і деякі зразки мали випадковий характер руйнування та форма втрати стійкості збігалась із стандартними формами для балок із однією зосередженою силою.

У роботі [121] досліджували балки на чотириточковий згин, які додатково посилювали попередньо напруженими карбоновими плівками у нижній зоні. Дослідний стенд мав додаткові розкріплення які зменшували розрахункову довжину балки. За характером руйнування балки, були ідентичні до балок у [108,109]. Тобто руйнування розпочиналось із нижньої тріщини яка мала поширення до верху балки. Згідно із результатами дослідження авторами встановлено, що для балки висотою 125 мм із трьома шарами скла, два шари карбонової плівки фактично збільшили несучу здатність вдвічі.

Чимало робіт проведено із дослідження вогнестійкості конструкцій скляних балок [122–124]. У роботі [125] дослідники Дрезденського університету провели дослідження вогнестійкості скляних балок під дією навантаження (рис.1.15). Було

випробувано різні типи скляних балок із різних матеріалів. Це дослідження дало змогу ближче познайомитися з вогнестійкістю скляних балок і запропонувало подальші дослідження для підвищення їх несучої здатності в разі пожежі. За результатами дослідження було встановлено, що триплексовані балки із звичайного скла були доволі не стійкими до пожежі та не були придатні до експлуатації через 25 хвилин після початку пожежі. Від дії високої температури з'єднувальна полімерна плівка втрачала свої властивості, два шари балки починали працювати як окремі елементи, які від дії температури досягали граничних прогинів.



Рис.1.15. Дослідження скляних балок при пожежі [125].

Найбільше досліджень в напрямку скляних конструкцій, що і лягли в сучасний посібник [25] по проектуванню скляних конструкцій провів доктор Ахенського Університету Маркус Фельдман. Згідно із його працями [126,127], зараз ведеться активна робота щодо стандартизації будівельних норм із проектування та узагальнення їх в один європейський стандарт під назвою «EUROCODE 10 Проектування скляних конструкцій». У його доробку є також напрацювання із уже гібридних конструкцій, а саме склосталевих балок [128,129].

У [25] є розділ присвячений розподілу напружень у скляних згинаних елементах без урахування дії повздовжніх деформацій та подано результати аналізу впливу зміщення шарів в скляних балках. Задача розрахунку впливу втрати стійкості тонких балок полягає у врахуванні додаткового зусилля, яке виникає при дії бокового вигину та урахуванні можливого зсуву шарів скла один відносно одного. Для визначення параметрів бокового вигину використовують нелінійні рівняння [25,130] із врахуванням впливів другого порядку, тобто недосконалостей у вигляді вигину v_0 та кута повороту φ_0 . Значення бокового відхилення $u(x)^{Th.II}$ за

боковою формою втрати стійкості визначалось за рівнянням 1.4 [130]. Значення кута повороту $\varphi(x)^{Th.II}$ визначалось згідно із рівнянням 1.4[130]. Значення початкових недосконалостей при цьому рекомендовано приймати наступними [130].

$$u(x)^{Th.II} = \frac{\frac{GI_t}{EI_z} M_{Ed} \varphi_0 + \frac{M_{Ed}^2}{EI_z} v_0}{GI_t \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 - \frac{M_{Ed}^2}{EI_z}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{l} x\right) \quad (1.4)$$

$$\varphi(x)^{Th.II} = \frac{\frac{M_{Ed}^2}{EI_z} \varphi_0 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 M_{Ed} v_0}{GI_t \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 - \frac{M_{Ed}^2}{EI_z}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{l} x\right) \quad (1.5)$$

$$v_0 = \frac{l}{400}; \quad (1.6)$$

$$\varphi_0 = 0.005 \text{ rad.}$$

Дослідники використовуючи можливі недосконалості та різні варіанти зміщення і повороту шару скла виконали теоретичні розрахунки та виконали експериментальні дослідження. Балки були дослідженні на рівномірно розподілене навантаження та зосереджене навантаження по середині прольоту балки. Додаткових елементів розкріплення із площини застосовано не було. Результати показали, що зсув між шарами триплексованого скла має чималий вплив на несучу здатність балки. При зсуві одного із шарів скла в двох та трьох-шаровій балці значення критичного моменту відрізнялось на 20%. Вчені порівняли результати отримані в ході дослідження та теоретичні результати із використанням кривих втрати стійкості. Використання кривих втрати стійкості в проектуванні скляних конструкцій дало достатній запас по несучій здатності. Система нелінійних рівнянь та методика запропонована у [130] дозволяє точніше оцінити роботу балок із недосконалостями.

Основними методами розрахунку балок на згин залишаються класичні усталені методи відомі інженерам, як із дерев'яних [131], так і сталевих конструкцій [132], без урахування пластичності матеріалів та із доволі значними

коефіцієнтами надійності, які окремо регулюються національними нормами та стандартами.

Розрахунок впливу втрати стійкості скляної балки суцільного перерізу виконується згідно із стандартними кривими [133] і визначається за рівнянням 1.7. Основна форма втрати стійкості подана на рис.1.16.

$$\frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{El}} \leq 1, \quad (1.7)$$

де, χ_{LT} – знижувальний коефіцієнт втрати стійкості за втратою плоскої форми згину, який визначається відповідно до параметрів перерізу

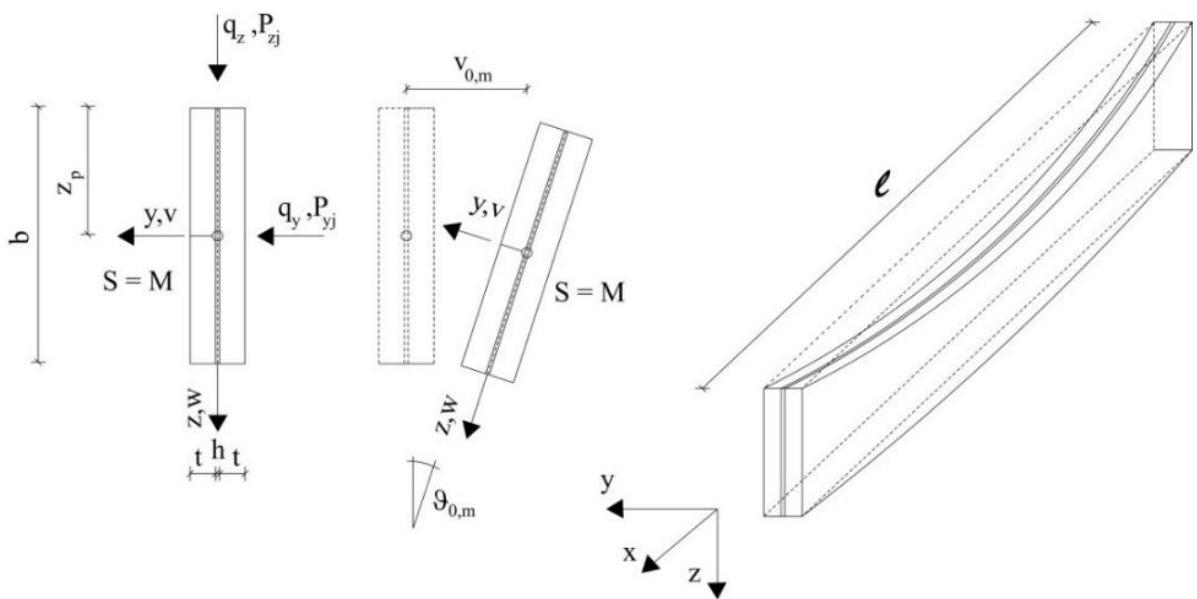


Рис.1.16. Основна форма втрати стійкості скляної балки суцільного перерізу [25].

Знижувальний коефіцієнт втрати стійкості χ_{LT} залежить від обраних кривих втрати стійкості, що виражається через коефіцієнти α_{LT} та α_0 .

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (1.8)$$

$$\phi_{LT} = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \alpha_0) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (1.9)$$

де, $\bar{\lambda}_{LT}$ – приведені значення умовної гнучкості, яке залежить від критичного моменту перерізу, відносно площини втрати стійкості п.6.1 [134].

α_{LT} – коефіцієнт недосконалості для кривої втрати стійкості скляних балок при згині.

α_0 – обмежувальний коефіцієнт недосконалості для кривої втрати стійкості скляних балок при згині.

Значення даних коефіцієнтів, як і значення коефіцієнтів надійності за матеріалом, відрізняється від прийнятого дослідниками стандарту. Вище згадані роботи [130] та [119], використовують криві втрати стійкості для металевих конструкцій ($\alpha_{LT} = 0.12$ та $\alpha_0 = 0.3$). У [135] рекомендовано використовувати значення $\alpha_{LT} = 0.26$ та $\alpha_0 = 0.2$.

Важливим фактором, який прямо впливає на безпеку скляних конструкцій є їх випадкове руйнування при дії випадкових впливів. Оцінку такого явища як випадкові, або спонтанні, утворення тріщин в склі проведені у дослідженнях Каспера [136–138], дослідники зауважують, що не зважаючи на контроль процесу випадково руйнування у нормативних документах, дане питання все ще залишається доволі дискусійним та вплив на нього мають багато різноманітних факторів, такі як температура виготовлення скла, хімічний склад, якість обробки кромки.

Отже, використання саме плоских скляних елементів, які працюють на згин є одним із найбільш розповсюджених способів використання скла як несучої конструкції. Незважаючи на те, що дослідження скляних плоских балок не є новинкою, продовження роботи щодо їх дослідження є актуальним. Випадкові фактори, які впливають на руйнування - великі, в порівнянні із іншими матеріалами, коефіцієнти надійності залишають відкритими чимало питань.

1.5. Висновки до розділу 1

1. Існуючі методи дослідження міцності скляних зразків на згин є гнучкими та підлаштовуються для дослідження різних за геометричними параметрами зразків, тобто одного універсального методу визначення немає. Вище згадані дослідження та методи мають ряд недоліків пов'язані із розмірами дослідних зразків, так і технічним оснащенням. Загалом практикується використання чотири-

та триточкового згину для визначення міцності скла на згин. Враховуючи вплив випадкових факторів, які впливають на значення міцності скла, для статистичного аналізу рекомендовано використовувати модель Вейбулла. Розподіл Вейбулла дає можливість врахувати вплив випадкових факторів.

2. Кореляція цифрових зображень від початку свого існування стала хорошим інструментом для дослідників різних галузей. Даний метод оптичного дослідження дозволяє тривалий час спостерігати за досліджуванним елементом без прямого контакту з ним. Разом із розвитком цифрових технологій, що використовуються в користувацькому та спеціалізованому фото обладнанні розвивається і даний метод. Використання користувацьких камер для КЦЗ є цілком виправданим для дослідження деформівних характеристик скляних конструкцій.

3. Використання скляних елементів, які працюють на згин є одним із найбільш розповсюджених способів використання скла в будівництві. Незважаючи на те, що дослідження скляних плоских балок не є новинкою, продовження роботи щодо їх дослідження є актуальним. Оскільки залишається чимало невирішених завдань, до яких дослідники різних країн застосовують різні підходи. Випадкові фактори, які впливають на руйнування - великі, в порівнянні із іншими матеріалами, коефіцієнти надійності залишають відкритими чимало питань. Дослідження пов'язані з втратою стійкості згинаних балок потребують подальшого розвитку в зв'язку з відсутністю достатньої їх кількості для створення єдиної методики врахування такої роботи, що пов'язане з можливістю раптового непередбачуваного руйнування скляних балок.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. МАТЕРІАЛИ ТА КОНСТРУКЦІЯ ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ

2.1. Обсяг експериментальних досліджень

Для вирішення поставлених задач та досягнення мети були проведені дослідження скляних балок на чотириточковий згин при дії короткочасного статичного навантаження. Для визначення фізико-механічних характеристик скла були проведені відповідні дослідження.

Для опису та подання результатів досліджень у роботі було введено поняття орієнтації осей дослідних зразків, згідно із [25] (рис.2.1):

Вертикальна вісь, орієнтація якої для зразка визначає максимальний момент інерції – відповідно вісь “z” (рис. 2.1).

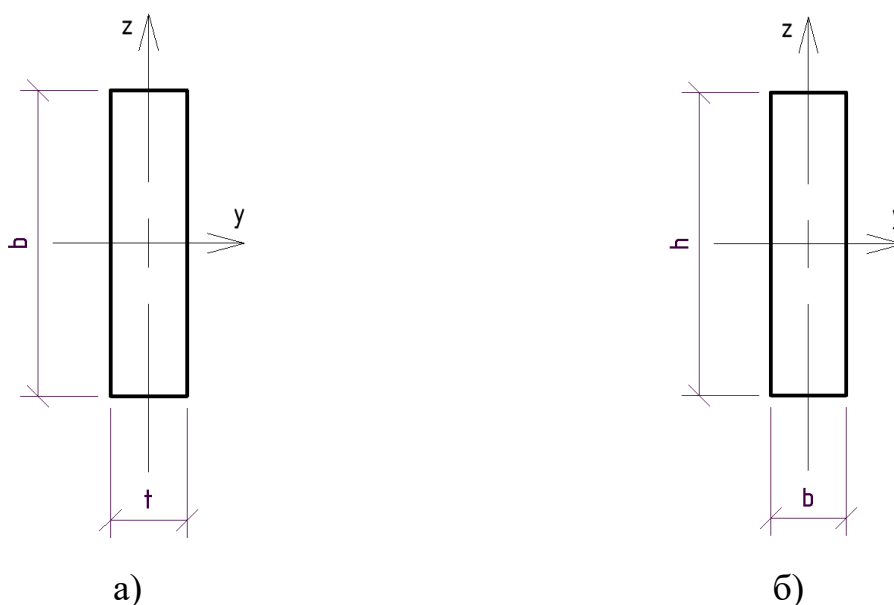


Рис.2.1. Орієнтація осей: а) зразків скла для визначення фізико-механічних характеристик; б) зразків скляних балок.

2.1.1. Зразки для визначення фізико-механічних характеристик скла на згин

Визначення фізико-механічних характеристик скла виконувалось за дослідженням зразків на триточковий згин. Для досліджень було виконано дві серії дослідних зразків (рис.2.2). Зразки були виготовлені в заводських умовах підприємством ТзОВ «Склоресурс» (Україна) відповідно до вимог норм [27,139].

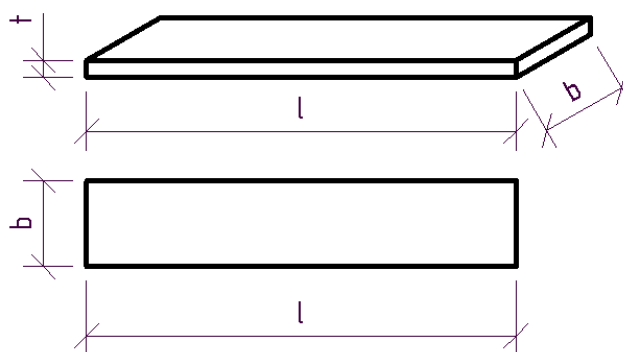


Рис.2.2. Геометричні розміри дослідних зразків скла для визначення фізико-механічних характеристик скла на згин.

Геометричні розміри зразків такі як, ширина b , довжина l та товщина t подані у табл.2.1 та вимірювались відповідно до п. 7.1 [39], як для стандартної методики визначення міцності матеріалу на чотириточковий згин, яку було використано для триточкового згину. Параметри визначались як середнє арифметичне трьох окремих вимірювань. Точність вимірювань становила до 0.05 мм.

Дослідні зразки двох серій були виготовленні із звичайного листового флоат скла та були витримані в нормальних умовах, більш ніж 24 години перед випробуванням міцності на згин.

Табл. 2.1

Характеристики дослідних зразків для визначення фізико-механічних характеристик скла на згин

Серія	Марка	Довжина l	Ширина b	Товщина t	Маса, m
		[мм]	[мм]	[мм]	[г]
1	SH-1	249.75	50.05	9.85	305.05
	SH-2	249.85	50.25	9.85	310.05
	SH-3	249.75	50.25	9.85	310.05
	SH-4	249.95	50.25	9.85	310.05
	SH-5	249.85	50.75	9.85	310.05
	SH-6	249.95	50.95	9.85	310.05
	SH-7	250.50	50.25	9.85	310.05
	SH-8	253.00	50.75	9.85	310.05
2	SV-1	249.95	50.35	9.85	310.05
	SV-2	249.65	51.25	9.85	310.05

	SV-3	250.75	50.25	9.85	310.05
	SV-4	249.35	50.05	9.85	305.05
	SV-5	249.35	49.95	9.85	305.05
	SV-6	250.05	50.35	9.85	310.05
	SV-7	250.15	50.05	9.85	305.05
	SV-8	251.15	50.25	9.85	310.05

Усі зразки отримали маркування у відповідності до типу дослідження. Маркування складалось із латинських літер та цифр, відповідно:

- SH – *Sample Horizontal* – зразок, який був досліджений із горизонтальною орієнтацією осі z, відносно осі прикладання навантаження.
- SV – *Sample Vertical* – зразок, який був досліджений із вертикальною орієнтацією осі z, відносно осі прикладання навантаження.

2.1.2. Дослідні зразки скляних балок для дослідження на чотириточковий згин

Для проведення досліджень на згин було запроєктовано та виготовлено зразки скляних балок. Компанією «Склоресурс» було виготовлено 22 балки, та від польського виробника отримано дві балки для контрольного дослідження, що загалом склало 24 балки. Загальний вигляд зразків балок подано на рис.2.3.

Усі зразки були виготовлені із флоат скла згідно із [27,139]. Одношарові зразки виконувались методом порізки скла із первинною обробкою торців. Дво- та тришарові балки були виготовлені за технологією триплексування. Кожен шар скла був з'єднаний між собою за допомогою полімерної плівки товщиною 0.38 мм (EVASAFE Bridgestone [140]). Зразки з шарів скла перекладеного полімерною плівкою поміщалися до термокамери де при дії високої температури та вакууму шари склеювалися між собою та утворювали балки.

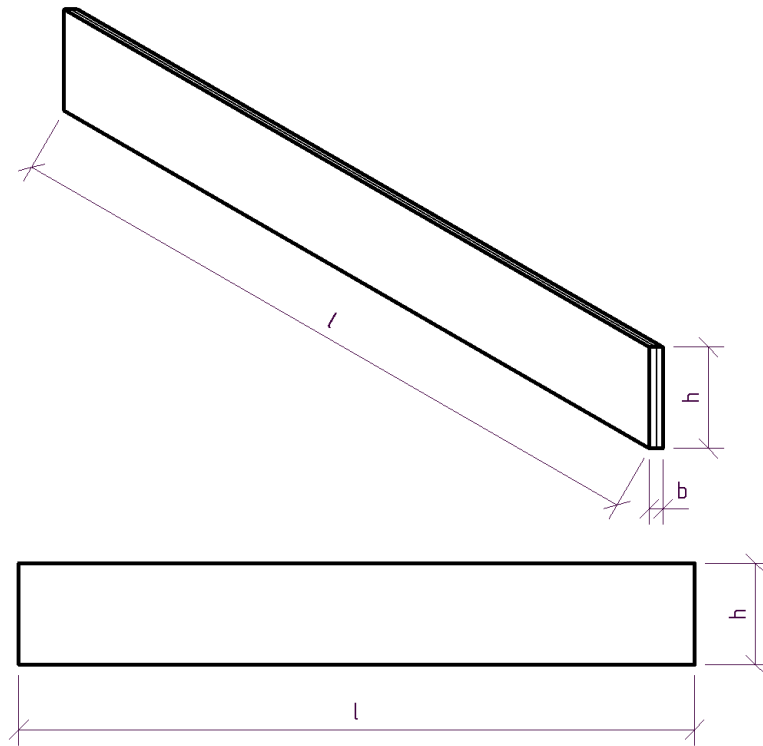


Рис.2.3. Геометрична схема балок.

Зразки балок отримали марки у відповідності із висотою, кількістю шарів скла та порядковим номером. Кодування марок балок мало наступний вигляд:

$Vm-X.Y.Z$,

де, Vm – (*Beam*) балка;

X – значення серії та висоти:

1- Серія 1;100 мм;

2- Серія 2;150 мм;

3- Серія 3;200 мм;

Y – кількість шарів:

1- 1 шар;

2- 2 шари;

3- 3 шари;

Z – порядковий номер.

Дослідні зразки балок були поділені на три серії відповідно до програми досліджень та наведені в табл.2.2. Геометричні параметри, такі як, висота h , та ширина b вимірювались відповідно до п. 7.1 [39], як для стандартної методики

визначення міцності на чотириточковий згин. Параметри визначались як середнє арифметичне трьох окремих вимірювань. Точність вимірювань становила до 0.05 мм.

Табл. 2.2

Геометричні характеристики балок

Серія	№	Марка	Довжина l	Висота h	Ширина b	Ілюстрація (поперечний переріз)
			[мм]	[мм]	[мм]	
1	1	Вм-1.1.1	1001.00	100.95	9.97	
	2	Вм-1.1.2	1001.00	100.98	9.92	
	3	Вм-1.1.3	1001.50	100.37	10.21	
	4	Вм-1.1.4	1000.50	100.24	10.17	
	5	Вм-1.1.5	1000.00	100.00	10.00	
	6	Вм-1.1.6	1000.00	100.00	10.00	
	7	Вм-1.2.1	1000.50	99.75	20.00	
	8	Вм-1.2.2	1000.25	100.25	20.00	
	9	Вм-1.2.3	1001.00	100.53	20.72	

	10	Bm-1.2.4	1001.00	100.11	20.85	<p>2 σάρυ 1xEVASAFE ≈ 100 ≈ 20</p>
	11	Bm-1.3.1	1000.00	100.34	30.98	<p>3 σάρυ 2xEVASAFE ≈ 100 ≈ 30</p>
	12	Bm-1.3.2	1000.00	100.92	30.91	
2	13	Bm-2.1.1	1001.00	150.72	10.22	<p>1 σάρυ ≈ 150 ≈ 10</p>
	14	Bm-2.1.2	1000.00	150.93	10.12	
	15	Bm-2.2.1	1000.00	150.02	20.80	<p>2 σάρυ 1xEVASAFE ≈ 150 ≈ 20</p>
	16	Bm-2.2.2	1001.00	150.00	20.16	

	17	Bm-2.3.1	1001.00	150.35	30.92	
	18	Bm-2.3.2	1001.50	150.56	31.08	
3	19	Bm-3.1.1	1000.00	199.50	10.12	
	20	Bm-3.1.2	1001.00	200.00	10.08	
	21	Bm-3.2.1	1000.75	200.00	20.70	
	22	Bm-3.2.2	1000.75	200.00	20.78	
	23	Bm-3.3.1	1000.00	200.25	31.40	
	24	Bm-3.3.2	1001.00	197.75	31.56	

2.2. Методика випробування міцності скла на розтяг при згині

В основу методики було покладено визначення міцності скляних дослідних зразків при триточковому згині. Дослідження були виконанні за методикою описаною в [1] та відповідно до методики використаної у п. 2.2.3 [94], [35], та п.2.2.3.1 [93]. За основу побудови методики дослідження були прийняті європейський [39] та американський [40] стандарти досліджень.

Зразки усіх серій були дослідженні на триточковий згин із зосередженим навантаженням прикладеним посередині зразка (рис.2.3). Згідно із вимогами п.6.3 [39] зразки були плоскими і обидва напруженні краї були однаково орієнтовані. Згідно із п.7.2 [39], між зразками та роликами були встановлені гумові смужки товщиною 3 мм і твердістю IRHD (ISO 48-2:2018).

Кліматичні умови у лабораторії відповідали п.3.1.4 [40]. Температура повітря була близька до 20 °С, а відносна вологість становила 40%...70%.

Визначалося руйнівне навантаження N в момент руйнування зразка. Руйнівне навантаження фіксувалось автоматично за допомогою дослідного устаткування та існуючого до нього програмного забезпечення. Для випробування був використаний прес Lab Test 6.100.1.20 із серійним номером ZA/2019/4. Прес мав сертифікати 7051-KL-H0159-19 з системою тестування [35,94].

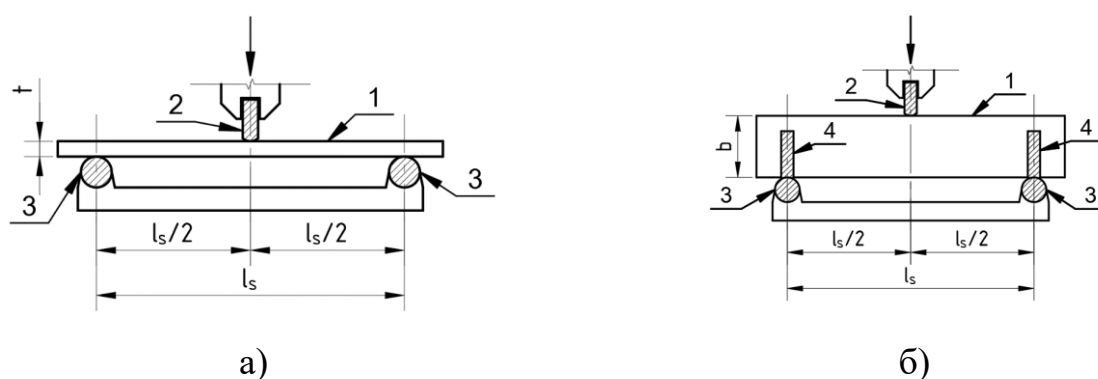
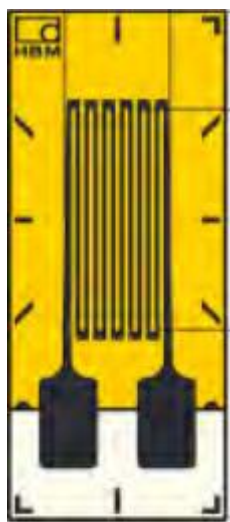


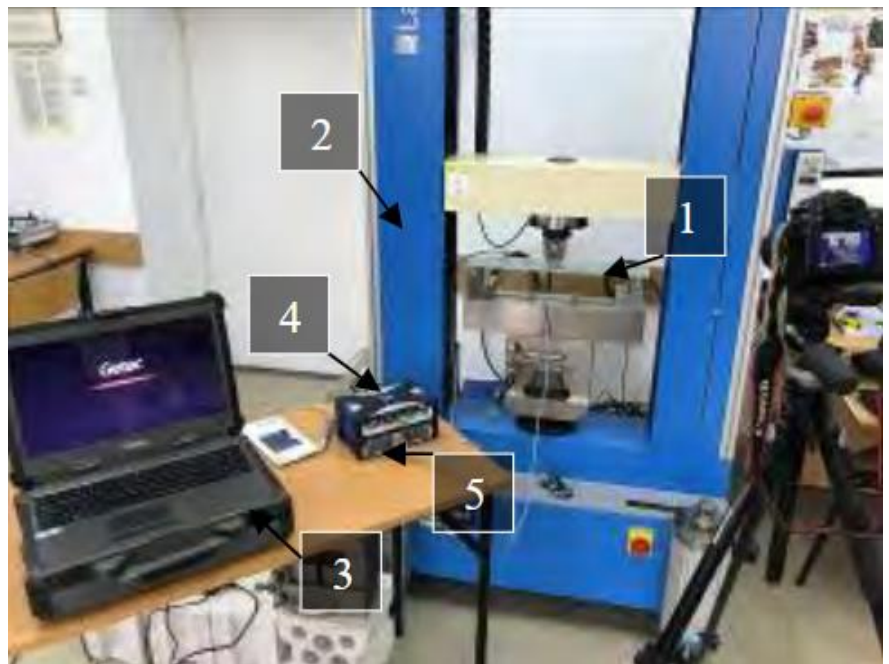
Рис.2.3. Схема випробування міцності скла на розтяг при триточковому згині:
а) для серії 1 та серії 3; б) для серії 2.

1 – дослідний зразок; 2 – згинальний ролик; 3 – опорний ролик; 4 – фіксуюча струбцина.

Для визначення модуля пружності та відносних деформацій зразків скла у верхній та нижній зонах п'яти перших зразків серії 1, п'яти перших зразків серії 2, та усіх зразків серії 3, були використані тензорезистори НВМ-1-LY41-10/120 (рис.2.5,а). Вони були наклеєні на зразок скла за допомогою клею z70 schnellklebstoff. Для отримання результатів було використано програмне забезпечення catman Easy-AP та обладнання 1-MX1615B-TENSOMETRY-CZNY, яке являлося 16-ти канальним вимірювальним підсилювачем серії QuantumX (рис.2.5, б). [35,94].



а)



б)

Рис.2.5. Випробування зразків скла на згин [35,94]:

а) загальний вигляд тензорезисторів;

б) загальний вигляд випробувальної установки:

1- дослідний зразок; 2 - прес Lab.Test 6.100.1.20; 3 - ПК із ПЗ catman Easy-AP;
4 - реєстратор серії QuantumX; 5 - вимірювальний підсилювач серії QuantumX.

Максимальне нормальне напруження розтягу було визначено із рівності максимального моменту згідно із п.9[141]:

$$\sigma_u = \frac{3 \cdot N_u \cdot l_s}{2 \cdot b \cdot t^2}, \quad (2.1)$$

де, N_u – руйнівне навантаження [кН];

l_s – відстань між опорними роликками [мм].

Модуль пружності визначався за законом Гука [141]:

$$E = \frac{\sigma_u}{|\varepsilon_u|}, \quad (2.2)$$

де, σ_u – максимальне нормальне напруження [МПа], із рівняння (2.1);

$|\varepsilon_u|$ – значення граничної відносної деформації у момент руйнування.

У зв'язку із аморфною структурою скла як матеріалу, розподіл прогнозованих фізико-механічних характеристик не піддається класичному нормальному розподілу Гауса. Тому, для визначення характеристичних значень фізико-механічних характеристик скла було використано функцію двох параметричного розподілу Вейбулла [31]. Методика обчислення подана у [30,35,36].

2.3. Дослідження скляних балок на згин із безперервним приростом навантаження

Експериментальне дослідження шести балок серії 1 (марки Вм-1.1.1, Вм-1.1.2, Вм-1.1.5, Вм-1.1.6, Вм-1.2.1, Вм-1.2.2) полягало у випробуванні скляних балок на чотириточковий згин із безперервним приростом навантаження до повного їх руйнування.

Схема випробувань (рис.2.6) являла собою шарнірно обперту балку (1), на яку діяло дві зосереджені сили, що навантажували балку через згинальні ролики (2) та траверсу (3). Сили розташовувались на відстані по 10 см в різні сторони від середини балки. Відстань між опорними роликами (4) складала 900 мм. Балка мала додаткові закріплення із площини (5), відстань між ними складала 800 мм, для забезпечення максимально можливої розрахункової довжини із площини. Для запису результатів досліджень використовувалось інтегроване програмне забезпечення, яке дозволяло контролювати процес завантаження. У верхній та нижній зоні по середині зразка балки наклеювались тензорезистори (6), за аналогією із дослідженням міцності скла на розтяг при згині.

Дослідження проводились в лабораторії будівельних конструкцій вищої школи технічно економічної в м. Ярославі (Польща). Випробування проводились

на пресі CONTROLS 50-C5800/*, який був сертифікований за системою EN 12390-4 та рамі для випробування 65-L1301/* (рис.2.7).

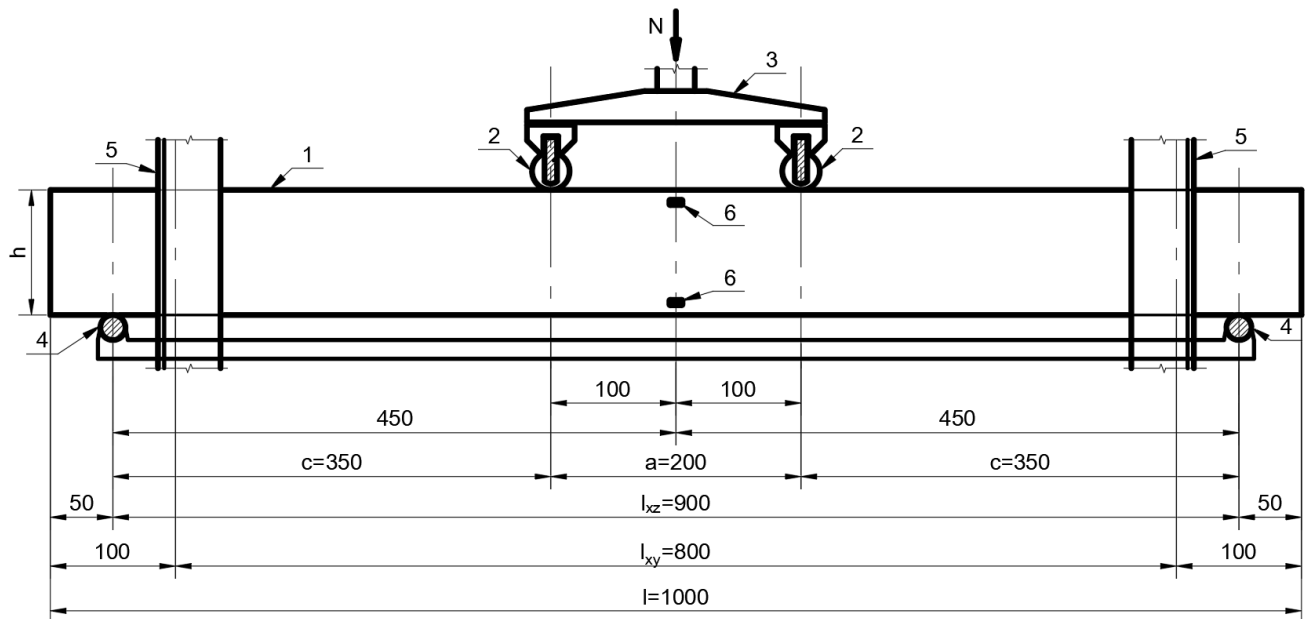


Рис.2.6. Схема випробування балок:

1 – дослідний зразок; 2 – згинальний ролик; 3 – траверса; 4 – опорний ролик; 5 – стабілізуюча струбцина; 6 – тензорезистор.

Навантаження N прикладалось безперервно до повного руйнування балки. Швидкість приросту навантаження становила 10 [Н/с].

Під час дослідження були записані наступні параметри:

- Значення навантаження N [Н] в момент часу t .
- Значення відносних деформацій ϵ [$\mu\text{м/м}$] в момент часу t .

Значення максимального нормального напруження, яке виникало у перерізі по середині балок визначалось за допомогою двох методик:

1) Із міцності на згин з п.8.1 [39]:

$$\sigma_{u,1} = k \cdot \left[N \cdot \frac{3 \cdot (l_{xz} - a)}{2 \cdot b \cdot h^2} + \sigma_{sw} \right], \quad (2.3)$$

де, N – руйнівне навантаження [Н];

$l_{xz} = 900$ мм – відстань між опорними роликами (див. рис. 2.6);

$a = 200$ мм – величина плеча сил (див. рис. 2.6);

h – висота перерізу балки (див. табл.2.2) [мм];

b – ширина перерізу балки (див. табл.2.2) [мм];

σ_{sw} – напруження згину від власної ваги.



Рис.2.7. Загальний вигляд дослідної установки.

- 1 - дослідний зразок; 2 - прес CONTROLS 50-C5800/*;
- 3 - рама для випробувань 65-L1301/*; 4 - ПК із ПЗ catman Easy-AP;
- 5 - реєстратор та вимірювальний підсилювач серії QuantumX.

2) Із закону Гука:

$$\sigma_{i,2} = \varepsilon_i \cdot E, \quad (2.4)$$

де, ε_i – значення відносної деформації.

E – значення модуля пружності отриманий із рівняння (2.2) [МПа].

2.4. Дослідження скляних балок на згин із контрольованим ступінчастим приростом навантаження.

Експериментальне дослідження усіх балок (18шт.) полягали у випробуванні скляних балок на чотириточковий згин до повного руйнування балок із контрольованим ступінчастим приростом навантаження. Дослідження проводились на базі науково-дослідної лабораторії НДЛ-23 Національного університету «Львівська політехніка». Кліматичні умови лабораторії відповідали умовам випробуванням міцності скла на розтяг при згині.

На дослідній установці (рис.2.8) була встановлена шарнірно оберта балка (9) на яку діяло дві зосереджені сили, які передавалися на балку через траверсу (4). Зосереджені сили розташовувались на відстані по 10 см в різні сторони від середини балки по довжині. Відстань між опорами (7) та (8) складала 900 мм. Балка мала додаткові закріплення із площини (6) – підтримуючі металеві кутники, що формували собою стабілізуючу струбцину, відстань між якими складала 800 мм. Важливим елементом була силова металева рама (5), яка виступала стабілізатором для траверси (4). Стабілізатор траверси давав можливість тільки вертикального вільного руху, та у свою чергу, розкріплював траверсу із площини, що унеможливило втрату нею стійкості (рис.2.8). Сама траверса не розкріплювала дослідний зразок, а лише передавала вертикальне зусилля на нього. Ролики передавання навантаження були закріплені до траверси шарнірно із сторони шарнірно-рухомої опори (8) та шарнірно-рухомо із сторони шарнірно-нерухомої опори (7).



Рис.2.8. Можливий напрямок руху траверси.

Навантаження на балку прикладалось за допомогою домкрату (2), а далі через кільцевий динамометр (3). На запропоновану установку для дослідження скляних балок на чотириточковий згин отримано патент на корисну модель №153096.

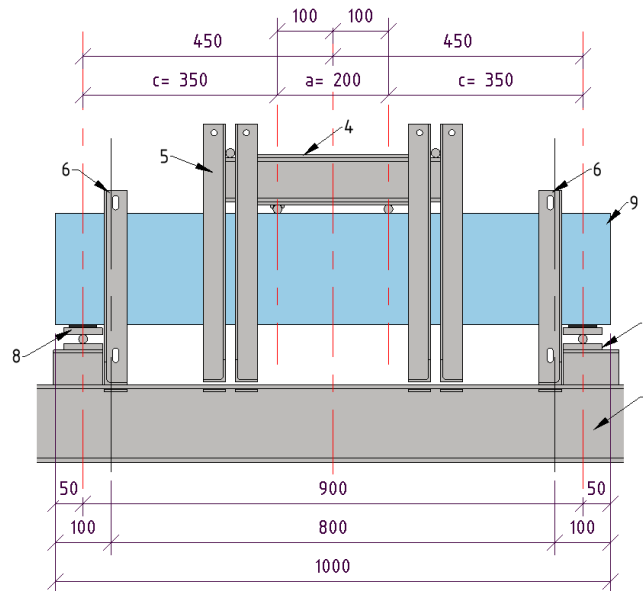
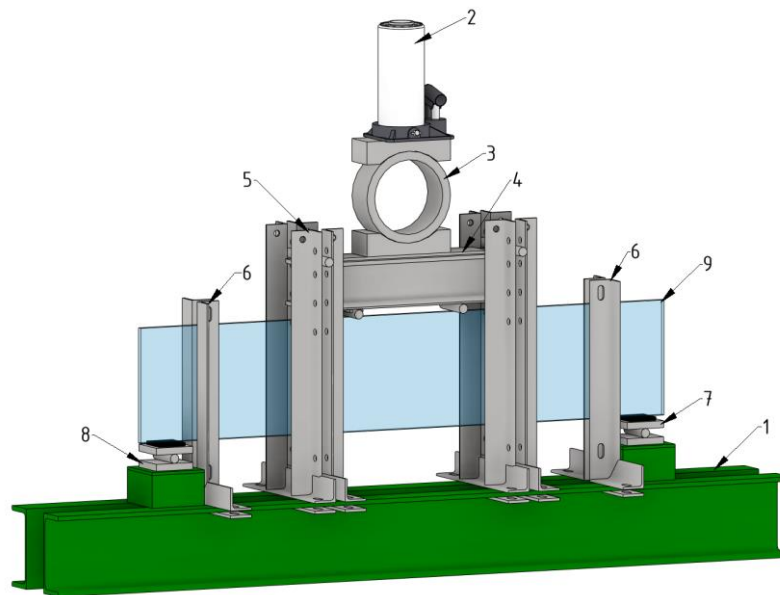


Рис.2.9. Загальний вигляд дослідної установки:

1 – нерухома база; 2 – гідравлічний домкрат; 3 – кільцевий динамометр; 4 – траверса; 5 – силова металева рама; 6 – стабілізуюча струбцина; 7 – шарнірно нерухома опора; 8 – шарнірно рухома опора; 9 – дослідний зразок.

Покази з приладів зчитувались після витримки для кожного етапу навантаження. Для контролю величини навантаження був використаний кільцевий динамометр. Величини ступенів навантаження були прийняті такими, щоб розділити кожен експеримент на 10 ступенів навантаження.

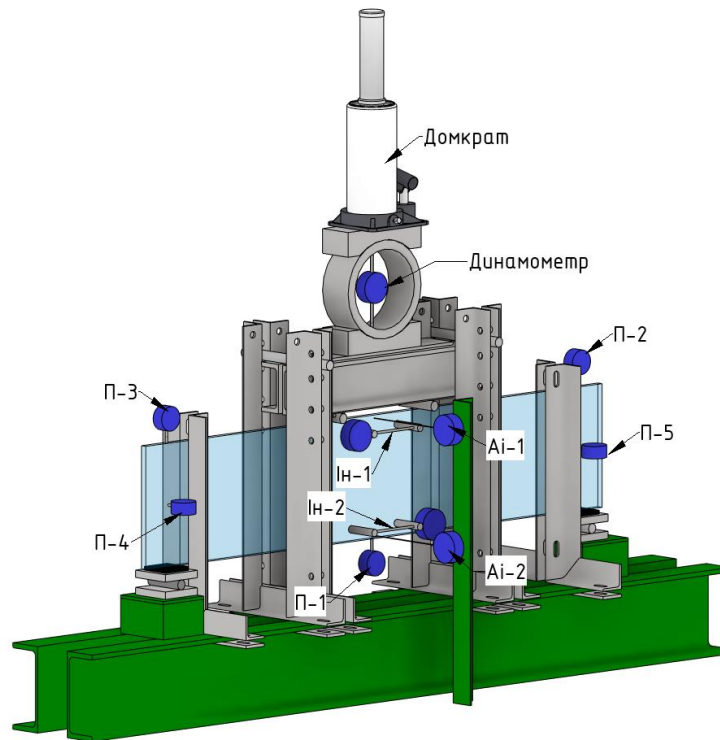


Рис.2.10. Схема розміщення механічних приладів.

Під час дослідження було визначено:

u_z – прогини, деформації у площині прикладання навантаження (деформації вздовж осі Z зразка). Деформації замірювались прогиномірами у вигляді механічних індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм:

- П-1 – для заміру деформацій по середині прольоту балки (див. рис.2.10);
- П-2, П-3 – для заміру деформацій над опорами. Прогиномір П-2 розташовувався біля шарнірно-нерухої опори (7), П-3 – біля шарнірно-рухої опори (8) (див. рис.2.9, 2.10).

Значення прогину u_z визначалась як різниця між показами приладів П-1 та середньому значенню П-2 і П-3:

$$u_z = u_{П1} - \frac{u_{П2} + u_{П3}}{2} \quad (2.5)$$

u_y – бокові деформації у площині перпендикулярній до площини прикладання навантаження (деформації вздовж осі Y зразка). Для заміру деформацій було застосовано наступні прилади:

- П-4, П-5 – для заміру деформацій балки над опорами з площини використовували механічні індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм. Прогиномір П-5 розташовувався біля шарнірно-нерухомої опори (7), П-4 – біля шарнірно-рухомої опори (8) (див. рис.2.9, 2.10).
- Аі-1, Аі-2 - для заміру деформацій балки з площини по середині прольоту використовували прогиноміри Аістова 6ПАО за ТУ4273-095-59489947-2007. Прогиномір Аі-1 – був встановлений у верхній зоні, Аі-2 – у нижній.

Значення бокового вигину визначалось для нижньої $u_{у.низ}$ та верхньої зони $u_{у.верх}$, як різниця між показами приладів Аі-1 або Аі-2 та середньому значенню П-4 і П-5:

$$\begin{aligned} u_{у.низ} &= u_{Аі-1} - \frac{u_{П4} + u_{П5}}{2} \\ u_{у.верх} &= u_{Аі-2} - \frac{u_{П4} + u_{П5}}{2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Відносні деформації були заміряні двома способами:

- ε_1 – відносні деформації на грані 1, були заміряні за допомогою механічних екстензометрів Ін-1 та Ін-2, які складались із індикаторів годинникового типу (ІЧ-01-0.001) з ціною поділки 0.001 мм та двох фіксаторів, які утворювали базу довжиною 100 мм. Механічний екстензометр Ін-1 – знаходився у верхній зоні балки, екстензометр Ін-2 – у нижній.
- ε_2 – відносні деформації на грані 2, були заміряні за допомогою методу кореляції цифрових зображень (див. п.2.5). Для цього у аналогічних до грані 1 місцях, за допомогою програмного забезпечення було розміщено віртуальні екстензометри у верхній та нижній зоні.

Визначення нормальних напружень в балках відбувались за рівняннями (2.3) та (2.4).

2.5. Використання методу кореляції цифрових зображень для визначення деформацій в процесі дослідженні скляних балок

Другим методом визначення деформацій скляних балок був метод кореляції цифрових зображень (КЦЗ).

Методика, яка була використана, базувалась на посібнику міжнародної спільноти кореляції цифрових зображень (iDICs) [81]. Згідно із даними вказівками, а також досвідом попередників у дослідженні скляних [93,94] та бетонних [92] конструкцій було обрані оптимальні параметри для використання даного методу.

Для правильного налаштування техніки було визначено наступні параметри КЦЗ згідно із п.2.1 [81] (рис.2.10):

- QOI – об’єкт дослідження – скляна балка на двох опорах.
- ROI – досліджуваний регіон – зона чистого згину балки.
- FOV – поле дослідження – відповідає значенню ROI.

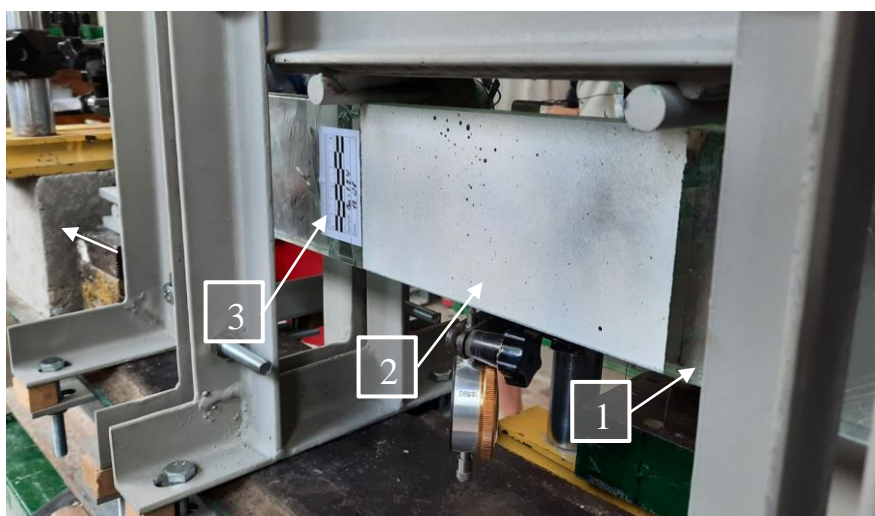


Рис.2.11. Дослідження балок з використанням КЦЗ:

1 – QOI; 2 – ROI та FOV; 3 – масштабуючий маркер.

Схема досліду подана на рис.2.11. У дослідному зразку (1) був обраний регіон дослідження ROI (2). На фіксованій відстані так щоб ROI займав максимальну корисну площу матриці на штативі (3) була розташована фотокамера (4), позаду було розташовано джерело світла.

У якості джерела зчитування інформації для дослідження була використана фотокамера SONY α 6000. Із наступними характеристиками:

- Тип сенсору – CMOS;

- Розмір сенсору – 23.5 x 15.6 мм APS-C;
- Площа сенсору – 366.6 мм²;
- Процесор обробки зображень – BIONZ Sony CXD4132;
- Розмір пікселя – $3.92 \cdot 10^{-6}$ м.

Був використаний об'єктив: E PZ 16-50 mm F3.5-5.6 OSS, у якому використовувалась фокусна віддаль в еквіваленті 50 мм, для того щоб уникнути впливу кривизни лінзи об'єктиву.

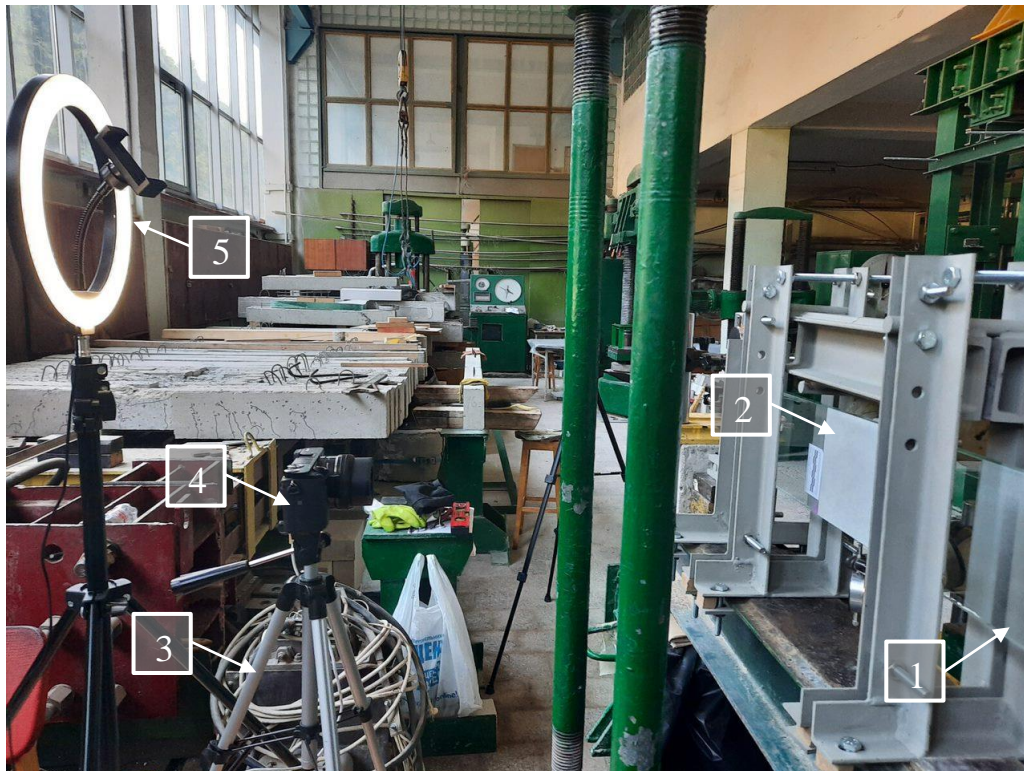


Рис.2.12. Схема досліду із використанням КЦЗ:

- 1 – дослідний зразок; 2 – регіон дослідження; 3 – штатив; 4 – фотокамера;
5 – джерело світла.

Згідно із рекомендацією 2.5 п.2.2.1 [81] дозволялося використовувати матриці із квадратними пікселями, що власне і було присутнє у даному сенсорі, та вимагало додаткового доопрацювання зображення за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Зображення усіх етапів були зафіксовані у ручному режимі без автоматичного застосування параметрів, які могли б вплинути на якість зчитування зображення.

Порядок підготовки зразків був аналогічний для дослідження до п.2.2.2 [93] та п.2.2.2 [94]. На попередньо очищений та обезжирений дослідний зразок було

нанесено за допомогою маркера основні зони зацікавлення – розташування опор та зона впливу чистого згину. Далі створили спекл-поверхню за допомогою нанесення спочатку білої фарби, як основи, а потім над нею була розпилена чорна фарба. Після повного висихання фарби на зразок наклеювався масштабний маркер. Масштабний маркер був вказівником для виставлення балансу білого кольору та масштабування (рис.2.13 та 2.14).

Усі зображення були виконанні у форматі ARW (RAW). Це дало змогу отримувати більше інформації із кожного зображення. Ще однією перевагою даного формату було монохромне вхідне зображення. Зображення формату ARW конвертувались в JPEG та остаточно знебарвлювались за допомогою фоторедактора, далі отримували свої порядкові номери та завантажувались в спеціалізоване програмне забезпечення.

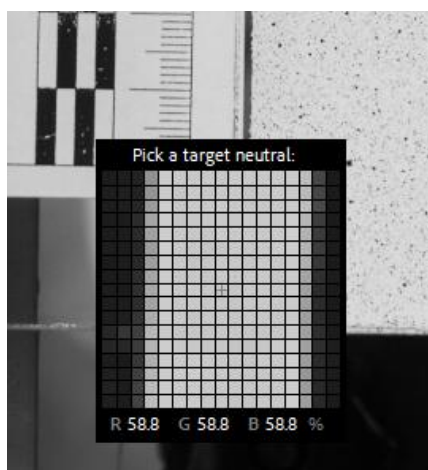


Рис.2.13. Виставлення балансу білого кольору по масштабному маркеру.

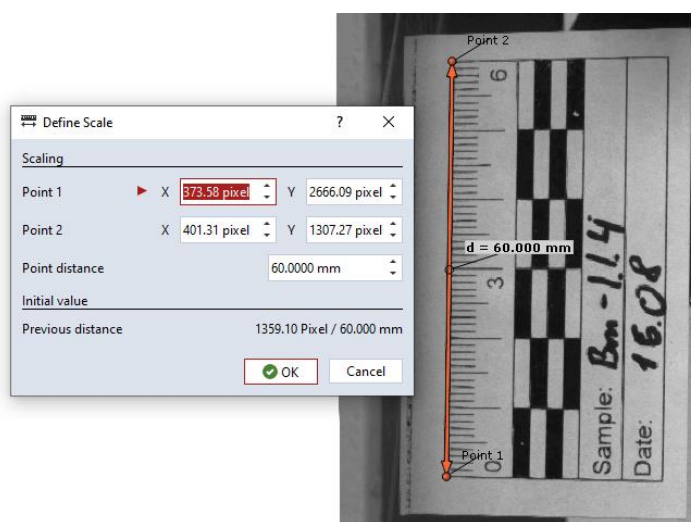


Рис.2.14. Виставлення масштабу за масштабним маркером.

Програмне забезпечення для проведення кореляції було обране від компанії Zeiss, а саме GOM Correlate Pro.

Завантаження оброблених зображень виконувалося в GOM Correlate 2D.

Для визначення деформацій були використанні два типи інструментів в GOM Correlate:

- Площинні елементи (рис.2.15). Це елементи які аналізували площину в цілому та шукали зміщення кожного окремого фасету відносно іншого окремого фасету на площині.

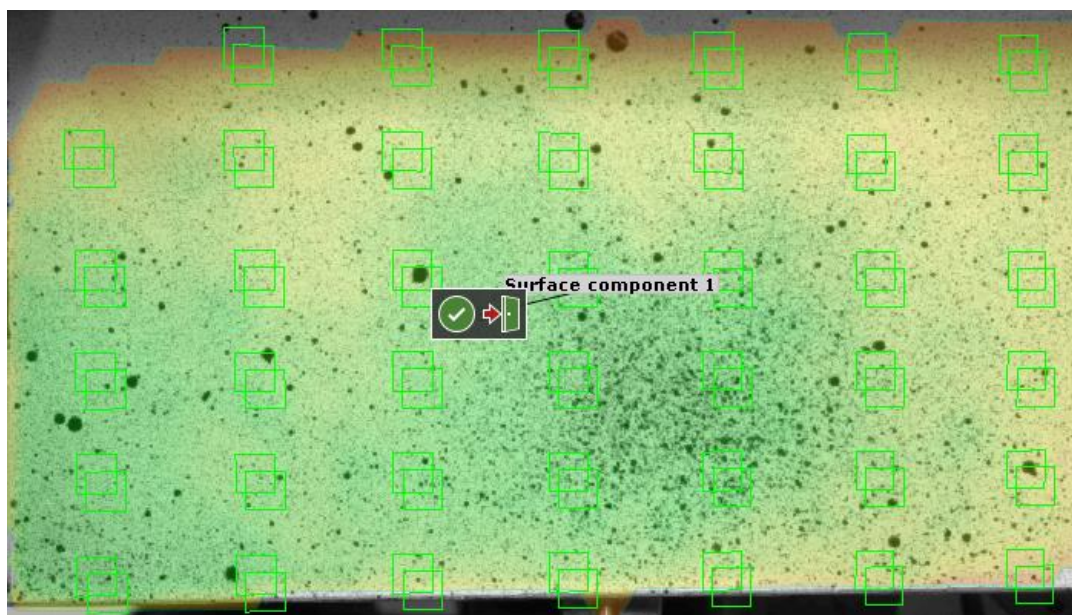


Рис.2.15. Площинний елемент для аналізу деформацій в програмному забезпеченні GOM Correlate.

- Точкові елементи (рис.2.16). Для визначення зміщення однієї точки відносно іншої на певній відстані, що було відповідно віртуальним екстензометром.

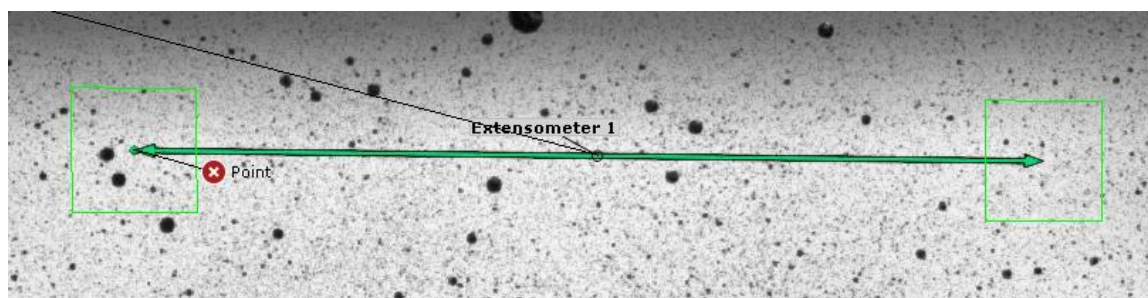


Рис.2.16. Точковий елемент (екстензометр) для аналізу деформацій в програмному забезпеченні GOM Correlate

Розмір точкових елементів які утворювали віртуальні екстензометри становив 200x200 пікселів. Далі на кожному етапі завантаження було визначено відносні деформації за допомогою віртуальних екстензометрів, що у свою чергу повторювали механічні прилади.

Після аналізу попередніх досліджень скляних конструкцій за допомогою методу кореляції цифрових зображень було помічено та виправлено наступне [93,94]:

Розташування джерела зчитування. У попередніх дослідженнях джерело зчитування інформації розташовувалось не перпендикулярно до дослідного зразку, а під кутом що у свою чергу впливало на якість отриманих результатів.

Фокусна віддаль об'єктиву. Із метою використання максимальної площі матриці в попередніх дослідженнях було використано об'єктиви із фокусною віддаллю меншою ніж 50 мм, що створювало опукле зображення та впливало на якість отриманих результатів.

Постійне джерело світла та контроль балансу білого кольору. Не залежно від типу матриці, яка використовувалася баланс білого кольору в загальній експозиції впливав на забарвлення сірих пікселів, які залежно від свого забарвлення впливали на визначення деформацій.

2.6. Висновки до розділу 2

1. Для визначення фізико-механічних характеристик скла, було виготовлено дослідні зразки із звичайного флоат скла. Метою дослідження було визначення міцності двох серій скла на розтяг при згині. Дослідні зразки серії 1 були досліджені на триточковий згин із горизонтальною орієнтацією зразка відносно осі z, зразки серії 2 із вертикальною. Наведено методику випробування таких досліджень.

2. Було запроєктовано та виготовлено зразки скляних балок за допомогою технології триплексування для дослідження їх на чотириточковий згин. Балки поділено на три серії за висотою перерізу.

3. Наведено методику випробування балок на чотириточковий згин із безперервним приростом навантаження. Для дослідження було використано одна двошарові балки серії 1. Під час дослідження було передбачено записування значення прикладеного навантаження та значення відносних деформацій за допомогою тензодатчиків

4. Наведено методику випробування балок на чотириточковий згин із контрольованим приростом навантаження для дослідження балок. Під час дослідження було передбачене записування значення прикладеного навантаження, за допомогою кільцевого динамометра; значення прогинів та вигинів за допомогою механічних приладів; відносні деформації за допомогою механічних приладів та методу кореляції цифрових зображень. Описано методику використання користувацької цифрової камери, як джерела зчитування для методу кореляції цифрових зображень.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Результати випробування міцності скла на розтяг при згині

Дослідні зразки скла двох серій були випробувані згідно з методикою описаною в п.2.1.1. Вигляд дослідних зразків скла після руйнування серії 1 та серії 2 подано на рис.3.1.

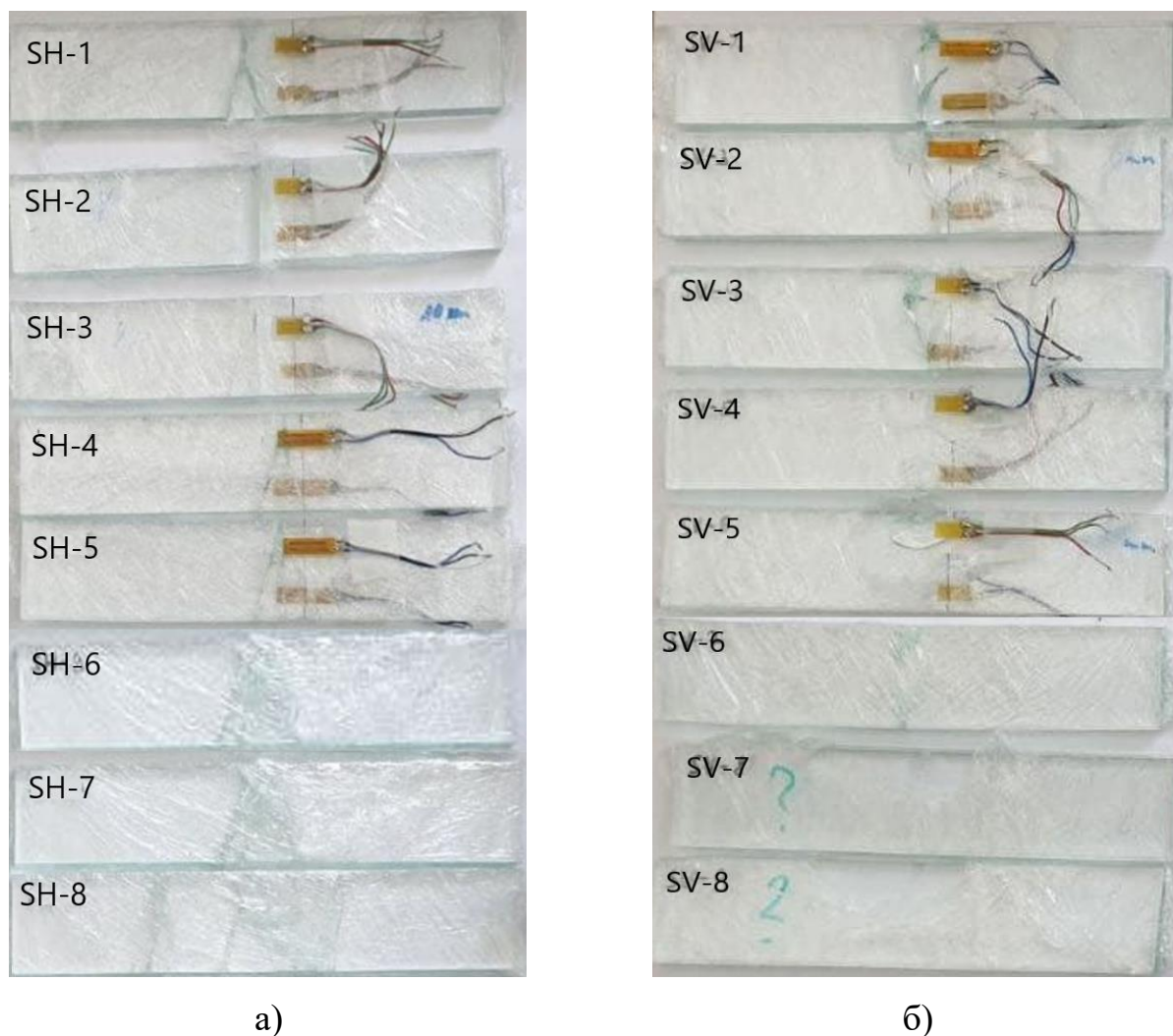
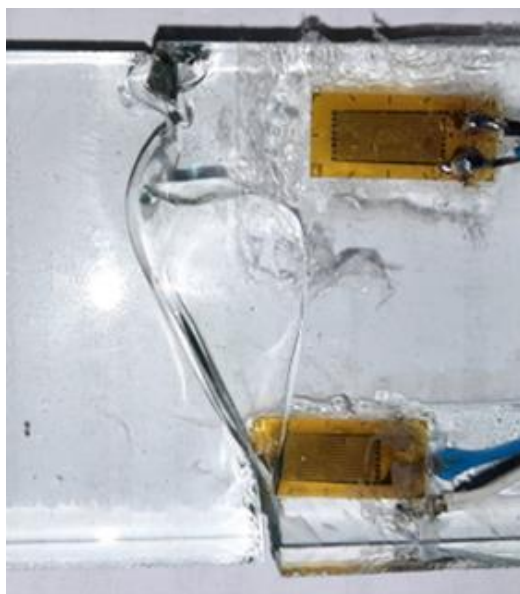


Рис.3.1. Дослідні зразки скла після руйнування:
а) серія 1; б) серія 2.

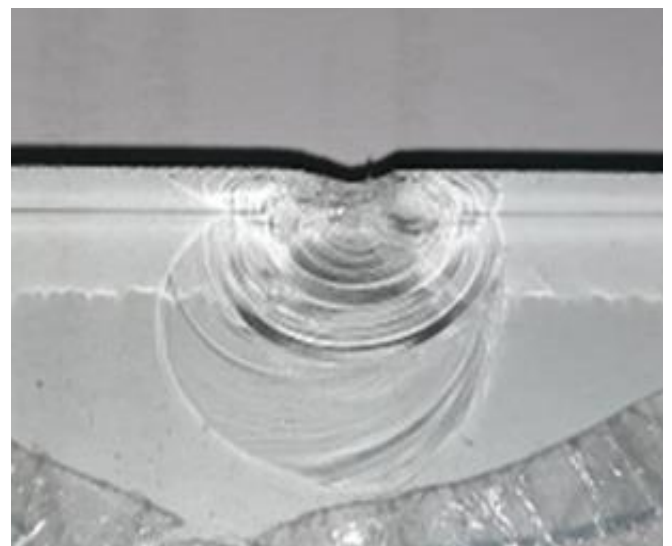
Для зразків серії 1 марки SH руйнування відбувалось під роликом прикладання навантаження, посередині прольоту зразка із утворенням рівномірної тріщини вдовж короткої сторони зразка b. Зразки серії 1 мали характер руйнування який відповідав типовим зразкам руйнування для кераміки та крихких елементів рис.X1.1 [141]. Зразки серії 1 зруйнувались при досягненні граничного

навантаження від $N_{min} = 321.4$ Н до $N_{max} = 676.7$ Н. Відхилень у характері руйнування в порівнянні із аналогічними зразками, які були у дослідженнях [35], не було виявлено.

Для зразків серії 2 марки SV1, SV2, SV3, SV6 руйнування відбувалось в зоні прикладання навантаження посередині прольоту із утворенням тріщини (рис.3.2, а). Тріщина брала свій початок у нижній зоні зразка та поширювалась вздовж короткої сторони зразка в, до верхньої грані. Для зразків марки SV4, SV5, SV7, SV8 за руйнування було прийнято утворення сколювання у місці прикладання навантаження (рис.3.2, б). Утворене сколювання мало локальний характер, що не приводило до повного руйнування зразків. Зразки серії 2 зруйнувались при досягненні граничного навантаження від $N_{min} = 1347.5$ Н до $N_{max} = 3214.5$ Н.



а



б

Рис. 3.2. Руйнування зразків серії 2.

а) характерне руйнування зразка серії 2; б) локальне руйнування перерізу у зоні прикладання зусилля серії 2.

Результати випробувань скла на міцність наведені у табл.3.1. Визначення міцнісних характеристик виконувалось згідно із рівняннями (2.1). Для визначення модуля пружності скла було застосовано рівняння (2.2), а отримані результати представлено у таблиці 3.2. Значення відносної деформації ε_i скла було визначено в момент руйнування кожного зразка.

Табл. 3.1

Результати дослідження зразків на міцність при згині

Серія	Марка	Макс. навант., N_u	Момент опору, W_i	Макс. норм. напр. $\sigma_{b,u}$
		[Н]	[мм ³]	[МПа]
1	SH-1	588.8	796.1	36.98
	SH-2	487.3	796.9	30.57
	SH-3	523.2	802.1	32.62
	SH-4	676.7	802.3	42.17
	SH-5	623	809.7	38.47
	SH-6	321.4	819.6	19.61
	SH-7	511.4	798.9	32.00
	SH-8	523.2	808	32.38
2	SV-1	2538.1	4148.0	30.59
	SV-2	3125.3	4281.3	36.50
	SV-3	2792.2	4108.1	33.98
	SV-4	1650.4	4069.8	20.28
	SV-5	2723.3	4062.5	33.52
	SV-6	3214.5	4127.0	38.95
	SV-7	1347.5	4091.7	16.47
	SV-8	1981.5	4095.5	24.19

Табл. 3.2

Результати визначення модуля пружності

Серія	Марка	Макс. норм. напр. $\sigma_{b,u}$	Відн. деф. ε_i	Модуль пружності E_σ
		[МПа]	[$\times 10^{-4}$]	[МПа]
1	SH-1	36.98	5.36	68945
	SH-2	30.57	4.36	69986
	SH-3	32.62	4.64	70169
	SH-4	42.17	6.05	69608
	SH-5	38.47	5.51	69691
Середні значення				69680
2	SV-1	30.59	4.37	69858
	SV-2	36.50	5.20	70191
	SV-3	33.98	4.83	70221
	SV-4	20.28	2.89	69918
	SV-5	33.52	4.59	72863
Середні значення				70610

За результатами дослідження проведено статистичний аналіз величини міцності скла на згин за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла. Даний метод статистичної оцінки міцності скла базувався на твердженні того що

статистично розподілені величини, можуть бути представлені однією функцією розподілу Вейбулла, навіть у випадку великого статистичного відхилення від стандартної кривої розподілу. Згідно [32] було виконано розрахунок параметрів функції розподілу $G(X)$, проведено статистичну оцінку міцності для зразків серії 1 та серії 2. Результати розрахунку наведені у табл.3.3 для зразків серії 1 та у табл.3.4 для серії 2.

Табл.3.3

Результати статистичної оцінки для зразків серії 1

$G(x)$	\hat{x}	y	ν	f_2	$H(f_2)$	γ	$\chi_{f_2:0.975}^2$	$\chi_{f_2:0.975}^2$	$G_{ob:z}$	$G_{un:z}$
%	[МПа]	-	-	-	-	-	-	-	%	%
99	46.7	-1.53	0.326	7.09	0.999	12.5010	1.7340	16.135	100.00	95.30
95	43.3	-1.10	0.230	9.67	0.997	8.1228	3.0690	20.005	100.00	92.31
80	38.9	-0.48	0.154	14.00	0.997	4.3633	5.6300	26.1	99.97	82.70
63.2	35.8	0.00	0.145	14.74	0.997	2.7103	6.1030	27.15	99.32	67.43
10	24.2	2.25	0.694	3.78	1.009	0.2891	0.4250	10.715	55.94	3.20
1	16.1	4.60	2.302	1.60	0.741	0.0211	0.0308	6.436	8.11	0.04

Табл.3.4

Результати статистичної оцінки для зразків серії 2

$G(x)$	\hat{x}	y	ν	f_2	$H(f_2)$	γ	$\chi_{f_2:0.975}^2$	$\chi_{f_2:0.975}^2$	$G_{ob:z}$	$G_{un:z}$
%	[МПа]	-	-	-	-	-	-	-	%	%
99	45.90	-1.53	0.326	7.09	0.9986	12.5010	1.7340	16.135	100.00	95.30
95	41.55	-1.10	0.230	9.67	0.9975	8.1228	3.0690	20.005	100.00	92.31
80	35.98	-0.48	0.154	14.00	0.9974	4.3633	5.6300	26.1	99.97	82.70
63.2	32.23	0.00	0.145	14.74	0.9974	2.7103	6.1030	27.15	99.32	67.43
10	19.15	2.25	0.694	3.78	1.0094	0.2891	0.4250	10.715	55.94	3.20
1	11.12	4.60	2.302	1.60	0.7407	0.0211	0.0308	6.436	8.11	0.04

Значення які використовуються у таблицях 3.3 та 3.4 згідно із [32]:

\hat{x} – величина яка розглядається, у даному випадку це напруження руйнування $\hat{x} = \sigma_{b,i}$;

$G(x)$ – функція розподілу для несприятливого результату (руйнування зразка);

y, ν, γ – допоміжні коефіцієнти, які використовуються для визначення довірчого інтервалу $G(x)$ п.8. [32];

f_2 та $H(f_2)$ – степінь свободи та зміна для оцінки допоміжного коефіцієнту γ ;

$\chi_{f_2:0.975}^2$ та $\chi_{f_2:0.975}^2$ – функції розподілу;

$G_{ob:z}$ – верхня межа довірчого інтервалу;

$G_{un:z}$ – нижня межа довірчого інтервалу.

Результати подано у графічному вигляді згідно із додатком В [32] на рис.3.3.

Для цього було нанесено значення функцій розподілу $G(x)$, для серії 1 та серії та відповідні значення функцій довірчого інтервалу $G_{ob:z}$ та $G_{un:z}$, разом із даними визначення максимального нормального напруження із таблиці 3.1.

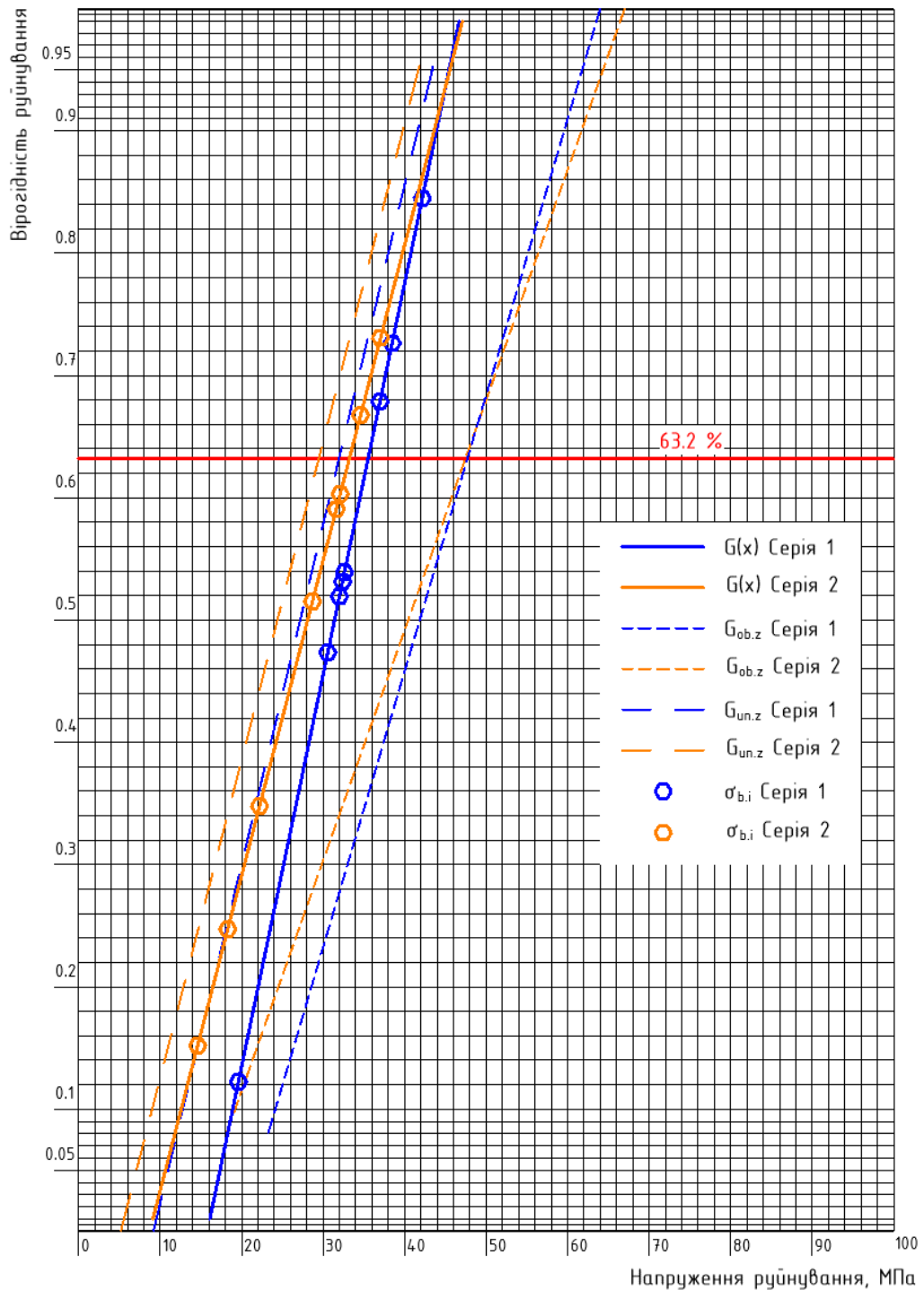


Рис. 3.3. Графіки Вейбулла для розподілу міцності при згині.

У табл.3.5 подано оцінку характеристичних міцностей скла на розтяг при згині, а саме подана характеристична міцність скла (63.2 % руйнування [25,32,135]) за розподілом Вейбулла та коефіцієнт детермінації R^2 . Коефіцієнт R^2 є критерієм оцінки збіжності. Оскільки його значення було близьким до 1,0 в обох випадках, тому результат статистичного аналізу можна вважати задовільним (п.3.3 [36] та п.7.2.5 [31]).

Табл. 3.5

Оцінка розподілу міцності на згин за допомогою розподілу Вейбулла

Характеристика розподілу	Од. виміру	Серія	
		1	2
Характеристичне значення міцності (63.2% руйнування)	МПа	35.8	32.23
Коефіцієнт детермінації R^2	-	0.8869	0.9695

Зразки серії 1 були на 9.9% міцніші за зразки серії 2. Це підтверджує використання нижчої міцності для скляних елементів навантажених в торець згідно з DIN 18008:2010-12 [43] та TRLV:2006-08 [44].

Як згадано у п.1.2, визначення розрахункового значення міцності скла не має однозначної методики. Стандарти проектування пропонують різні підходи до його визначення. ргEN 16612 [45]. Оскільки є основою для подальшого міждержавного стандарту EUROCODE для проектування скляних конструкцій. Україна знаходиться на перехідному етапі впровадження європейський стандартів, тому визначення значення розрахунково міцності на розтяг при згині буде виконано саме за цим стандартом.

У випадку даного дослідження прийнято наступні параметри:

$k_{mod} = 0.89$ – коефіцієнт тривалості навантаження табл.6 [45], як для змінного навантаження тривалістю більше 30 секунд;

$k_{sp} = 1$ – коефіцієнт типу поверхні табл.5 [45], як для звичайного флоат скла;

$f_{g,k.1} = 35,8 \frac{H}{MM^2}$ – характеристичне значення міцності матеріалу на розтяг при згині для зразків серії 1 (п.3.1);

$f_{g,k.2} = 32,23 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ – характеристичне значення міцності матеріалу на розтяг

при згині для зразків серії 2 (п.3.1);

$\gamma_{M;A} = 1.6$ – коефіцієнт надійності за матеріалом табл. 6 [45].

Розрахункова міцність на розтяг при згині, становила:

- Для серії 1:

$$f_{g;d1} = \frac{0.89 \cdot 1 \cdot 35,8}{1.6} = 19.91 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} (\text{МПа}) \quad (3.1)$$

- Для серії 2:

$$f_{g;d2} = \frac{0.89 \cdot 1 \cdot 32,23}{1.6} = 17.93 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} (\text{МПа}) \quad (3.2)$$

Отже, згідно з проведеними випробуваннями було визначено значення міцності скла для зразків та отримано значення модуля пружності. За результатами статистичного аналізу міцності скла було встановлено характеристичну міцність зразків скла на згин. Для серії 1, зразки які досліджувались із горизонтальною орієнтацією, характеристична міцність становила $f_{g,k} = 35,8$ МПа. Для зразків серії 2, із вертикальною орієнтацією зразка – $f_{g,k} = 32,23$ МПа. Значення модуля пружності отримане із результатів дослідження - $E = 69680$ МПа – для серії 1, та $E = 70610$ МПа, для серії 2. Для подальшого аналізу було прийнято за значення розрахункової міцності на розтяг при згині значення $f_{g;d} = f_{g;d2} = 17.93 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ (МПа), оскільки навантаження на балки прикладалося в торець, як і для зразків серії 2.

3.2. Результати дослідження скляних балок на чотирьох-точковий згин

3.2.1. Серія 1. Балки висотою 100 мм із безперервним приростом навантаження

У відповідності до програми експериментального дослідження (п.2.1.2) було проведено випробування скляних балок серії 1, висотою 100 мм на чотирьох-

точковий згин. Балки серії марки: Вm-1.1.1, Вm-1.1.2, Вm-1.1.5, Вm-1.1.6, Вm-1.2.1, Вm-1.2.2, було випробувано на чотирьохточковий згин із безперервним приростом навантаження виходячи із технологічних можливостей обладнання.

У таблиці 3.6 зібрані результати випробування балок серії 1 із безперервним приростом навантаження.

Табл. 3.6

Випробування балок серії 1 із безперервним приростом навантаження

Марка	Макс. навант. N_u	Макс. момент M_u	Макс. напруження σ_u
	[кН]	[кН·м]	[МПа]
Вm-1.1.1	3.336	0.59	34.63
Вm-1.1.2	2.754	0.48	28.74
Вm-1.1.5	2.321	0.41	24.52
Вm-1.1.6	4.900	0.86	51.60
Вm-1.2.1	6.819	1.20	36.13
Вm-1.2.2	6.976	1.23	36.59

На рис. 3.4 зображено графіки залежності відносних деформацій від прикладеного навантаження для балок Вm-1.1.1 та Вm-1.1.2. Відносні деформації балки Вm-1.1.1 мали приріст на двох етапах завантаження. При навантаженні від $N_{i-1} = 0.0$ до $N_i = 0.5$ кН відносні деформації змінились до значень $\varepsilon_i^{\text{верх}} = -1.41 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та $\varepsilon_i^{\text{низ}} = 1.75 \cdot 10^{-4}$ для нижньої. Далі на ділянці навантаження від $N_{i-1} = 0.5$ до $N_i = 3.0$ кН, графік залежності відносних деформацій для нижньої та верхньої зони набув форми горизонтальної прямої. Після, від $N_{i-1} = 3.0$ до руйнівного навантаження $N_u = 3.336$ кН значення відносних деформацій отримали раптовий приріст. Остаточне значення відносних деформацій при навантаженні $N_u = 3.336$ кН, становили: $\varepsilon_u^{\text{верх}} = -2.85 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та $\varepsilon_u^{\text{низ}} = 3.42 \cdot 10^{-4}$ для нижньої.

Із графіку на рис.3.4, відносні деформації балки Вm-1.1.2 змінювались лінійно та прямо пропорційно до прикладеного навантаження. Середній приріст відносних деформацій на 1 кН прикладного навантаження склав: $\Delta\varepsilon^{\text{верх}} = -2.91 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та $\Delta\varepsilon^{\text{низ}} = 3.00 \cdot 10^{-4}$ для нижньої. При руйнівному

навантаженні $N_u = 2.754 \text{ кН}$, відносні деформації становили: $\varepsilon_u^{\text{низ}} = 8.27 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_u^{\text{верх}} = -8.01 \cdot 10^{-4}$ у верхній.

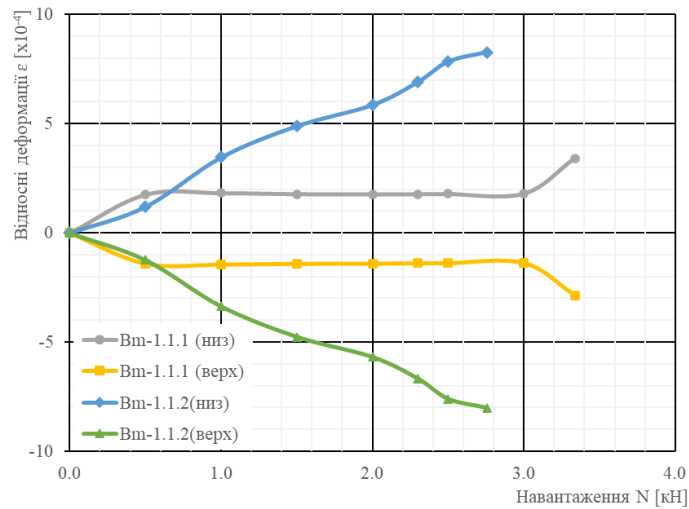


Рис. 3.4. Графік залежності відносних деформацій ε від прикладеного навантаження N для балок серії 1 Вм-1.1.1 та Вм-1.1.2.

Балка марки Вм-1.1.1 – одношарова, висотою 100 мм. Зруйнувалась при досягненні навантаження у $N_u = 3.336 \text{ кН}$. Руйнування розпочалось (рис.3.5) із розкриття тріщини у нижній, розтягненій зоні, яка розпочалась на відстані близько 5 сантиметрів від краю валика прикладення навантаження в сторону опори. Далі тріщина утворила кілька нових тріщин які поширились до верхньої зони.



а)



б)

Рис.3.5 Характер руйнування балок серії 1 марки: а)Вм-1.1.1; б) Вм-1.1.2.

Балка марки Вм-1.1.2, була аналогічною до балки марки Вм-1.1.1. Руйнування відбулось при досягненні навантаження у $N_u = 2.754$ кН. Характер руйнування балки був аналогічним до попередньої: розкриття тріщини розпочалось у нижній зоні та поширювалась вона до верхньої.

На рис.3.6 зображено графік залежності відносних деформацій від прикладеного навантаження для балок Вм-1.1.5 та Вм-1.1.6. Для балки Вм-1.1.5, графік був схожий за характером на графік балки Вм-1.1.1 (рис.3.5). При навантаженні від $N_{i-1} = 0.0$ до $N_i = 0.5$ кН, відносні деформації стрімко змінились до значень $\varepsilon_i^{\text{верх}} = -3.43 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та $\varepsilon_i^{\text{низ}} = 3.43 \cdot 10^{-4}$ для нижньої. Далі на ділянці навантаження від $N_{i-1} = 0.5$ до $N_i = 2.0$ кН, була майже без змін, значення відносних деформацій при навантаженні $N_i = 2.0$ кН становили $\varepsilon_i^{\text{верх}} = -4.06 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та $\varepsilon_i^{\text{низ}} = 4.01 \cdot 10^{-4}$ для нижньої зони. Від $N_{i-1} = 2.0$ до руйнівного навантаження $N_u = 2.321$ кН значення відносних деформацій отримали раптовий приріст. Остаточне значення відносних деформацій при навантаженні $N_u = 2.321$ кН, становили: $\varepsilon_u^{\text{верх}} = -5.78 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та $\varepsilon_u^{\text{низ}} = 5.74 \cdot 10^{-4}$ для нижньої.

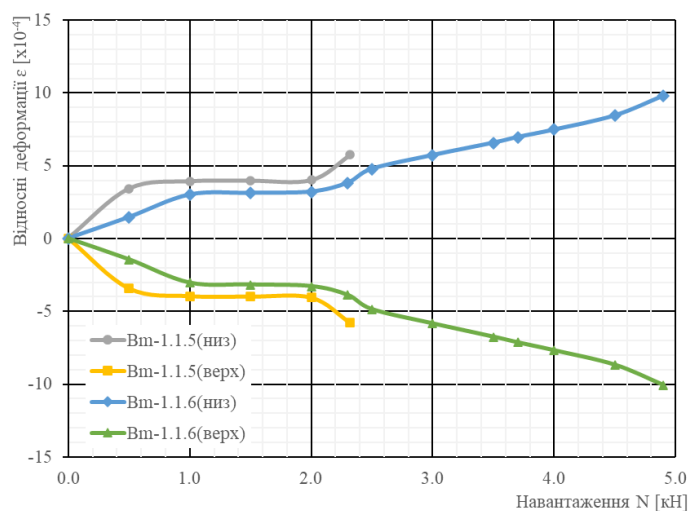


Рис. 3.6. Графік залежності відносних деформацій ε від прикладеного навантаження N для балок серії 1 Вм-1.1.5 та Вм-1.1.6.

На відміну від Вм-1.1.5, графік залежності відносних деформацій для балки Вм-1.1.6 мав більш лінійну форму. Середній приріст відносних деформацій на 1 кН прикладеного навантаження склав: $\Delta\varepsilon^{\text{верх}} = -2.06 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та

$\Delta\varepsilon^{\text{низ}} = 2.0 \cdot 10^{-4}$ для нижньої. При руйнівному навантаженні $N_u = 3.754$ кН, відносні деформації становили: $\varepsilon_u^{\text{низ}} = 9.81 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_u^{\text{верх}} = -10.08 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні.

Балки марки Вм-1.1.5 та Вм-1.1.6, зруйнувались аналогічно до попередньої. Руйнування розпочалось і розкриття тріщини у нижній найбільш розтягненій зоні, далі тріщина поширилась до верхньої зони. Балка Вм-1.1.5 зруйнувалась при навантаженні $N_u = 2.321$ кН, балка Вм-1.1.6 - $N_u = 4.900$ кН.

На рис.3.7 зображено графік залежності відносних деформацій від прикладеного навантаження для двошарових балок марки Вм-1.2.1 та Вм-1.2.2. Як видно із графіку, обидві балки мали характерні ділянки, а саме: доволі стрімкий приріст на початку прикладання навантаження, який потім переріс в полого ділянку. При певному навантаженні ця ділянка перейшла в лінійну із сталим приростом відносних деформацій.

Для балки марки Вм-1.2.1, від $N_{i-1} = 0.0$ до $N_i = 1.5$ кН була ділянка прямої залежності зміни відносних деформацій від прикладеного навантаження. При значення навантаження $N_i = 1.5$ кН, значення відносних деформацій становили: $\varepsilon_i^{\text{верх}} = -3.12 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та $\varepsilon_i^{\text{низ}} = 2.77 \cdot 10^{-4}$ для нижньої зони. Далі від $N_{i-1} = 1.5$ до $N_i = 4.0$ кН спостерігалась пряма ділянка графіку, майже без змін. Значення відносних деформацій при навантаженні $N_i = 4.0$ кН становили: $\varepsilon_i^{\text{верх}} = -3.36 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та $\varepsilon_i^{\text{низ}} = 3.06 \cdot 10^{-4}$ для нижньої зони. Від $N_{i-1} = 4.0$ та до руйнівного навантаження $N_u = 6.819$ кН графік був лінійний із постійним приростом відносних деформацій. Середній приріст відносних деформацій для даної ділянки на 1 кН прикладного навантаження склав: $\Delta\varepsilon^{\text{верх}} = -1.77 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та $\Delta\varepsilon^{\text{низ}} = 1.82 \cdot 10^{-4}$ для нижньої. При руйнівному навантаженні $N_u = 6.819$ кН, відносні деформації становили: $\varepsilon_u^{\text{низ}} = 8.19 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_u^{\text{верх}} = -8.34 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні.

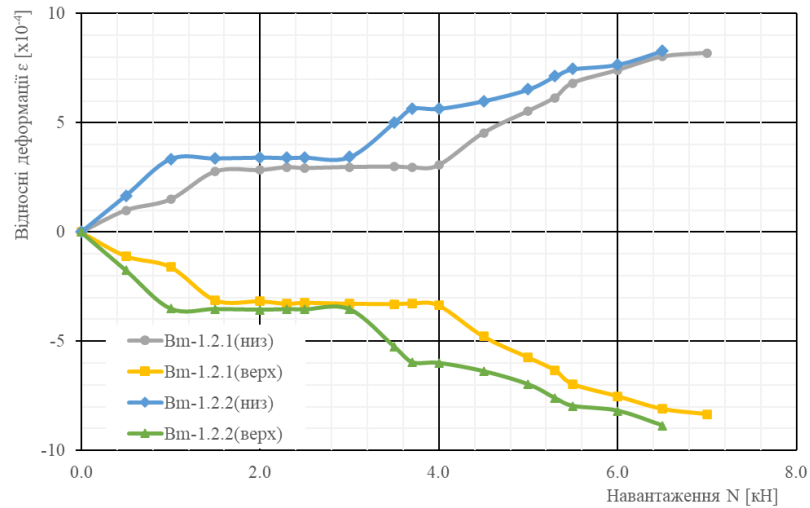


Рис. 3.7. Графік залежності відносних деформацій ϵ від прикладеного навантаження N для балок серії 1 Вм-1.2.1 та Вм-1.2.2.

Балка марки Вм-1.2.2 на ділянці $N_{i-1} = 0.0$ до $N_i = 1.0$ кН мала прямопропорційний приріст відносних деформацій від прикладеного навантаження. При значення навантаження $N_i = 1.0$ кН, значення відносних деформацій становили: $\epsilon_i^{\text{верх}} = -3.51 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та $\epsilon_i^{\text{низ}} = 3.35 \cdot 10^{-4}$ для нижньої зони. Від $N_{i-1} = 1.0$ до $N_i = 3.0$ кН спорерігалась пряма ділянка графіку, майже без змін. Значення відносних деформацій при навантаженні $N_i = 3.0$ кН становили: $\epsilon_i^{\text{верх}} = -3.53 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та $\epsilon_i^{\text{низ}} = 3.43 \cdot 10^{-4}$ для нижньої зони. Після прямої ділянки графік мав спочатку різкий приріст на ділянці від $N_{i-1} = 3.0$ до $N_i = 3.7$ кН із середнім значенням приросту на 1 кН прикладеного навантаження $\Delta\epsilon^{\text{верх}} = -3.47 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та $\Delta\epsilon^{\text{низ}} = 3.17 \cdot 10^{-4}$ для нижньої. Далі від $N_{i-1} = 3.7$ до $N_u = 6.976$ кН, значення середнього приросту на 1 кН навантаження зменшилось і становило $\epsilon^{\text{верх}} = -0.84 \cdot 10^{-4}$ для верхньої зони та $\Delta\epsilon^{\text{низ}} = 0.95 \cdot 10^{-4}$ для нижньої зони. При руйнівному навантаженні $N_u = 6.976$ кН, відносні деформації становили: $\epsilon_u^{\text{низ}} = 8.77 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\epsilon_u^{\text{верх}} = -9.49 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні

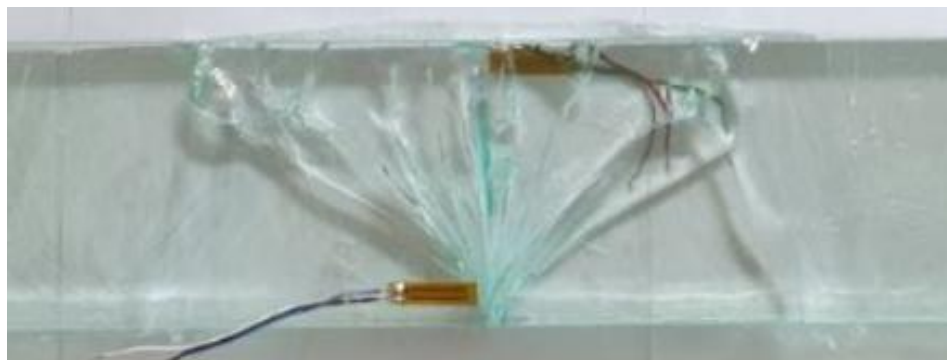
Балка Вм-1.2.1 була з двох шарів скла висотою 100 мм. Руйнування відбулось при досягненні навантаження $N_u = 6.819$ кН. Руйнування розпочалось із розкриття тріщини у нижній зоні в одному із шарів скла, яка поширилась далі до верхньої зони. Майже одразу відбулось і руйнування другого шару скла, у

аналогічному із першим шаром місії. Розташування тріщини у нижній зоні було під одним із роликів прикладання навантаження.

Балка марки Вm-1.2.2 зруйнувалась при досягненні навантаженні у $N_u = 6.819$ кН. Руйнування відбулось у нижній зоні посередині між роликками прикладання навантаження. За характером, руйнування було аналогічне до балки Вm-1.2.1.



а)



б)

Рис.3.8. Характер руйнування балок серії 1 марки: а)Вm-1.2.1; б) Вm-1.2.2.

3.2.2. Серія 1. Балки висотою 100 мм

Балки Вm-1.1.3, Вm-1.1.4, Вm-1.2.3, Вm-1.2.4, Вm-1.3.1 та Вm-1.3.2 були випробуванні із ступінчастим приростом навантаження за методикою описаною в п.2.3. Результати випробування балок серії подані у табл.3.7.

Експериментальні значення максимальних прогинів та вигинів були зафіксовані механічними приладами в момент руйнування. Протокол дослідження скляних балок із ступінчастим приростом навантаження поданий в додатку В.

Результати випробування балок серії 1

Марка	Руйнівне навант. N_u	Макс. прогин, u_z	Макс. вигин		Макс. момент M_u	Макс. напруження σ_u
			$u_{y.низ}$	$u_{y.верх}$		
	[кН]	[мм]	[мм]	[мм]	[кН·м]	[МПа]
Vm-1.1.3	2.21	1.16	-0.64	-4.20	0.39	22.69
Vm-1.1.4	2.21	0.96	-1.92	-5.64	0.39	22.83
Vm-1.2.3	4.21	0.74	-1.1	-1.67	0.74	21.24
Vm-1.2.3	5.71	1.16	-1.39	-3.45	1.09	31.34
Vm-1.3.1	7.21	1.05	1.98	2.08	1.27	24.42
Vm-1.3.2	8.21	1.15	0.92	1.0	1.44	27.52

Прогини балок змінювались прямо пропорційно до прикладеного навантаження. Не було помічено раптових їх приростів, тощо. Графік залежності прогинів від прикладеного навантаження для балок серії 1 поданий на рис.3.9. Для балок марки Vm-1.2.3, Vm-1.2.4, Vm-1.3.1 та Vm-1.3.2 графік залежності прогинів мав лінійний пологий характер. Для одношарових балок марки Vm-1.1.3 та Vm-1.1.4 – цей графік був більш стрімкої форми порівняно із двох- та трьох-шаровими балками. Значення максимальних прогинів для кожної балки серії й подані у табл. 3.7.

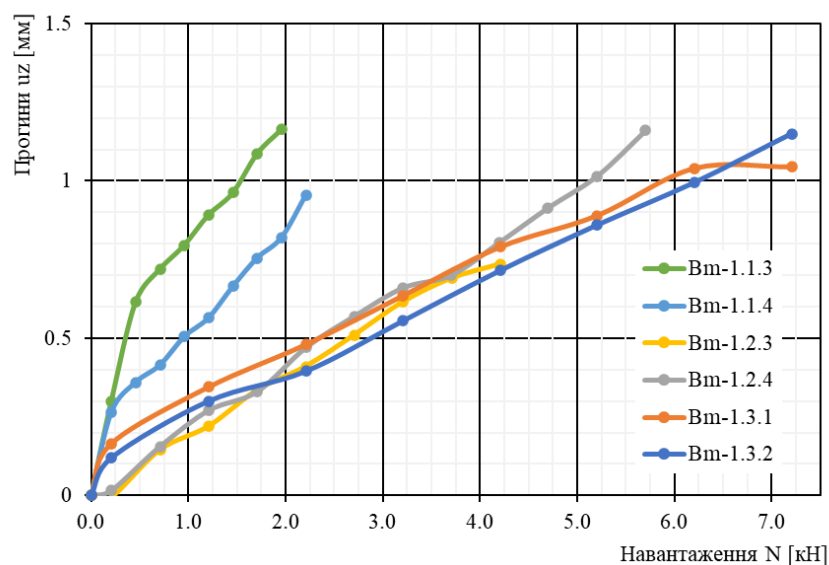
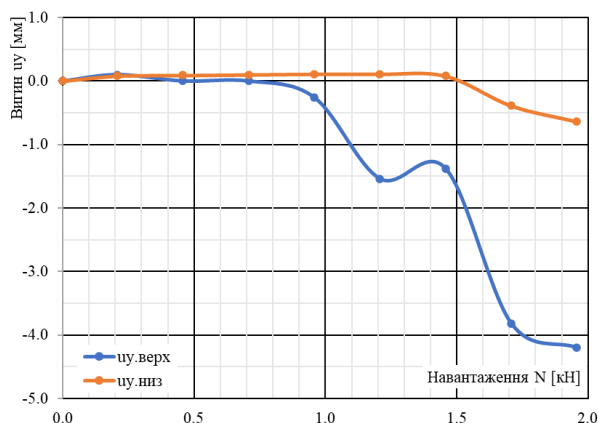


Рис.3.9. Графіки залежності прогинів u_z від прикладеного навантаження N для балок серії 1.

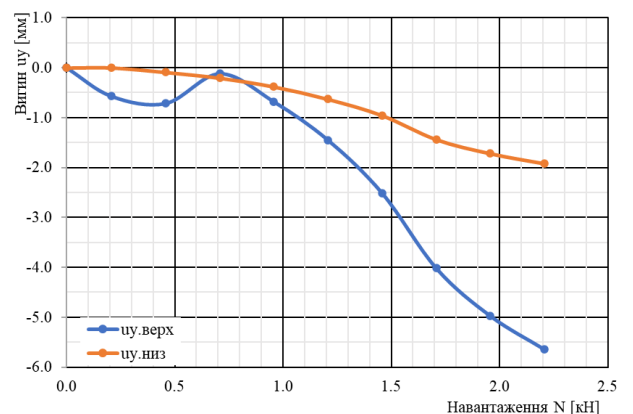
Одношарові балки серії 1

Балка марки Вм-1.1.3. У ході дослідження спостерігалось наступне: при дії навантаження від $N_{i-1} = 0$ до $N_i = 1.0$ кН бокова деформація балки Вм-1.1.3 (рис.3.10, а) була майже не змінною, а саме досягала значення $u_{y,\text{низ}.i} = 0.11$ мм у нижній зоні та $u_{y,\text{верх}.i} = 0.26$ мм у верхній зоні, при досягненні навантаження у $N_i = 1.0$ кН. Між значеннями навантаження $N_{i-1} = 1.0$ кН та $N_i = 1.2$ кН верхня зона балки отримала раптовий приріст бокової деформації – $\Delta u_{y,\text{верх}.i} = 1.54$ мм, в той час як нижня зона залишилась без приросту бокової деформації. Наступний «стрибок» у боковому вигині спостерігався на проміжку між $N_i = 1.4$ кН до $N_i = 1.7$ кН. Значення бокової деформації для верхньої зони склало $\Delta u_{y,\text{верх}.i} = 3.8$ мм, а для нижньої зони $\Delta u_{y,\text{низ}.i} = 0.39$ мм.

Схожа поведінка спостерігалась і для балки марки Вм-1.1.4 (рис.3.10, б). Починаючи із навантаження $N_i = 1.0$ кН була помітна суттєва різниця у приростах бокової деформації u_y . Так, на проміжку від $N_i = 1.0$ кН до $N_i = 1.5$ кН, бокова деформації верхньої зони змінилась на $\Delta u_{y,\text{верх}.i} = 1.84$ мм. На тому ж проміжку значення приросту деформації для нижньої зони балки склало $\Delta u_{y,\text{низ}.i} = 0.58$ мм. Що більш ніж у 3 рази менше за приріст бокової деформації верхньої зони. Тенденція більшого приросту бокової деформації верхньої зони зберігалась до самого руйнування балки.



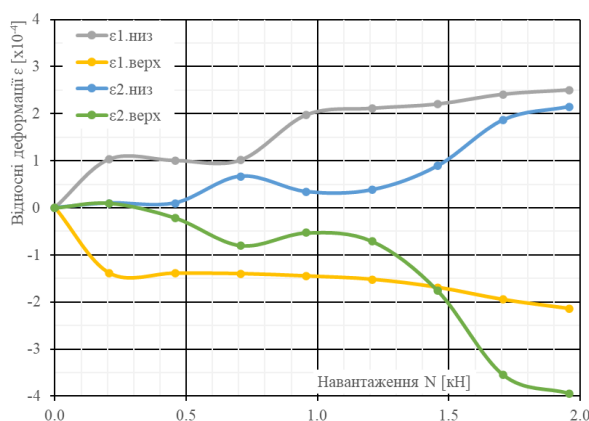
а



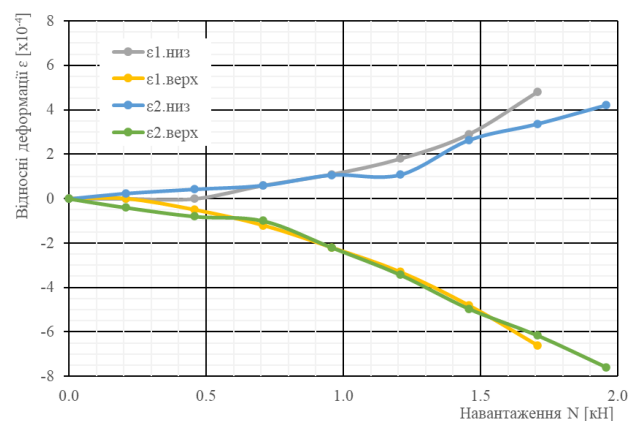
б

Рис. 3.10. Графіки залежності бокових деформацій u_y від прикладеного навантаження N для одношарових балок серії 1: а) Вм-1.1.3, б) Вм-1.1.4.

Відносні деформації балки марки Вм-1.1.3 (рис.3.11, а) на верхній та нижній зоні балки перед самим руйнуванням відрізнялись в при навантаженні близькому до руйнуючого. Так, для $N_i = 2.0$ кН, для грані 1: $\varepsilon_{1,i}^{\text{низ}} = 2.5 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1,i}^{\text{верх}} = -2.14 \cdot 10^{-4}$ у верхній; для грані 2: $\varepsilon_{2,i}^{\text{низ}} = 2.15 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2,i}^{\text{верх}} = -3.94 \cdot 10^{-4}$ у верхній відповідно. Помітні зміни в прирості відносних деформацій між верхньою та нижньою зоною відбувались спочатку на грані 1 на проміжку між навантаженнями від $N_{i-1} = 0.7$ кН до $N_i = 1.0$ кН, де відносні деформації грані 1 верхньої зони майже не зазнали змін від $\varepsilon_{1,i-1}^{\text{низ}} = 1.01 \cdot 10^{-4}$ до $\varepsilon_{1,i}^{\text{низ}} = 1.97 \cdot 10^{-4}$ (що склало приріст $\Delta\varepsilon_1^{\text{низ}} = 0.96 \cdot 10^{-4}$), в той час як відносні деформації верхньої зони грані 1 змінились всього на $\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.05 \cdot 10^{-4}$ (від $\varepsilon_{1,i-1}^{\text{верх}} = -1.40 \cdot 10^{-4}$ до $\varepsilon_{1,i}^{\text{верх}} = -1.45 \cdot 10^{-4}$). Наступний характерний момент приросту відносних деформацій стався на ділянці від $N_{i-1} = 1.2$ кН до $N_i = 1.7$ кН. Значення відносних деформацій верхньої зони грані 2 отримало значно більший приріст $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -2.84 \cdot 10^{-4}$ (від $\varepsilon_{2,i-1}^{\text{верх}} = -0.71 \cdot 10^{-4}$ до $\varepsilon_{2,i}^{\text{верх}} = -3.55 \cdot 10^{-4}$). В той час як у нижній зоні даної грані вони змінились всього на $\Delta\varepsilon_2^{\text{низ}} = 1.49 \cdot 10^{-4}$ (від $\varepsilon_{2,i-1}^{\text{низ}} = 0.38 \cdot 10^{-4}$ до $\varepsilon_{2,i}^{\text{низ}} = 1.87 \cdot 10^{-4}$). Характерно, що проміжки змін відносних деформацій у балці Вм-1.1.3 збігається із змінами бокової деформації (рис.3.10, а).



а



б

Рис. 3.11. Графіки залежності відносних деформацій ε від прикладеного навантаження N для одношарових балок серії 1: а) Вм-1.1.3, б) Вм-1.1.4.

Для балки Вм-1.1.4, на відміну від балки Вм-1.1.3, графік відносних деформацій (рис.3.11, б), мав більш лінійний характер. За допомогою КЦЗ вдалось зафіксувати значення відносних деформацій в момент близький до руйнування при $N_i = 2.2$ кН для грані 2, а саме $\varepsilon_{2,i}^{\text{низ}} = 4.2 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2,i}^{\text{верх}} = -7.59 \cdot 10^{-4}$ у верхній відповідно. Різниця у прирості відносних деформацій для верхньої та нижньої зони розпочалась на ділянці від $N_{i-1} = 0.7$ кН до $N_i = 1.0$ кН. Так, у верхній зоні для грані 1 зміна відносних деформацій становила $\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -1.0 \cdot 10^{-4}$ (від $\varepsilon_{1,i-1}^{\text{верх}} = -1.20 \cdot 10^{-4}$ до $\varepsilon_{1,i}^{\text{верх}} = -2.2 \cdot 10^{-4}$); у нижній зоні на цьому проміжку відбулась зміна на $\Delta\varepsilon_1^{\text{низ}} = 0.5 \cdot 10^{-4}$ (від $\varepsilon_{1,i-1}^{\text{низ}} = 0.6 \cdot 10^{-4}$ до $\varepsilon_{1,i}^{\text{низ}} = 1.1 \cdot 10^{-4}$). Таке ж явище спостерігалось і для грані 2, зміна відносних деформацій на даному проміжку становила: $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -1.2 \cdot 10^{-4}$ (від $\varepsilon_{2,i-1}^{\text{верх}} = -1.0 \cdot 10^{-4}$ до $\varepsilon_{2,i}^{\text{верх}} = -2.2 \cdot 10^{-4}$) для верхньої зони та для нижньої зони $\Delta\varepsilon_2^{\text{низ}} = 0.47 \cdot 10^{-4}$ (від $\varepsilon_{2,i-1}^{\text{низ}} = 0.6 \cdot 10^{-4}$ до $\varepsilon_{2,i}^{\text{низ}} = 1.07 \cdot 10^{-4}$).

Характер руйнування балок марки Вм-1.1.3 та Вм-1.1.4 – відповідав усім балкам серії 1. У нижній зоні утворювалась тріщина, що в подальшому отримала розвиток до верхньої зони (рис.3.12). Для балок Вм-1.1.3 та Вм-1.1.4 зусилля руйнування становило $N_u = 2.21$ кН.



а

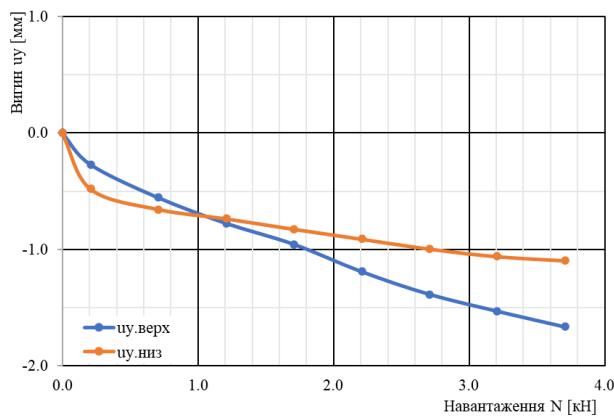


б

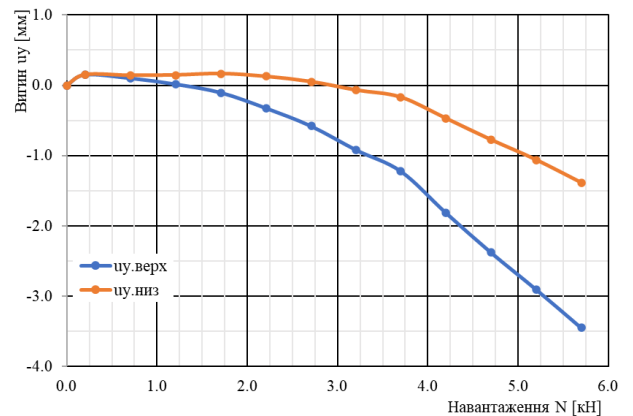
Рис. 3.12. Руйнування балок серії 1: а) Вм-1.1.3, б) Вм-1.1.4.

Двошарові балки серії 1

Графік бокових деформація балки Вм-1.2.3 (рис.3.13, а), в порівнянні із одношаровими балками, мав пологий лінійний характер, без раптових змін під час експерименту. Максимальні деформації бокового вигину при навантаженні близькому для руйнуючого $N_i = 3.71$ кН, склали $u_{y,низ.i} = 1.1$ мм у нижній зоні та $u_{y,верх.i} = 1.67$ мм у верхній зоні. Помітна різниця деформацій між нижньою та верхньою зоною зафіксовані при навантаженні $N_{i-1} = 1.71$ кН та $N_i = 2.21$ кН, де різниця між приростом бокої деформації склала $\Delta u_{y,верх.i} = 0.24$ мм у верхній зоні та $\Delta u_{y,низ.i} = 0.09$ мм у нижній зоні. Тобто бокова деформація верхньої зони збільшилась більш ніж у 2.5 рази у порівнянні із нижньою зоною.



а



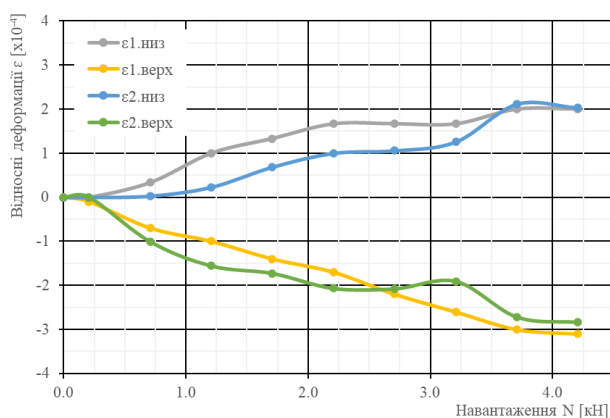
б

Рис. 3.13. Графіки залежності бокових деформацій u_y від прикладеного навантаження N для одношарових балок серії 1: а) Вм-1.2.3, б) Вм-1.2.4.

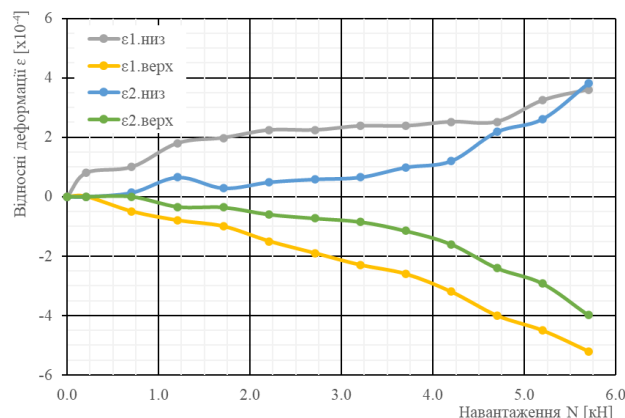
Для балки Вм-1.2.3 графік бокових деформацій (рис.3.13, б), як і для балки Вм-1.2.4 не мав раптових змін. Максимальний вигин при навантаженні близькому до руйнівного становив $N_i = 5.7$ кН, склав $u_{y,низ.i} = 1.39$ мм у нижній зоні та $u_{y,верх.i} = 3.45$ мм у верхній. Різниця у бокових деформаціях між верхньою та нижньою зонами, як і для балки Вм-1.2.3, розпочалась при навантаженні $N_{i-1} = 1.71$ кН та $N_i = 2.21$ кН. Різниця між приростом у верхній зоні при цьому склала $\Delta u_{y,верх.i} = 0.22$ мм та $\Delta u_{y,низ.i} = 0.09$ мм знизу. Бокова деформація верхньої зони при цих навантаженнях мала більший приріст протягом аж до руйнування балки.

Графіки відносних деформації обох двошарових балок серії 1 Вm-1.2.3 та Вm-1.2.4 (рис.3.14, а), мали майже ідентичний вигляд – в обох випадках вони змінювались лінійно без раптових стрибків та мали стабільний приріст як для нижньої так і для верхньої зони.

Для балки Вm-1.2.3 середній приріст відносних деформацій для верхньої зони грані 1 склав $\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.34 \cdot 10^{-4}$; для грані 2 – $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -0.32 \cdot 10^{-4}$. Для нижньої зони такий приріст склав: $\Delta\varepsilon_1^{\text{низ}} = 0.22 \cdot 10^{-4}$ – для грані 1 та $\Delta\varepsilon_2^{\text{низ}} = 0.23 \cdot 10^{-4}$ для грані 2. Максимальні значення відносних деформацій були записані при значенні навантаження близькому до руйнівного $N_i = 4.21$ кН, для грані 1: $\varepsilon_{1.i}^{\text{низ}} = 2.0 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -3.1 \cdot 10^{-4}$ у верхній; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 2.03 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -2.84 \cdot 10^{-4}$ у верхній відповідно.



а



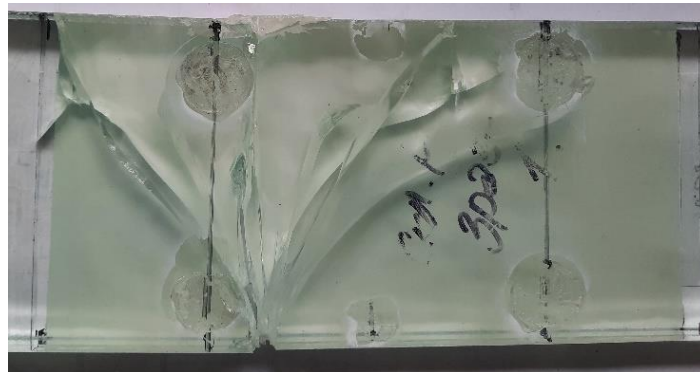
б

Рис. 3.14. Графіки залежності відносних деформацій ε від прикладеного навантаження N для двошарових балок серії 1: а) Вm-1.2.3, б) Вm-1.2.4.

У свою чергу, для балки Вm-1.2.4 (рис.3.14, б) середній приріст відносних деформацій становив, для грані 1: $\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.43 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_1^{\text{низ}} = 0.30 \cdot 10^{-4}$ – знизу, для грані 2: $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -0.33 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_2^{\text{низ}} = 0.32 \cdot 10^{-4}$ у нижній. Максимальні значення відносних деформацій були записані при значенні навантаження близькому до руйнівного $N_i = 5.7$ кН, для грані 1: $\varepsilon_{1.i}^{\text{низ}} = 3.6 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -5.2 \cdot 10^{-4}$ у верхній; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 3.82 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -3.98 \cdot 10^{-4}$ у верхній відповідно. Важливо зазначити, що при навантаженні $N_i = 4.2$ кН, а це навантаження близьке до

руйнівного для балки Вm-1.2.3, значення відносних деформації балки Вm-1.2.4 становили близькі значення до балки Вm-1.2.3, а саме $\varepsilon_{1.Вm-1.2.3}^{\text{верх}} = -3.1 \cdot 10^{-4}$ - $\varepsilon_{1.Вm-1.2.3}^{\text{верх}} = -3.2 \cdot 10^{-4}$, для верхньої зони грані 1 та $\varepsilon_{1.Вm-1.2.3}^{\text{низ}} = 2.03 \cdot 10^{-4}$ - $\varepsilon_{1.Вm-1.2.3}^{\text{низ}} = 2.52 \cdot 10^{-4}$, для нижньої зони.

Двошарові балки серії 1 із марками Вm-1.2.3 та Вm-1.2.3 мали схожий характер руйнування як для балок серії 1 (рис.3.15).



а



б

Рис. 3.15. Руйнування балок серії 1: а) Вm-1.2.3, б) Вm-1.2.4.

Навантаження руйнування склало $N_u = 4.21$ кН для балки Вm-1.2.3 та $N_u = 5.71$ кН для балки Вm-1.2.3. Обидві балки були зруйновані пошарово, із невеликим (до 10 секунд) інтервалом руйнування наступного шару скла. Для балки Вm-1.2.3 руйнування першого та другого шару скла відбулось в одному і тому ж місці – посередині між роликами прикладання навантаження. Тоді, для балки Вm-1.2.3 первинна руйнація першого шару скла відбулась знизу на краю зони чистого згину. Наступний шар зруйнувався на відстані 5 сантиметрів від місця руйнування попереднього шару скла.

Тришарові балки серії 1

Для обох тришарових балок серії 1 графік бокових вигинів (рис.3.16) набув пологої лінійної форми та не мав жодних раптових приростів. Для балки Вм-1.3.1 максимальний боковий вигин при навантаженні близькому до руйнівного при $N_i = 7.2$ кН, склав $u_{y,низ.i} = 2.08$ мм у нижній зоні та $u_{y,верх.i} = 1.98$ мм у верхній зоні.

Балка Вм-1.3.2 (рис.3.16, б) мала максимальний боковий вигин при навантаженні близькому до руйнівного, при $N_i = 7.2$ кН $u_{y,низ.i} = 0.92$ мм у нижній зоні та $u_{y,верх.i} = 1.0$ мм у верхній зоні.

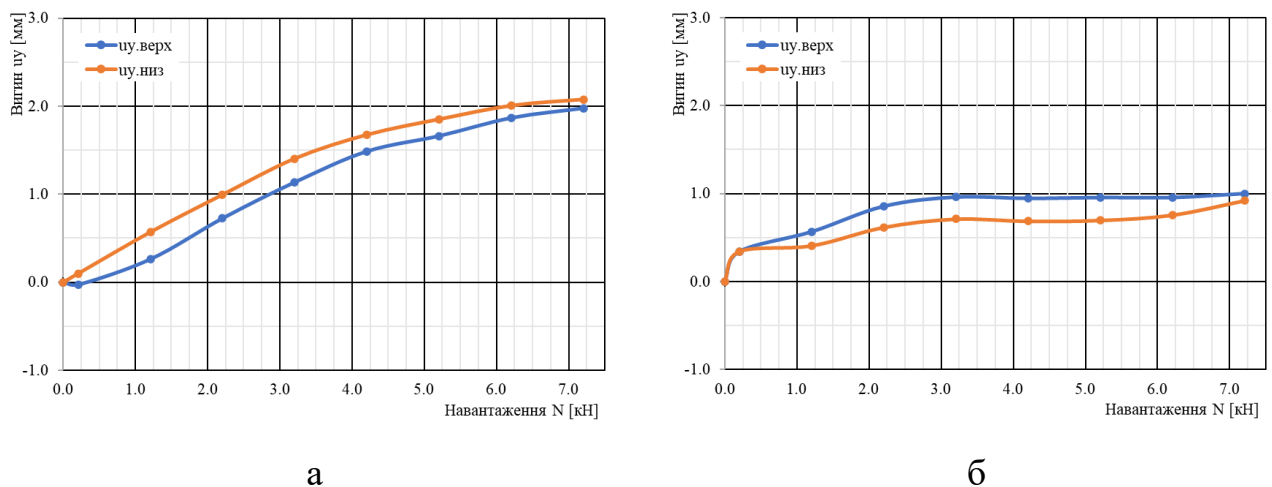


Рис. 3.16. Графіки залежності бокових деформацій u_y від прикладеного навантаження N для тришарових балок серії 1: а) Вм-1.3.1, б) Вм-1.3.2.

Відносні деформації у тришарових балках серії 1 (рис.3.17), мали лінійний характер приросту без раптових змін. Приріст відносних деформацій відбувався стало від початку експерименту і до моменту руйнування балок.

У балці Вм-1.3.1 відносні деформації верхньої зони змінювались із більшим приростом ніж відносні деформації нижньої зони. Середній приріст становив, для грані 1: $\Delta \varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.42 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta \varepsilon_1^{\text{низ}} = 0.29 \cdot 10^{-4}$ – у нижній зоні, для грані 2: $\Delta \varepsilon_2^{\text{верх}} = -0.43 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta \varepsilon_2^{\text{низ}} = 0.32 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні. Значення відносних деформацій при значенні навантаження близькому до руйнівного $N_i = 7.2$ кН, для грані 1: $\varepsilon_{1.i}^{\text{низ}} = 2.3 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -3.36 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 2.55 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -3.45 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні відповідно.

Для балки Вм-1.3.2 приріст відносних деформацій відбувався майже однаково для верхньої та нижньої зони і склав, для грані 1: $\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.20 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_1^{\text{низ}} = 0.33 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні, для грані 2: $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -0.30 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_2^{\text{низ}} = 0.17 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні. Відносні деформації при навантаженні яке було найближче до руйнівного $N_i = 7.2$ кН, для грані 1: $\varepsilon_{1,i}^{\text{низ}} = 2.6 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1,i}^{\text{верх}} = -1.6 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні; для грані 2: $\varepsilon_{2,i}^{\text{низ}} = 1.34 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2,i}^{\text{верх}} = -2.42 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні відповідно.

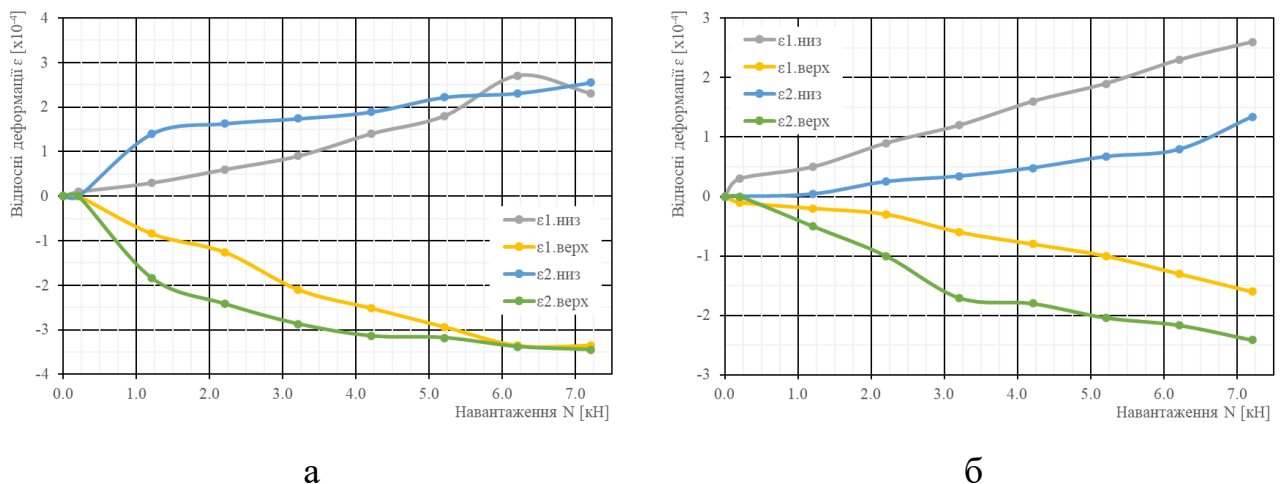


Рис. 3.17. Графіки залежності відносних деформацій ε від прикладеного навантаження N для тришарових балок серії 1: а) Вм-1.3.1, б) Вм-1.3.2.

Балки серії 1 із трьома шарами скла марки Вм-1.3.1 та Вм-1.3.2 мали схожий характер руйнування як і у попередніх балок серії, а саме: першочергове утворення тріщини в розтягненій зоні в одному із шарів і подальше поступове руйнування кожного наступного шару (рис.3.18). В обох балках перші тріщини появились у зоні чистого згину. Для балки Вм-1.3.1 місце руйнування першого та наступних шарів відбулось в одному і тому ж місці – між роликами прикладання навантаження, без зміщення. Для балки Вм-1.3.2 руйнування першого шару також відбулось між роликами прикладання навантаження. Руйнування другого та третього шару відбулось в межах зони чистого згину, але із зміщенням місця руйнування попереднього шару на 8 сантиметрів. Руйнівне навантаження для балок становило: $N_u = 7.21$ кН для балки Вм-1.3.1 та $N_u = 8.21$ кН для балки Вм-1.3.2.



а



б

Рис. 3.18. Руйнування балок серії 1: а) Vm-1.3.1, б) Vm-1.3.2.

3.2.3. Серія 2. Балки висотою 150 мм

Дослідження серії 2 складалось із дослідження балок висотою 150 мм із марками: Vm-2.1.1, Vm-2.1.2, Vm-2.2.1, Vm-2.2.2, Vm-2.3.1 та Vm-2.3.2. Балки були випробуванні із ступінчастим приростом навантаження за методикою описаною в п.2.3. Результати досліджень балок серії 2 подані у табл.3.8.

Значення максимальних прогинів та вигинів були зафіксовані механічними приладами в момент руйнування. Протокол дослідження скляних балок із ступінчастим приростом навантаження поданий в додатку В.

Прогини балок змінювались лінійно, без раптових приростів при збільшенні навантаження. Графіки залежності прогинів від прикладеного навантаження подано на рис. 3.19. Як видно із графіків, для балок серії 1 висотою 150 мм, характер зміни прогину від навантаження описувався схожою прямою незалежно від кількості шарів скла в балках, що не спостерігалось для одношарових балок

серії 1, приріст прогинів у яких відрізнявся. Значення прогинів в балок серії 2 при навантаженні близькому до руйнівного подані на в табл. 3.8.

Табл. 3.8

Результати випробування балок серії 2

Марка	Руйнівне навант. N_u [кН]	Макс. прогин, u_z [мм]	Макс. вигин		Макс. момент M_u [кН·м]	Макс. напруження σ_u [МПа]
			$u_{y, \text{низ}}$ [мм]	$u_{y, \text{верх}}$ [мм]		
Bm-2.1.1	8.2	1.3	0.91	-1.27	1.44	37.31
Bm-2.1.2	8.2	1.18	0.16	-0.735	1.44	37.59
Bm-2.2.1	13.2	1.54	-0.62	-1.27	2.32	29.77
Bm-2.2.2	12.2	1.38	2.06	1.54	2.15	28.41
Bm-2.3.1	15.2	1.49	-0.18	-0.3	2.68	22.98
Bm-2.3.2	16.2	1.79	-0.79	-1.60	2.85	24.29

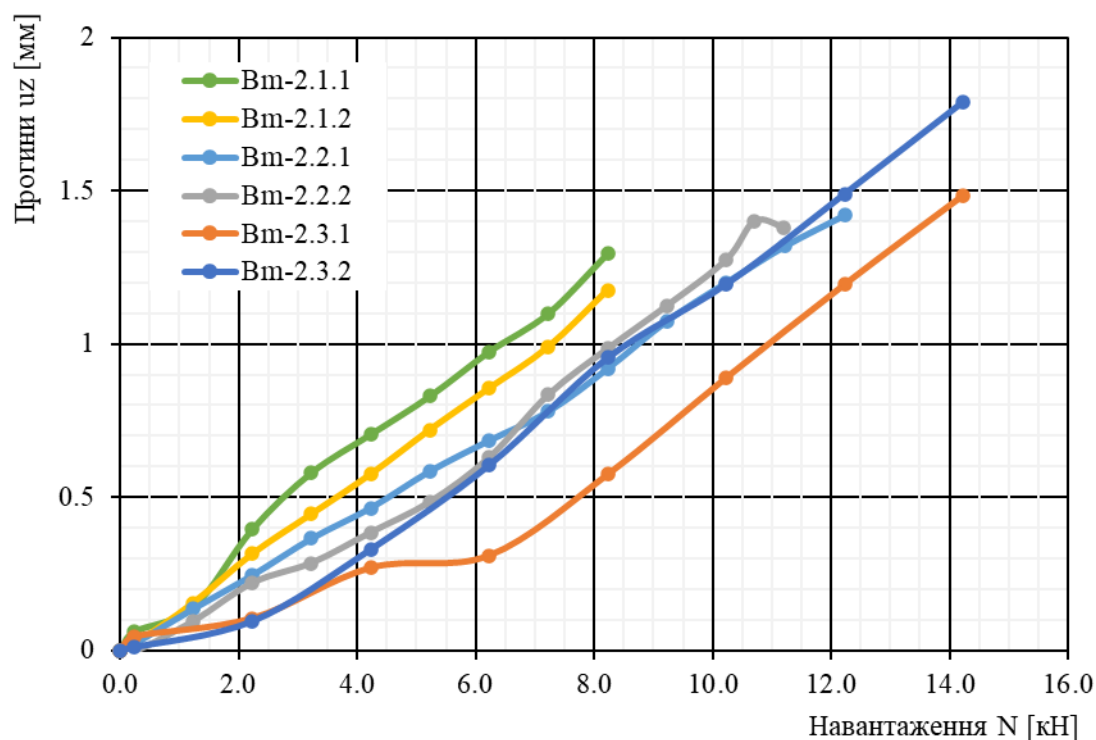
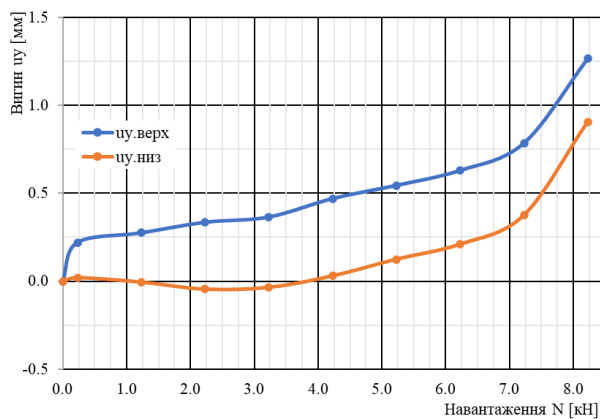


Рис.3.19. Графіки залежності прогинів u_z від прикладеного навантаження N для балок серії 2.

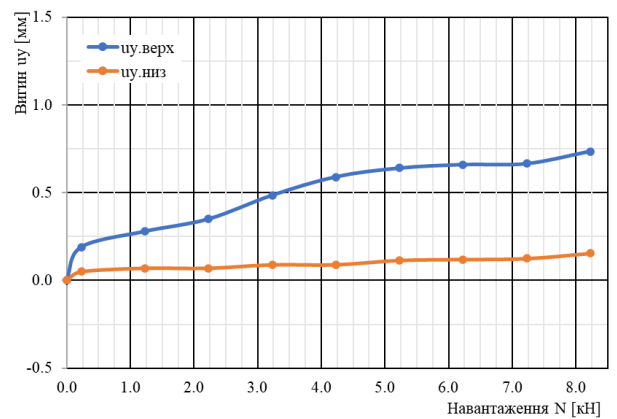
Одношарові балки серії 2

Графік залежності бокової деформації від прикладеного навантаження балки Вм-1.1.3 (рис.3.20, а) мав три характерні ділянки. На першій, при дії навантаження від $N_{i-1} = 0$ до $N_i = 0.2$ кН значення бокового вигину у верхній зоні відразу змінилось на 0.22 мм, при цьому значення бокової деформації нижньої зони залишалось майже без змін, всього 0.02 мм. Наступна ділянка, при навантаженнях від $N_{i-1} = 0.2$ до $N_i = 7.2$ кН – значення бокового вигину як для нижньої так і верхньої зони змінювалось лінійно із середнім приростом в $\Delta u_{y,\text{верх}} = 0.1$ мм/кН для верхньої зони та $\Delta u_{y,\text{низ}} = 0.05$ мм/кН для нижньої зони.

На останній ділянці, для балки Вм-2.1.1, бокова деформація при навантаженні від $N_{i-1} = 7.2$ до $N_i = 8.2$ кН (останній запис показів приладів перед руйнуванням), у верхній та нижній зоні отримали різкий приріст бокової деформації: $\Delta u_{y,\text{верх}} = 0.33$ мм/кН для верхньої зони та $\Delta u_{y,\text{низ}} = 0.37$ мм/кН для нижньої зони. Максимальна записана бокова деформація для балки Вм-2.1.1 становила: у верхній зоні $u_{y,\text{верх},i} = 1.27$ мм та у нижній зоні $u_{y,\text{низ},i} = 0.91$ мм.



а



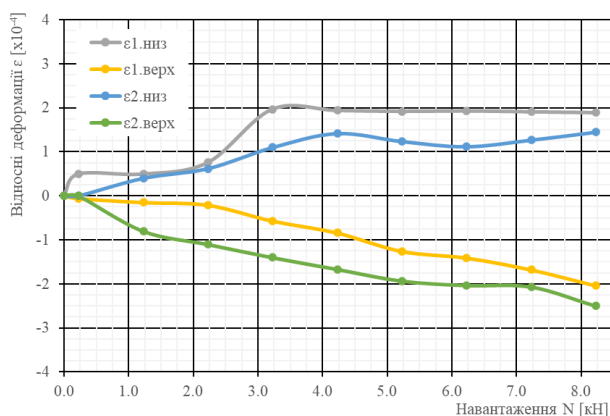
б

Рис. 3.20. Графіки залежності бокових деформацій u_y від прикладеного навантаження N для одношарових балок серії 2: а) Вм-2.1.1, б) Вм-2.1.2.

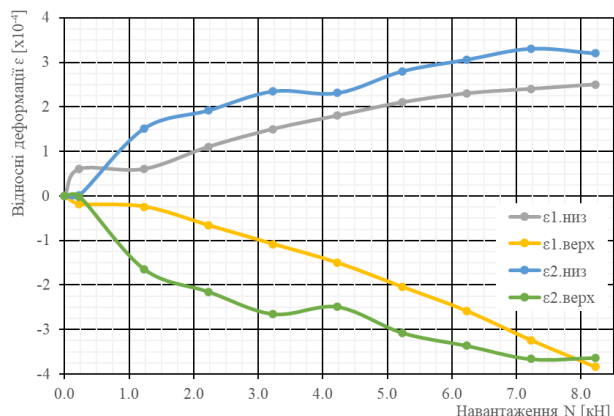
Бокова деформація балок Вм-2.1.2 (рис.3.20, б) була схожою до бокової деформації балки Вм-2.1.1, з тією різницею, що для даної балки не був характерний раптовий приріст бокової деформації на фінальному етапі дослідження даної балки. Так, при дії навантаження від $N_{i-1} = 0$ до $N_i = 0.2$ кН значення бокового вигину у

верхній зоні відразу змінилось на 0.19 мм, відповідно у нижній зоні приріст бокової деформації склав 0.07 мм. Далі і до самого руйнування балок, графік бокової деформації мав лінійний характер із середнім приростом бокової деформації в $\Delta u_{y,\text{верх}} = 0.07$ мм/кН для верхньої зони та $\Delta u_{y,\text{низ}} = 0.01$ мм/кН для нижньої зони. Максимальна записана бокова деформація для балки Вм-2.1.2 становила: у верхній зоні $u_{y,\text{верх},i} = 0.735$ мм та у нижній зоні $u_{y,\text{низ},i} = 0.16$ мм.

Відносні деформації балки Вм-2.1.1 у нижній та у верхній зоні змінювались по різному (рис.3.21, а). Для верхньої зони був характерний лінійний графік приросту відносних деформацій для обох граней балки. В той час, для нижньої зони відносні деформації набули певного приросту та далі до самого руйнування мали пологую ділянку. У нижній зоні при навантаженні від $N_{i-1} = 0$ до $N_i = 2.2$ кН, відносні деформації змінювались лінійно, зміна значення відносних деформацій у нижній зоні відбулась від нуля до $\varepsilon_{1,i}^{\text{низ}} = 0.76 \cdot 10^{-4}$ для грані 1 та $\varepsilon_{2,i}^{\text{низ}} = 0.62 \cdot 10^{-4}$ для грані 2. Далі, при зміні навантаження від $N_{i-1} = 2.2$ до $N_i = 4.2$ кН, відносні деформації нижньої зони змінились на $1.21 \cdot 10^{-4}$ для грані 1 та $0.8 \cdot 10^{-4}$ для грані 2.



а



б

Рис. 3.21. Графіки залежності відносних деформацій ε від прикладеного навантаження N для одношарових балок серії 2: а) Вм-2.1.1, б) Вм-2.1.2.

На наступних етапах навантаження приріст відносних деформацій нижньої зони майже не спостерігався. Зміна відносних деформацій у верхній зоні відбувалась із сталим приростом на кожному із етапів завантаження, а саме:

$\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.23 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ для грані 1 та $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -0.28 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ для грані 2. Максимальні записані відносні деформації для балки Вм-2.1.1, при $N_i = 8.2$ кН, для грані 1: $\varepsilon_{1.i}^{\text{низ}} = 1.89 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -2.04 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 1.45 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -2.50 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні. приріст відносних деформацій відбувався майже однаково для верхньої та нижньої зони і склав, для грані 1: $\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.43 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_1^{\text{низ}} = 0.28 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ у нижній зоні, для грані 2: $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -0.40 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_2^{\text{низ}} = 0.36 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ у нижній зоні. Відносні деформації при навантаженні яке було найближче до руйнівного $N_i = 8.2$ кН склали для грані 1: $\varepsilon_{1.i}^{\text{низ}} = 2.5 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -3.84 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 3.32 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -3.63 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні.

За характером руйнування одношарові балки серії 2, марки Вм-2.1.1 та Вм-2.1.2 (рис.3.22), були такі ж як і балки серії 2 та серії 1.



а



б

Рис. 3.22. Руйнування балок серії 2: а) Вм-2.1.1, б) Вм-2.1.2.

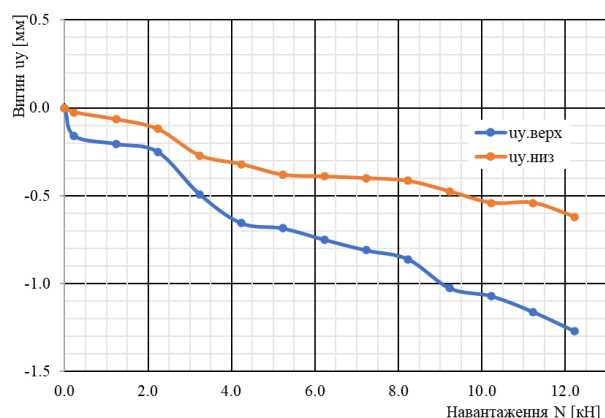
Початком руйнування була нижня тріщина, яка в подальшому поширювалась до верхньої зони. Балки Вм-2.1.1 та Вм-2.1.2 зруйнувались при

однаковому навантаженні на витримці. Значення руйнівного навантаження становило $N_u = 8.2$ кН. Нижня в обох балках утворилась в зоні чистого згину між роликками прикладання навантаження.

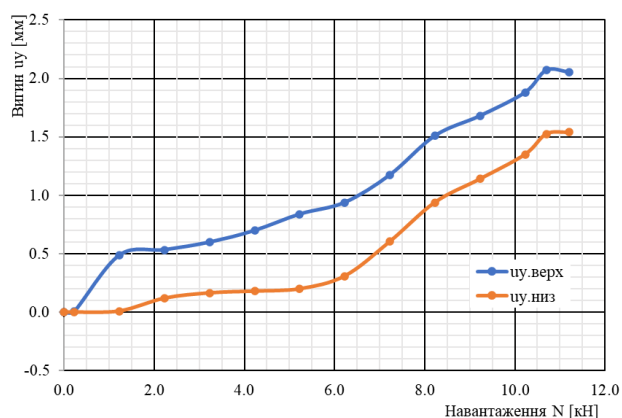
Двошарові балки серії 2

Графік бокових деформацій балки Вм-2.2.1 (рис.3.23, а) мав лінійний характер, без раптових змін в бокових деформацій. Максимальні бокові деформації які були записані при навантаженні близькому до руйнівного при $N_i = 12.2$ кН склали: $u_{y,низ.i} = -0.62$ мм у нижній зоні та $u_{y,верх.i} = -1.27$ мм у верхній зоні.

Бокова деформація верхньої зони одразу почала збільшуватись на кожному ступені навантаження. Середній приріст бокових деформацій для балки Вм-2.2.1 на проміжку між від $N_{i-1} = 0$ до $N_i = 12.2$ кН становив: $\Delta u_{y,верх} = -0.1$ мм/кН для верхньої зони та $\Delta u_{y,низ} = -0.05$ мм/кН для нижньої зони.



а



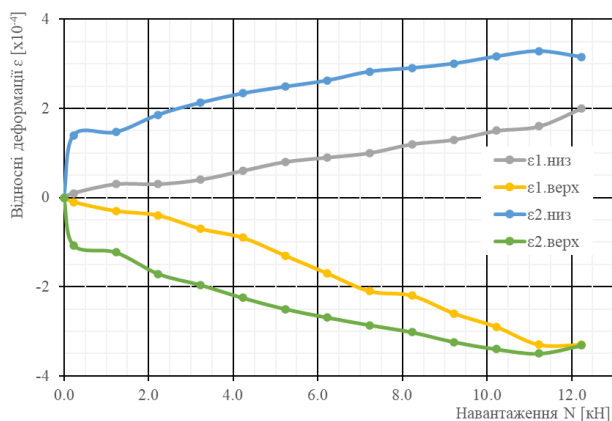
б

Рис. 3.23. Графіки залежності бокових деформацій u_y від прикладеного навантаження N для двошарових балок серії 2: а) Вм-2.2.1, б) Вм-2.2.2.

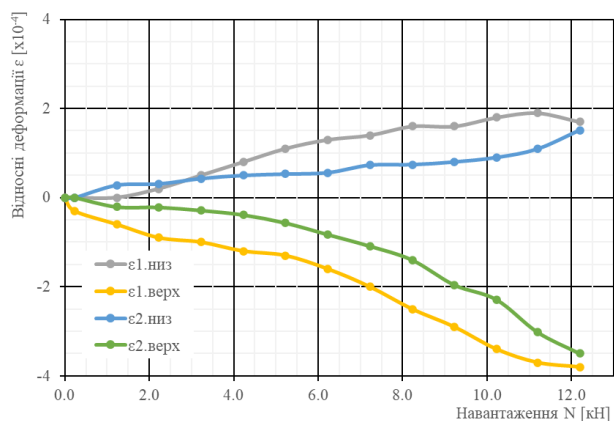
Бокові деформації балки Вм-2.2.2 (рис.3.23, б), також мали лінійний характер зміни без раптових змін для нижньої зони. Для верхньої зони був зафіксований видимий приріст на проміжку від $N_{i-1} = 0.2$ до $N_i = 1.2$ кН, бокова деформація балки змінилась на 0.49 мм, нижня зона залишилась без змін. Після $N_i = 1.2$ кН і до самого руйнування характер графіку бокових деформацій верхньої зони відповідав характеру нижньої зони. Середній приріст бокової деформації для

верхньої зони після значення $N_i = 1.2$ кН становив $\Delta u_{y.верх} = 0.14$ мм/кН для верхньої зони та $\Delta u_{y.низ} = 0.14$ мм/кН для нижньої зони на аналогічному відрізку. Максимальне значення бокового вигину для балки Вм-2.2.2 було зафіксовано при навантаженні $N_i = 11.2$ кН: $u_{y.низ.i} = 1.54$ мм у нижній зоні та $u_{y.верх.i} = 2.06$ мм у верхній зоні.

Графіки відносних деформацій для двошарових балок серії 2 (рис.3.24), мали здебільшого лінійний характер без раптових приростів, за винятком першого етапу завантаження балки Вм-2.2.1. У балці Вм-2.2.1 (рис.3.24, а) на ділянці графіку при навантаженні від $N_{i-1} = 0.0$ до $N_i = 0.2$ кН, значення відносних деформацій змінилось для грані 2 від 0: $\varepsilon_{2.i}^{низ} = 1.4 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{верх} = -1.07 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні. На противагу грані 2, відносні деформації грані 1 змінювались лінійно протягом всього експерименту. Середній приріст відносних деформацій для грані 1 склав: $\Delta \varepsilon_1^{верх} = -0.25 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ у верхній зоні, $\Delta \varepsilon_1^{низ} = 0.15 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ у нижній зоні. Для грані 2, починаючи від $N_i = 0.2$ кН до руйнування зразка середній приріст відносних деформацій склав $\Delta \varepsilon_1^{верх} = -0.19 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ у верхній зоні, $\Delta \varepsilon_1^{низ} = 0.15 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ у нижній зоні.



а



б

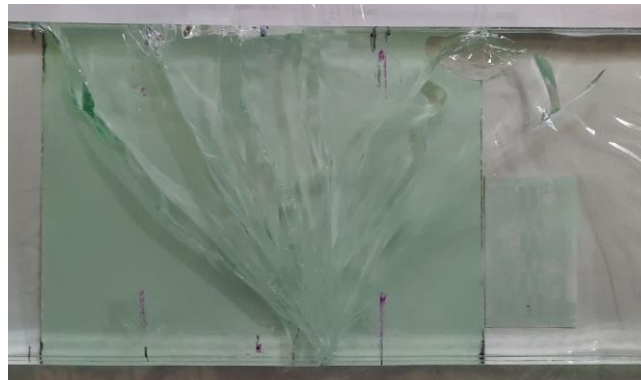
Рис. 3.24. Графіки залежності відносних деформацій ε від прикладеного навантаження N для двошарових балок серії 2: а) Вм-2.2.1, б) Вм-2.2.2.

Максимальні відносні деформації для балки Вм-2.2.1 були записані при навантаженні близькому до руйнівного при $N_i = 12.2$ кН та становили: для грані 1:

$\varepsilon_{1.i}^{\text{низ}} = 2.0 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -3.3 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 3.35 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -3.6 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні.

Відносні деформації балки Вм-2.2.2 (рис.3.24, б) змінювались лінійно, із помітним збільшення приросту верхньої зони. Даний приріст склав: для грані 1: $\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.29 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_1^{\text{низ}} = 0.15 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ у нижній зоні, для грані 2: $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -0.27 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_2^{\text{низ}} = 0.11 \cdot \frac{10^{-4}}{\text{кН}}$ у нижній зоні. Відносні деформації при навантаженні яке було найближче до руйнівного $N_i = 12.2$ кН склали для грані 1: $\varepsilon_{1.i}^{\text{низ}} = 1.7 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -3.8 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 1.51 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -3.5 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні.

Характер руйнування балок відповідав руйнуванню двошарових балок інших серій: першочергове утворення тріщини в розтягненій зоні в одному із шарів і подальше поступове руйнування кожного наступного шару (рис.3.25).



а



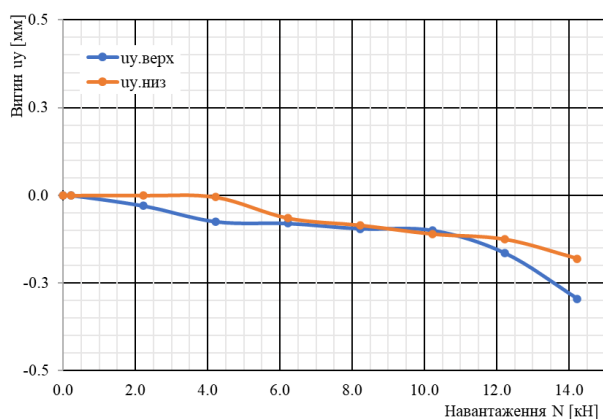
б

Рис. 3.25. Руйнування балок серії 2: а) Вм-2.2.1, б) Вм-2.2.2.

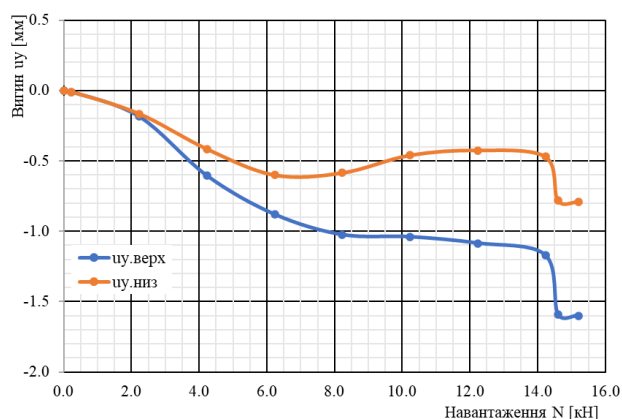
Обидві балки зруйнувались пошарово, із невеликим (до 10 секунд) інтервалом руйнування наступного шару скла. Для балки Вм-1.2.1 руйнування першого та другого шару скла відбулось в одному і тому ж місці – посередині між роликками прикладання навантаження. Для балки Вм-2.2.2 первинне руйнування першого шару скла відбулось знизу на краю зони чистого згину. Наступний шар зруйнувався на відстані 5 сантиметрів від місця руйнування попереднього шару скла і вийшов за межі зони між валиками. Значення руйнівного навантаження склало $N_u = 13.2$ кН для балки Вм-2.2.1 та $N_u = 12.2$ кН для балки Вм-2.2.2.

Тришарові балки серії 2

Графік бокових деформацій балки Вм-2.3.1 (рис.3.26, а) був лінійного вигляду та величини записаних бокових деформацій верхньої та нижньої зони були малими за значеннями в порівнянні з іншими дослідженими балками. Максимальний боковий вигин при навантаженні близькому до руйнівного склав при $N_i = 14.2$ кН $u_{y,низ.i} = 0.18$ мм у нижній зоні та $u_{y,верх.i} = 0.30$ мм у верхній зоні.



а



б

Рис. 3.26. Графіки залежності бокових деформацій u_y від прикладеного навантаження N для тришарових балок серії 2: а) Вм-2.3.1, б) Вм-2.2.2.

Балка Вм-2.2.2 (рис.3.26, б) зазнала більшої бокової деформації, у порівнянні із балкою Вм-2.3.1. Графік бокової деформації від навантаження можна поділити на принципові діляки: 1) від $N_{i-1} = 0.0$ до $N_i = 2.2$ кН, значення відносних деформацій для верхньої та нижньої зони змінювались однаково і при

навантаженні $N_i = 2.2$ кН набули значення $u_{у.верх.i} = 0.19$ мм та $u_{у.низ.i} = 0.17$ мм; 2) від $N_{i-1} = 2.2$ до $N_i = 8.2$ кН де бокові деформації змінювалися лінійно, для верхньої зони приріст бокових деформацій більший ніж для нижньої. Значення бокової деформації при $N_i = 8.2$ кН становили $u_{у.верх.i} = 1.03$ мм та $u_{у.низ.i} = 0.59$ мм; 3) від $N_{i-1} = 8.2$ до $N_i = 14.2$ кН. Даний відрізок характеризувався лінійною зміною із невеликим приростом навантаження. При $N_i = 14.2$ кН значення відносних деформацій становили $u_{у.верх.i} = 1.17$ мм та $u_{у.низ.i} = 0.47$ мм; 4) від $N_{i-1} = 14.2$ до $N_i = 14.6$ кН. Дана ділянка характеризувалась різкою зміною приросту бокової деформації, де на короткому відрізку значення змінились та склали $u_{у.верх.i} = 1.59$ мм та $u_{у.низ.i} = 0.79$ мм. Тобто значення бокової деформації збільшилось на: $\Delta u_{у.верх} = 0.42$ мм та $\Delta u_{у.низ} = 0.31$ мм; 5) від $N_i = 14.6$ кН до руйнування. Значення бокового вигину фактично залишалось без змін. При навантаженні близькому до руйнівного $N_i = 15.2$ кН, значення бокового вигину становило: $u_{у.верх.i} = 1.60$ мм та $u_{у.низ.i} = 0.79$ мм.

Для балки Вм-2.3.1 (рис.3.27, а) зміна відносних деформацій відбувалась майже однаково для верхньої та нижньої зони. Середній приріст деформацій на 1 кН прикладеного навантаження склав: для грані 1: $\Delta \varepsilon_1^{верх} = -0.20 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta \varepsilon_1^{низ} = 0.18 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні, для грані 2: $\Delta \varepsilon_2^{верх} = -0.15 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta \varepsilon_2^{низ} = 0.15 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні. Відносні деформації при навантаженні яке було найближче до руйнівного $N_i = 14.2$ кН, для грані 1: $\varepsilon_{1.i}^{низ} = 2.6 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{верх} = -2.8 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{низ} = 2.07 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{верх} = -2.18 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні відповідно.

Графік відносних деформацій від навантаження для балки Вм-2.3.2 (рис.3.27, б) мав ділянки із раптовим приростом відносних деформацій. При навантаженні від $N_{i-1} = 0.0$ до $N_i = 14.2$ кН відносні деформації змінювались лінійно із сталим середнім приростом на 1 кН прикладеного навантаження: для грані 1: $\Delta \varepsilon_1^{верх} = -0.07 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta \varepsilon_1^{низ} = 0.09 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні, для грані 2: $\Delta \varepsilon_2^{верх} = -0.07 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta \varepsilon_2^{низ} = 0.07 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні. Відносні деформації при $N_i = 14.2$ кН набули наступних значень: для грані 1: $\varepsilon_{1.i}^{низ} =$

$1.28 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -1.05 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 1.04 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -0.95 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні відповідно. Далі від $N_{i-1} = 14.2$ кН і до навантаження руйнування відносні деформації мали раптовий приріст. При навантаженні близькому до руйнівного $N_i = 15.2$ кН, відносні деформації становили: для грані 1: $\varepsilon_{1.i}^{\text{низ}} = 1.6 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -2.1 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 1.76 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -2.11 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні відповідно. Ділянка приросту відносних деформацій від $N_{i-1} = 14.2$ кН, відповідає ділянці раптової зміни бокових деформацій у балці Вм-2.3.2 (рис.3.26, б).

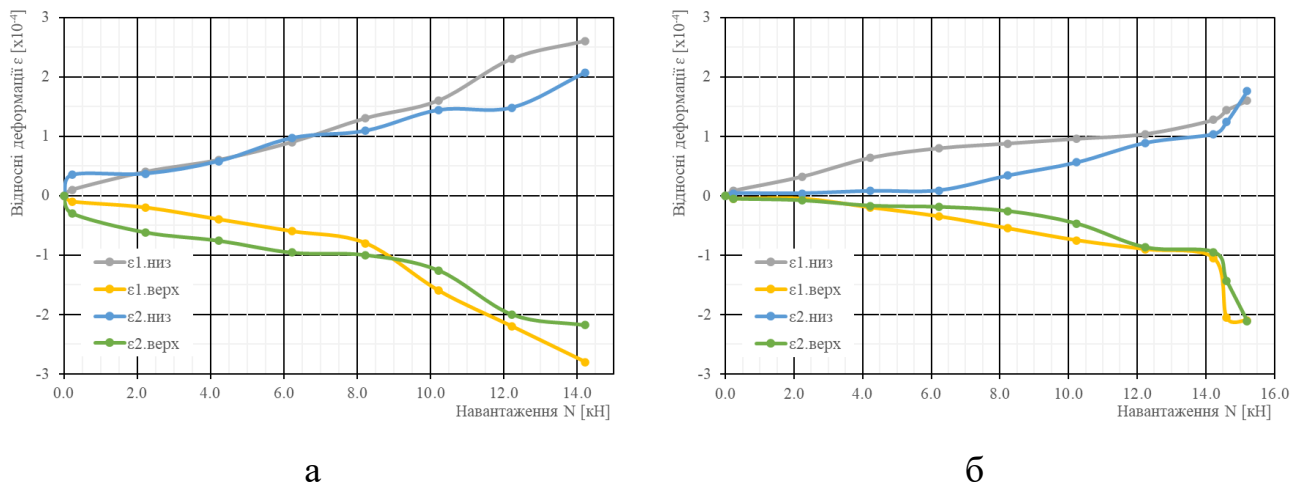


Рис. 3.27. Графіки залежності відносних деформацій ε від прикладеного навантаження N для тришарових балок серії 2: а) Вм-2.3.1, б) Вм-2.3.2.

Балки серії 2 із трьома шарами скла марки Вм-2.3.1 та Вм-2.3.2, за характером руйнування відповідали усім дослідженим балкам. Спочатку відбувалося утворення тріщини в нижній зоні в одному із шарів з подальшим поступовим руйнуванням кожного наступного шару (рис.3.28). В обох випадках перші тріщини появились у зоні чистого згину. Для балки Вм-2.3.1 місце руйнування першого та наступних шарів відбулось в одному і тому ж місці – між роликками прикладання навантаження, без зміщення. Для балки Вм-2.3.2 руйнування першого та другого шару також відбулось між роликками прикладання навантаження. Руйнування третього шару відбулось із зміщення на 5 см, поза

зоною чистого згину. Руйнівне навантаження для балок становило: $N_u = 15.2$ кН для балки Вм-2.3.1 та $N_u = 16.2$ кН для балки Вм-2.3.2.



а



б

Рис. 3.28. Руйнування балок серії 2: а) Вм-2.3.1, б) Вм-2.3.2.

3.2.4. Серія 3. Балки висотою 200 мм.

Балки Вм-3.1.1, Вм-3.1.2, Вм-3.2.1, Вм-3.2.2, Вм-3.3.1 та Вм-3.3.2 були випробуванні із ступінчастим приростом навантаження за методикою описаною в п.2.3. Результати випробування балок серії 3 подані у табл.3.9.

Значення максимальних прогинів та вигинів були зафіксовані механічними приладами в момент руйнування. Протокол дослідження скляних балок із ступінчастим приростом навантаження поданий в додатку В.

Результати випробування балок серії 3

Марка	Руйнівне навант. N_u	Макс. прогин, u_z	Макс. вигин		Макс. момент M_u	Макс. напруження σ_u
			$u_{y,низ}$	$u_{y,верх}$		
	[кН]	[мм]	[мм]	[мм]	[кН·м]	[МПа]
Vm-3.1.1	13.3	1.33	4.04	6.95	2.34	34.81
Vm-3.1.2	10.3	1.02	1.57	3.55	1.81	26.97
Vm-3.2.1	24.3	2.11	2.26	3.05	4.27	30.92
Vm-3.2.2	26.3	2.26	1.14	1.35	4.62	33.33
Vm-3.3.1	32.3	1.65	0.89	1.15	5.67	27.03
Vm-3.3.2	36.3	1.42	1.35	1.94	6.37	30.98

На рисунку 3.29 наведено графіки залежності прогинів u_z від прикладеного навантаження N для балок серії 3. Графіки прогинів усіх балок змінювалися прямо пропорційно до прикладеного навантаження та мали лінійний характер. Для балок які складались із одного та двох шарів скла, Vm-3.1.1, Vm-3.1.2, Vm-3.2.1 та Vm-3.2.2, графіки мали доволі стрімкий характер в порівнянні із трьох шаровими балками Vm-3.3.1 та Vm-3.3.2. Значення прогинів в балок серії 3 при навантаженні близькому до руйнівного подані табл. 3.9.

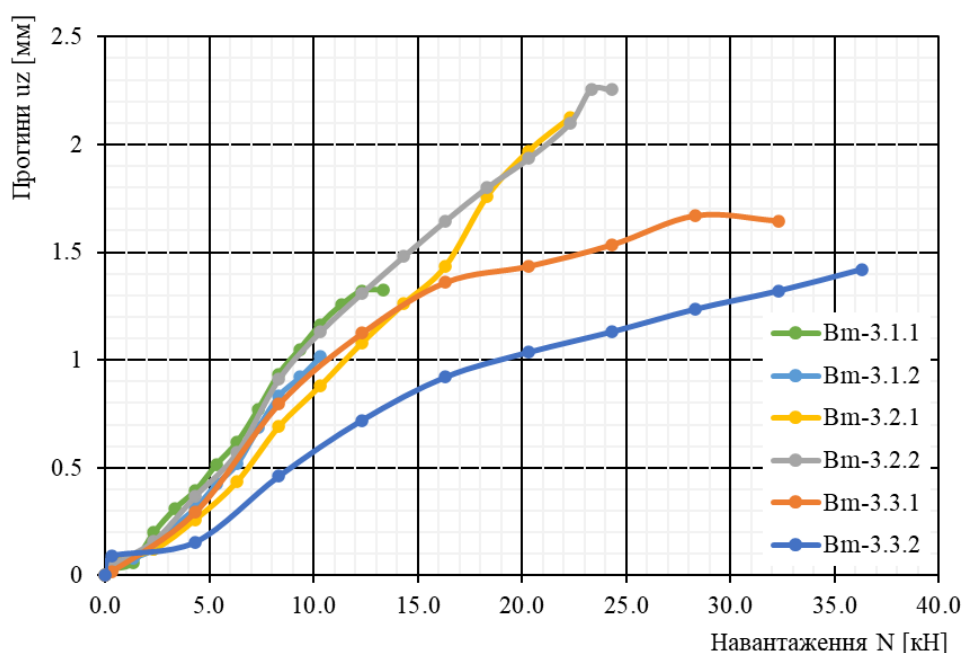


Рис.3.29. Графіки залежності прогинів u_z від прикладеного навантаження N для балок серії 3.

Одношарові балки серії 3

Із графіку залежності бокових деформацій балки від прикладеного навантаження для балки Вм-3.1.1 (рис.3.30, а) можна виділити дві характерні ділянки за різною величиною приросту.

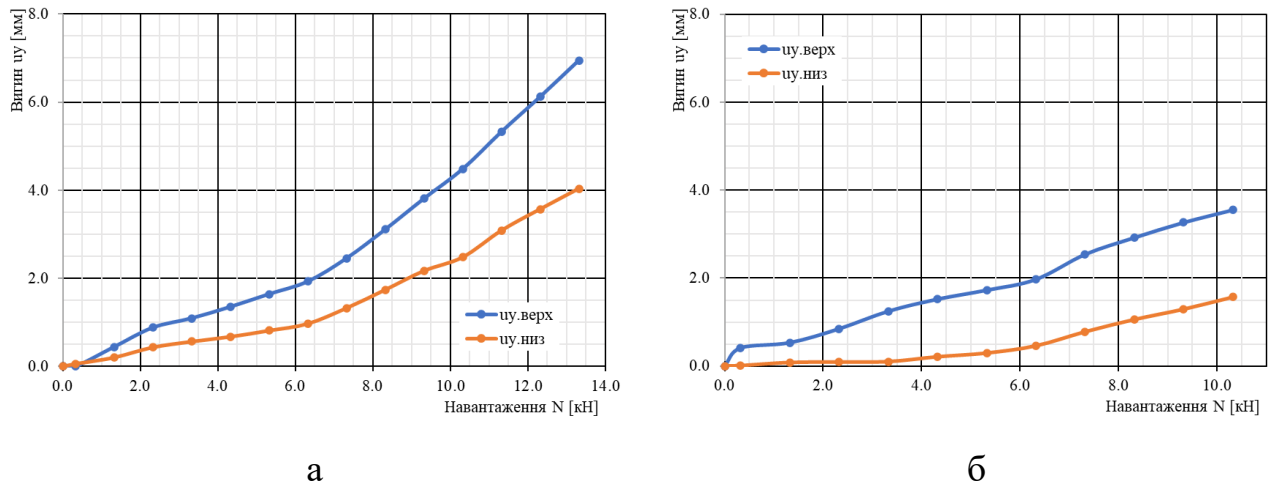
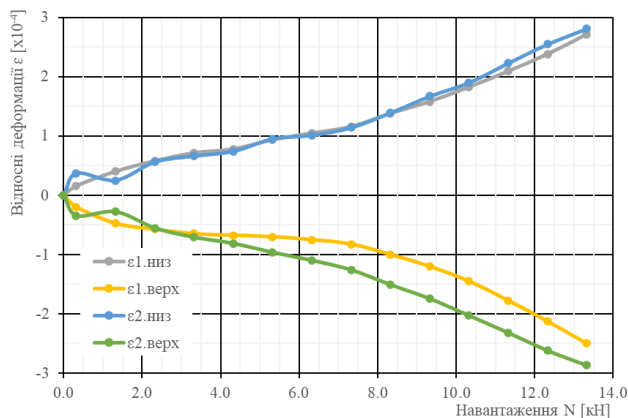


Рис. 3.30. Графіки залежності бокових деформацій u_y від прикладеного навантаження N для одношарових балок серії 3: а) Вм-3.1.1, б) Вм-3.1.2.

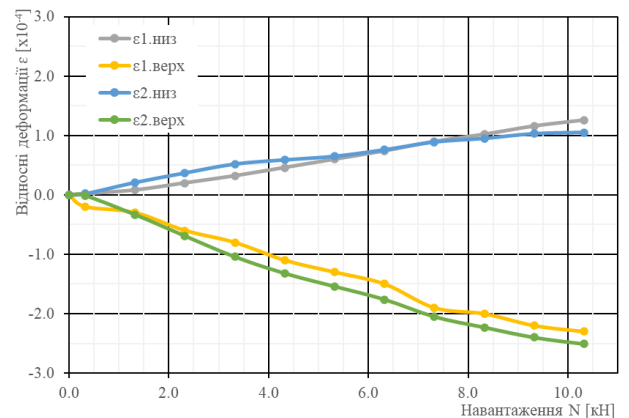
На ділянці від $N_{i-1} = 0$ до $N_i = 6.3$ кН приріст бокових деформацій мав лінійний характер. Верхня зона отримала більший приріст бокової деформації ніж нижня. Значення бокових деформацій при навантаженні $N_i = 6.3$ кН становили $u_{y.верх.i} = 1.93$ мм та $u_{y.низ.i} = 0.97$ мм. Далі на ділянці між $N_{i-1} = 6.3$ до $N_i = 13.3$ кН (значення зусилля перед руйнування), графік бокових деформацій як для нижньої так і для верхньої зони мав більш стрімкий характер ніж на попередній ділянці. Значення бокових деформацій при навантаженні близькому до руйнівного $N_i = 13.3$ кН становили $u_{y.верх.i} = 6.95$ мм та $u_{y.низ.i} = 4.04$ мм.

Для балки Вм-3.1.2 (рис.3.30, б) раптовий приріст бокової деформації спостерігався лише для верхньої зони на початку експерименту. Так, при першому етапі навантаження $N_i = 0.3$ кН, бокова деформація верхньої зони змінилась до $u_{y.верх.i} = 0.41$ мм, в той час як у нижній зоні вона не змінилась $u_{y.низ.i} = 0.01$ мм. Максимальні бокові деформації зафіксовано при навантаженні близькому до руйнівного $N_i = 10.3$ кН, становили: $u_{y.верх.i} = 3.55$ мм та $u_{y.низ.i} = 1.57$ мм.

Графік залежності відносних деформацій від прикладеного навантаження для балки Вм-3.1.1 (рис.3.31, а) мали лінійний характер та змінювались із сталим приростом, який становив на 1 кН прикладеного навантаження, для грані 1: $\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.19 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_1^{\text{низ}} = 0.20 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні, для грані 2: $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -0.22 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_2^{\text{низ}} = 0.21 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні. Найбільші значення відносних деформацій були зафіксовані при навантаженні близькому до руйнівного $N_i = 13.3$ кН та становили: для грані 1: $\varepsilon_{1,i}^{\text{низ}} = 2.7 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1,i}^{\text{верх}} = -2.5 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні; для грані 2: $\varepsilon_{2,i}^{\text{низ}} = 2.8 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2,i}^{\text{верх}} = -2.9 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні.



а



б

Рис. 3.31. Графіки залежності відносних деформацій ε від прикладеного навантаження N для одношарових балок серії 3: а) Вм-3.1.1, б) Вм-3.1.2.

Відносні деформації балки Вм-3.1.2 (рис.3.31, б) змінювались лінійно із прямо пропорційною залежністю від прикладеного навантаження. Середній приріст на 1 кН прикладеного навантаження становив: для грані 1: $\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.2 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_1^{\text{низ}} = 0.10 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні, для грані 2: $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -0.2 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_2^{\text{низ}} = 0.2 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні. Як видно із графіку приросту навантаження та середній зміні відносних деформацій на 1 кН прикладеного навантаження, значення відносних деформацій у верхній зоні змінювалось із приростом який був у двічі більший ніж приріст деформацій у нижній зоні. Найбільші значення відносних деформацій були зафіксовані при навантаженні близькому до руйнівного $N_i = 10.3$ кН та становили: для грані 1: $\varepsilon_{1,i}^{\text{низ}} = 1.3 \cdot 10^{-4}$

у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -2.3 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 1.1 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -2.5 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні.

Одношарові балки серії 3 марки Вм-3.1.1 та Вм-3.1.2 (рис.3.32) мали схожий характер руйнування до усіх балок серії 3 та усіх досліджених балок. Початком руйнування балки було розкриття нижньої вертикальної тріщини на висоту до 20 мм та стрімке її поширення у верхню зону. Руйнування балок відбулось на витримці при навантаженні: $N_u = 13.3$ кН, для балки Вм-3.1.1 та $N_u = 10.3$ кН, для балки Вм-3.1.2.



а



б

Рис. 3.32. Руйнування балок серії 3: а) Вм-3.1.1, б) Вм-3.1.2.

Двошарові балки серії 3

Графік залежності бокових деформацій від прикладеного навантаження балки Вм-3.2.1 (рис.3.33, а) за характером кривої можна поділити на три ділянки. На ділянці прикладання навантаження від $N_{i-1} = 0$ до $N_i = 10.3$ кН, графік мав

лінійни характер із видимим більшим приростом бокової деформації для верхньої зони, та меншим для нижньої зони. При навантаженні $N_i = 10.3$ кН, бокова деформація набула значень $u_{у.верх.i} = 0.76$ мм для верхньої зони та $u_{у.низ.i} = 0.11$ мм для нижньої зони. Далі на ділянці від $N_{i-1} = 10.3$ до $N_i = 18.3$ кН, приріст бокових деформацій, як і для верхньої, так і для нижньої зони раптово збільшився. Значення бокових деформацій при навантаженні $N_i = 18.3$ кН: $u_{у.верх.i} = 2.99$ мм для верхньої зони та $u_{у.низ.i} = 2.09$ мм для нижньої зони. На останній, третій ділянці від $N_{i-1} = 18.3$ до $N_i = 22.3$ кН, графік бокових деформацій мав лінійну пряму ділянку, на якій майже не було збільшення деформацій. Значення бокових деформацій при навантаженні близькому до руйнівного $N_i = 22.3$ кН були наступними, $u_{у.верх.i} = 3.05$ мм та $u_{у.низ.i} = 2.26$ мм.

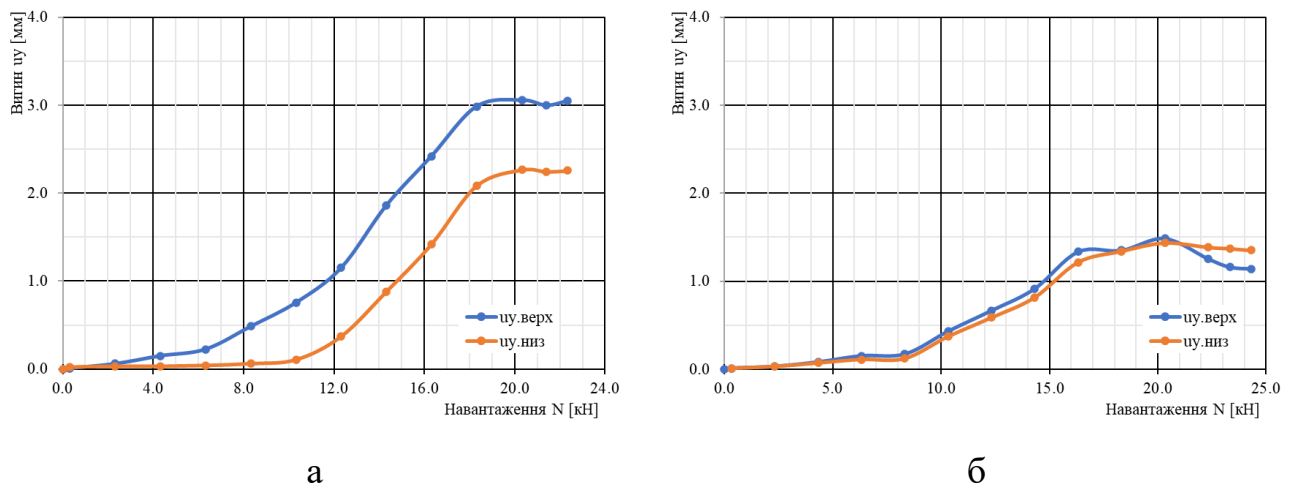


Рис. 3.33. Графік залежності бокових деформацій u_y від прикладеного навантаження N для двошарових балок серії 3: а) Bm-3.2.1, б) Bm-3.2.2.

Для балки Bm-3.2.2 графік залежності бокових деформацій від прикладеного навантаження зображений на рис.3.33, б. Як видно із графіку різниця між деформаціями верхньої та нижньої зони є малопомітна. Графік можна поділити умовно на 3 ділянки за формою кривих. На ділянці від $N_{i-1} = 0.0$ до $N_i = 8.3$ кН, бокова деформацій нижньої та верхньої зони майже не змінювалась, та при навантаженні $N_i = 8.3$ кН становила: $u_{у.верх.i} = 0.17$ мм для верхньої зони та $u_{у.низ.i} = 0.12$ мм для нижньої. Далі від $N_{i-1} = 8.3$ до $N_i = 16.3$ кН, графік бокової деформації отримав більш стрімку форму. Значення бокових деформацій при

навантажені $N_i = 16.3$ кН: $u_{у.верх.i} = 1.34$ мм для верхньої зони та $u_{у.низ.i} = 1.22$ мм для нижньої. Від $N_{i-1} = 16.3$ до $N_i = 24.3$ кН, графік бокових деформацій мав здебільшого лінійний характер. Значення бокових деформацій при навантаженні близькому до руйнівного $N_i = 24.3$ кН були наступними, $u_{у.верх.i} = 1.14$ мм та $u_{у.низ.i} = 1.35$ мм.

Відносні деформації балки Вм-3.2.1 (рис.3.34, а) для усіх місць заміру змінювались лінійно, винятком стала лише верхня зона грані 1. Від самого початку експерименту відносні деформації нижньої зони змінювались лінійно із сталим приростом на 1 кН прикладеного навантаження, який склав $\Delta\varepsilon_1^{низ} = 0.12 \cdot 10^{-4}$ для грані 1 та $\Delta\varepsilon_2^{низ} = 0.09 \cdot 10^{-4}$ для грані 2. В той час значення відносних деформацій у верхній зоні, мали інший характер поведінки.

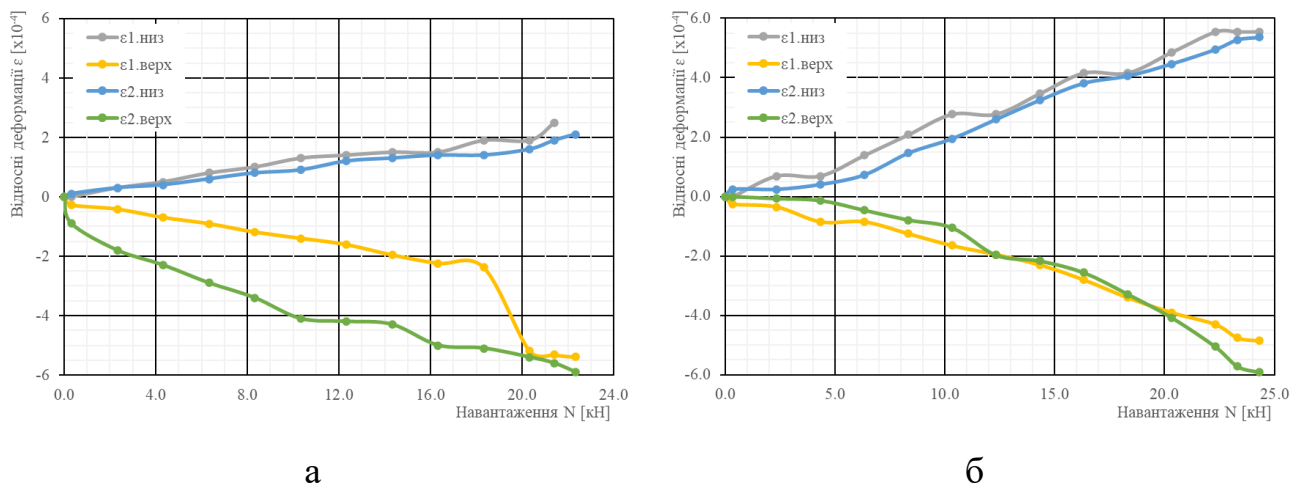


Рис. 3.34. Графік залежності відносних деформацій ε від прикладеного навантаження N для одношарових балок серії 3: а) Вм-3.2.1, б) Вм-3.2.2.

Для верхньої зони грані 1 залежність відносних деформацій від прикладеного навантаження була лінійною та симетричною до відносних деформацій нижньої зони на ділянці графіку від $N_{i-1} = 0.0$ до $N_i = 20.3$ кН. Середній приріст відносних деформацій на 1 кН прикладеного навантаження на ділянці склав $\Delta\varepsilon_1^{верх} = -0.13 \cdot 10^{-4}$. Далі на ділянці від $N_{i-1} = 20.3$ до $N_i = 21.4$ кН, був раптовий приріст, значення відносних деформацій змінилися від $\varepsilon_{1,i-1}^{верх} = -2.38 \cdot 10^{-4}$ до $\varepsilon_{1,i}^{верх} = -5.18 \cdot 10^{-4}$. Після на ділянці від $N_{i-1} = 21.4$ до $N_i = 22.3$ кН зміна була не значна із середнім приростом на 1 кН навантаження в

$\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.05 \cdot 10^{-4}$. Для верхньої зони грані 2 такий графік змінювався лінійно, але із значно більшим приростом в порівнянні із нижньою зоною. Середній приріст на 1 кН прикладного навантаження складав $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -0.26 \cdot 10^{-4}$. Найбільші значення відносних деформацій були зафіксовані при навантаженні близькому до руйнівного $N_i = 22.3$ кН та становили: для грані 1: $\varepsilon_{1.i}^{\text{низ}} = 2.5 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -5.39 \cdot 10^{-4}$ у верхній; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 2.1 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -5.9 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні.

Відносні деформації балки Вм-3.2.2(рис.3.34, б) змінювались лінійно із прямо пропорційною залежністю від прикладеного навантаження. Відносні деформації для верхньої та нижньої зони змінювались однаково. Середній приріст на 1 кН прикладеного навантаження становив: для грані 1: $\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.20 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_1^{\text{низ}} = 0.23 \cdot 10^{-4}$ – знизу, для грані 2: $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -0.24 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_2^{\text{низ}} = 0.22 \cdot 10^{-4}$ у нижній. Найбільші значення відносних деформацій були зафіксовані при навантаженні близькому до руйнівного $N_i = 24.3$ кН та становили: для грані 1: $\varepsilon_{1.i}^{\text{низ}} = 5.5 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -4.9 \cdot 10^{-4}$ у верхній; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 5.4 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -5.9 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні.

Балка Вм-3.2.2 (рис.3.35, б) зруйнувалась типово для усіх балок які були дослідженні, при руйнівному навантаженні у $N_u = 26.3$ кН відбулось утворення тріщини в розтягненій зоні між роликками прикладання навантаження в одному із шарів скла. Далі відбулось руйнування наступного шару скла у тому ж місці, що і в попередньому.

На відміну від інших балок, балка марки Вм-3.2.1 мала зовсім інший характер руйнування (рис.3.35, а). При навантаженні у $N_{u1} = 16.9$ кН відбулось утворення тріщини у першому шарі грані 1. Тріщина утворилась від одного із роликів прикладання навантаження у верхній зоні та розповсюдилась ближче до опори, на відстані близько 10 см від неї. При цьому балка і надалі перебувала під навантаженням без зміни величини його прикладання. Значення прогинів та деформацій на даному етапі прикладання навантаження залишились не змінними

та не отримали раптових приростів. Далі експеримент було продовжено і навантаження було збільшено до $N_{u1} = 24.3$ кН, після чого другий шар зазнав руйнування. Руйнування відбулось з утворенням аналогічної до попередньої тріщини, від одного із роликів прикладання навантаження до опорної зони.



а



б

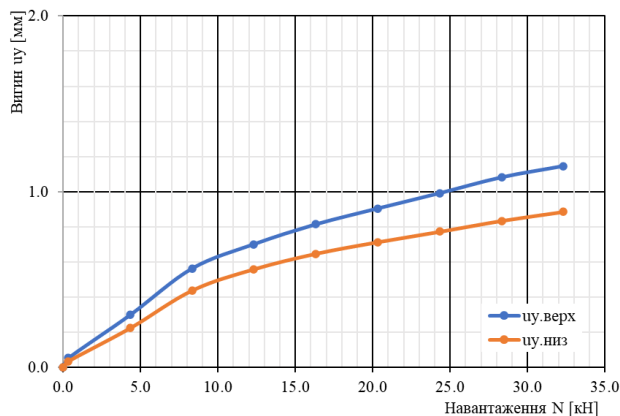
Рис. 3.35. Руйнування балок серії 3: а) Vm-3.2.1, б) Vm-3.2.2.

Тришарові балки серії 3

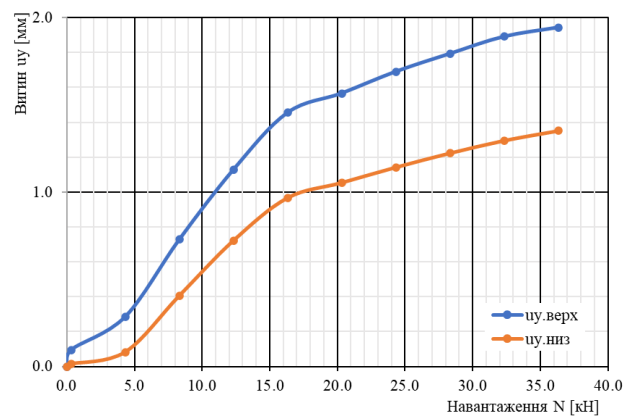
Графіки залежності бокових деформацій від прикладеного навантаження для балки Vm-3.3.1 (рис.3.36, а). За характером кривих їх можна поділити на дві ділянки. Перша ділянка від $N_{i-1} = 0.0$ до $N_i = 4.3$ кН, характеризувалась доволі стрімким лінійним приростом бокової деформації. Значення бокової деформації при

навантаженні $N_i = 4.3$ кН, становили: $u_{y,\text{верх}.i} = 0.30$ мм та $u_{y,\text{низ}.i} = 0.23$ мм. Далі від $N_{i-1} = 4.3$ до $N_i = 32.3$ кН, графік набув криволінійної форми, в порівнянні із попередньою ділянкою прямої. На даній ділянці був помітний більший приріст бокової деформації у верхній зоні в порівнянні із нижньою. Значення бокової деформації при навантаженні близькому до руйнівного $N_i = 32.3$ кН, становило: $u_{y,\text{верх}.i} = 1.14$ мм для верхньої зони та $u_{y,\text{низ}.i} = 0.89$ мм для нижньої зони.

Для балки Вм-3.3.2 (рис.3.36, б) мав схожу форму до графіку залежності бокових деформацій від прикладеного навантаження. Бокова деформація верхньої зони мала від самого початку експерименту більший приріст ніж нижня. Перша ділянка від $N_{i-1} = 0.0$ до $N_i = 16.3$ кН, була лінійною та стімкою. Значення бокових деформацій при навантаженні $N_i = 16.3$ кН склали $u_{y,\text{верх}.i} = 1.46$ мм для верхньої зони та $u_{y,\text{низ}.i} = 1.35$ мм для нижньої зони. Далі від $N_{i-1} = 16.3$ до $N_i = 36.3$ кН, значення бокових деформацій змінювались не так стрімко як на попередній ділянці. При навантаженні $N_i = 36.3$ кН, яке було близьким до руйнівного, значення бокових деформацій, були $u_{y,\text{верх}.i} = 1.94$ мм та $u_{y,\text{низ}.i} = 1.35$ мм.



а



б

Рис. 3.36. Графіки залежності вигину u_y від прикладеного навантаження N для тришарових балок серії 3: а) Вм-3.3.1, б) Вм-3.3.2.

Відносні деформації балки Вм-3.3.1(рис.3.37, а) змінювались лінійно із прямо пропорційною залежністю від прикладеного навантаження. Для верхньої та нижньої зони приріст відносних деформацій був майже однаковий протягом всього

експерименту. Середній приріст на 1 кН прикладеного навантаження становив: для грані 1: $\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.13 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_1^{\text{низ}} = 0.13 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні, для грані 2: $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -0.14 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_2^{\text{низ}} = 0.11 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні. Найбільші значення відносних деформацій були зафіксовані при навантаженні близькому до руйнівного $N_i = 32.3$ кН та становили: для грані 1: $\varepsilon_{1.i}^{\text{низ}} = 4.2 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -4.3 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 3.4 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -4.1 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні.

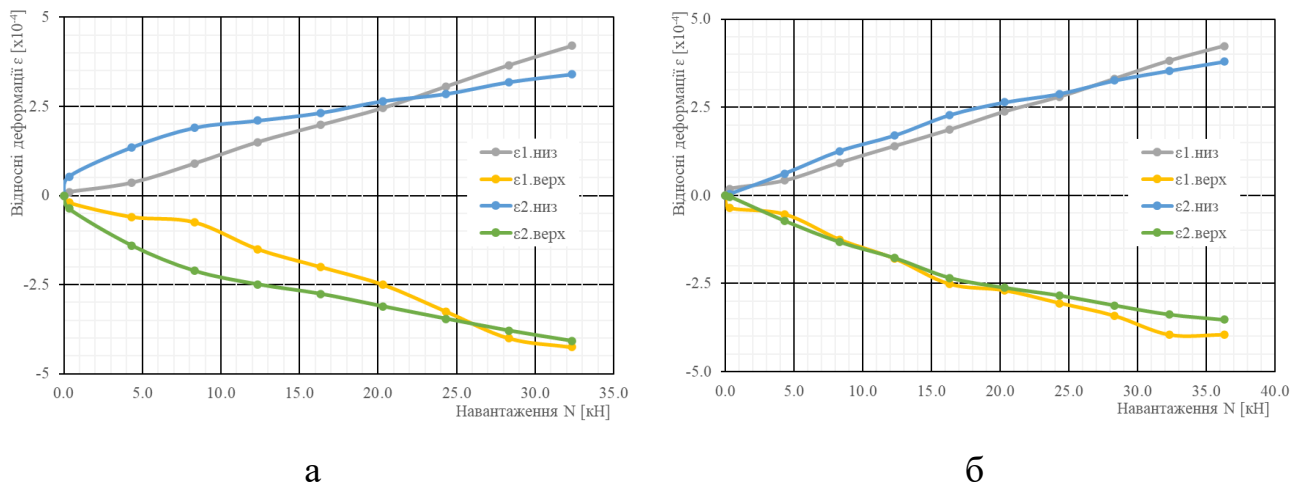


Рис. 3.37. Графіки залежності відносних деформацій ε від прикладеного навантаження N для тришарових балок серії 3: а) Vm-3.3.1, б) Vm-3.3.2.

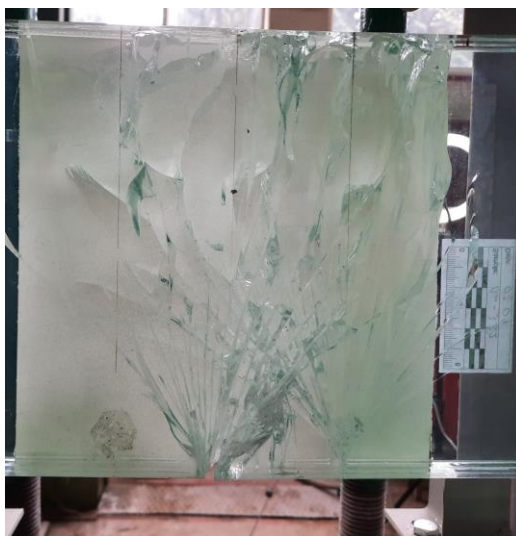
Відносні деформації балки Vm-3.3.2 (рис.3.37, б), також змінювались лінійно та їх приріст для нижньої та верхньої зони був близький за значенням. Середній приріст на 1 кН прикладеного навантаження становив: для грані 1: $\Delta\varepsilon_1^{\text{верх}} = -0.11 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_1^{\text{низ}} = 0.12 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні, для грані 2: $\Delta\varepsilon_2^{\text{верх}} = -0.10 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні, $\Delta\varepsilon_2^{\text{низ}} = 0.10 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні. Найбільші значення відносних деформацій були зафіксовані при навантаженні близькому до руйнівного $N_i = 32.3$ кН та становили: для грані 1: $\varepsilon_{1.i}^{\text{низ}} = 4.2 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{1.i}^{\text{верх}} = -3.96 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні; для грані 2: $\varepsilon_{2.i}^{\text{низ}} = 3.8 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{2.i}^{\text{верх}} = -3.53 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні.

Балки серії 1 із трьома шарами скла марки Vm-3.3.1 та Vm-3.3.2 мали схожий характер руйнування як і у попередніх балок серії, а саме: першочергове утворення тріщини в розтягненій зоні в одному із шарів і подальше поступове

руйнування кожного наступного шару (рис.3.38). В обох випадках перші тріщини появились у зоні чистого згину. Балка Вм-3.3.1 зруйнувалась на витримці при навантаженні $N_u = 32.3$ кН. Руйнування відбулось із розкриттям нижньої тріщини в першому шарі скла. Руйнування наступних шарів скла відбулось у аналогічному місці. Балка Вм-3.3.2 була зруйнована при навантаженні $N_u = 36.3$ кН. Характеру руйнування був такий як і у балки Вм-3.3.1, окрім руйнування останнього шару балки. Перші два шари зруйнувались в ідентичному місці. Наступний, останній, шар скла був зруйнований із зміщенням на 5 см від місця попереднього руйнування.



а



б

Рис. 3.38. Руйнування балок серії 3: а) Вм-3.3.1, б) Вм-3.3.2.

3.3. Аналіз результатів досліджень скляних балок

За отриманими результатами дослідження зроблено аналіз скляних балок за критеріями тривалості прикладання навантаження, висоти та кількості шарів скла в балці. Для зручності результати дослідження подано у вигляді зведеної таблиці результатів дослідження балок усіх серії (табл. 3.10).

Табл. 3.10

Зведена таблиця результатів досліджень скляних балок

Марка	Макс. навант. N_u	Макс. момент M_u	Макс. прогин u_z	Макс. бокова деформація $u_{y,max}$	Руйнівне напруження σ_u	Коеф. викор. пере-різу $f_{g,k}/\sigma_u$	Коеф. викор. пере-різу $f_{g,k,mod}/\sigma_u$
	[кН]	[кН·м]	[мм]	[мм]	[МПа]	-	-
Vm-1.1.1*	3.336	0.59	-	-	34.63	0.93	0.58
Vm-1.1.2*	2.754	0.48	-	-	28.74	1.12	0.70
Vm-1.1.3	2.21	0.39	1.16	-4.20	22.69	1.42	0.89
Vm-1.1.4	2.21	0.39	0.96	-5.64	22.83	1.41	0.88
Vm-1.1.5*	2.321	0.41	-	-	24.52	1.31	0.82
Vm-1.1.6*	4.900	0.86	-	-	51.60	0.62	0.39
Vm-1.2.1*	6.819	1.20	-	-	36.13	0.89	0.56
Vm-1.2.2*	6.976	1.23	-	-	36.59	0.88	0.55
Vm-1.2.3	4.21	0.74	0.74	-1.67	21.24	1.52	0.95
Vm-1.2.4	5.71	1.09	1.16	-3.45	31.34	1.03	0.64
Vm-1.3.1	7.21	1.27	1.17	2.08	24.42	1.32	0.82
Vm-1.3.2	8.21	1.44	1.15	1.0	27.52	1.17	0.73
Vm-2.1.1	8.2	1.44	1.3	-1.27	37.31	0.86	0.54
Vm-2.1.2	8.2	1.44	1.18	-0.735	37.59	0.86	0.54
Vm-2.2.1	13.2	2.32	1.54	-1.27	29.77	1.08	0.68
Vm-2.2.2	12.2	2.15	1.38	1.54	28.41	1.13	0.71
Vm-2.3.1	15.2	2.68	1.49	-0.3	22.98	1.40	0.88
Vm-2.3.2	16.2	2.85	1.79	-1.60	24.29	1.33	0.83
Vm-3.1.1	13.3	2.34	1.33	6.95	34.81	0.93	0.58
Vm-3.1.2	10.3	1.81	1.02	3.55	26.97	1.20	0.75
Vm-3.2.1	24.3	4.27	2.11	3.05	30.92	1.04	0.65
Vm-3.2.2	26.3	4.62	2.26	1.35	33.33	0.97	0.60
Vm-3.3.1	32.3	5.67	1.65	1.15	27.03	1.19	0.75
Vm-3.3.2	36.3	6.37	1.42	1.94	30.98	1.04	0.65

* – балки дослідженні із постійним приростом навантаження.

Для балок усіх серій та марок для яких були заміряні прогини, граничне значення прогину не перевищувало гранично допустимого із п.5.1 [142]:

$$f_u = \frac{l}{120} = \frac{900}{120} = 7.5 \text{ мм.} \quad (3.3)$$

З таблиці 3.10, коефіцієнт використання перерізу, що являв собою співвідношення значення характеристичної міцності $f_{g.k}$ до максимального напруження σ_u , становив для великої числа балок більше 1. Це означало, що балки цих марок, зруйнувались ще до настання в їх перерізі напруження, яке відповідало значенню характеристичної міцності на розтяг при згині. Тому необхідно обмежити значення максимально допустимого напруження для скляних балок. В межах даного дослідження, це значення є заниженим значенням характеристичної міцності на розтяг при згині - $f_{g.k.mod}$. У даному експерименті значення понижувального коефіцієнту становило 1.6, що занижує характеристичну міцність на розтяг при згині близько на 40%. Значення знижувального коефіцієнту відповідало значенню, яке задовольняло б умову $\frac{f_{g.k.mod}}{\sigma_u} < 1$. Визначення $f_{g.k.mod}$ відбувалось за формулою (3.4).

$$f_{g.k.mod} = \frac{f_{g.k}}{1.6} = \frac{32.23}{1.6} = 20.14 \text{ МПа} \quad (3.4)$$

Значення знижувального коефіцієнту відповідало значенню коефіцієнту надійності за матеріалом для звичайного флоат скла $\gamma_{M;A} = 1.6$, згідно із [45].

Отже, як видно із умови $\frac{f_{g.k.mod}}{\sigma_u}$, що подана у табл. 3.10. Значення руйнівного напруження не перевищують значення $f_{g.k.mod}$. Отримані значення коефіцієнтів використання перерізу є меншими за 1. Для окремих балок коефіцієнт використання становив 0.39, але використання такого великого запасу міцності є справедливим, оскільки розкид в показах результатів є суттєвим.

Аналіз впливу бокового вигину

Явище втрати стійкості із площини характеризується появою додаткового повздовжнього зусилля в балці. Через яке елемент який попередньо працював в одній площині, починає працювати у двох площинах. Характерно, що у балках

усіх серій, верхня зона завжди отримувала більше значення бокового вигину, ніж у нижній зоні, що зображено на графіках у п.3.2.

Явище появи бокового вигину приводить до появи ексцентриситету у роботі конструкції із площини. Ексцентриситет повинен бути більшим за значення координати ядра перерізу, для того щоб суттєво впливати на несучу здатність балки. Для прямокутних перерізів координата ядра перерізу визначається як $b/6$. Поява такого ексцентриситету відповідає значенню бокової деформації отриманої під час дослідження.

Використавши отримані експериментальні значення бокових деформацій, балки було поділено на дві групи: балки у яких значення бокових деформацій становили менше координати ядра перерізу і ті у яких ця величина перевищувала її. До перших відносились балки із одним шаром скла: Вм-1.1.3 ($u_{y,max} = 4.20$ мм), Вм-1.1.4 ($u_{y,max} = 5.64$ мм), Вм-3.1.1 ($u_{y,max} = 6.95$ мм) та Вм-3.1.2 ($u_{y,max} = 3.55$ мм). Для яких $b/6 = 1.66$ мм. А також балка Вм-1.2.4, із двома шарами скла, для якої значення вигину $u_{y,max} = 3.45$ мм перевищило значення координати ядра перерізу $b/6 = 3.33$ мм.

Із рівняння 2.3 було визначено розрахункове значення навантаження N_d , яке відповідало значенню $f_{g;k,mod}$ із рівняння 3.4, та становило:

$$N_d = \frac{2 \cdot b \cdot h^2 \cdot (f_{g;k,mod} - \sigma_{sw})}{3 \cdot (l_{xz} - a)} \quad (3.5)$$

На рис.3.39 зображено графік залежності бокових деформацій від прикладеного навантаження для балки Вм-1.1.3 та Вм-1.1.4, із прямим $N_d = 1.7$ кН та координатою ядра перерізу $b/6 = 1.66$ мм. Як видно із даного графіку для балки Вм-1.1.3, при значенні навантаження $N_d = 1.7$ кН не виходили за межі ядра перерізу. В той час бокова деформація балки Вм-1.1.4 перевищила значення $b/6$, на етапі $N_i = 1.46$ кН. Для балки Вм-1.1.4, значення бокової деформації для верхньої та нижньої зони на даних етапах завантаження було близьке.

На етапі завантаження $N_d = 1.7$ кН балки Вм-1.1.3 та Вм-1.1.4 коефіцієнт використання даних балок становив 0.79. Припинення експлуатації балки при такому навантаженні є доцільним та забезпечує достатньою несучу здатність балок, не зважаючи на те, що значення бокового вигину виходить за межі значення координати ядра перерізу.

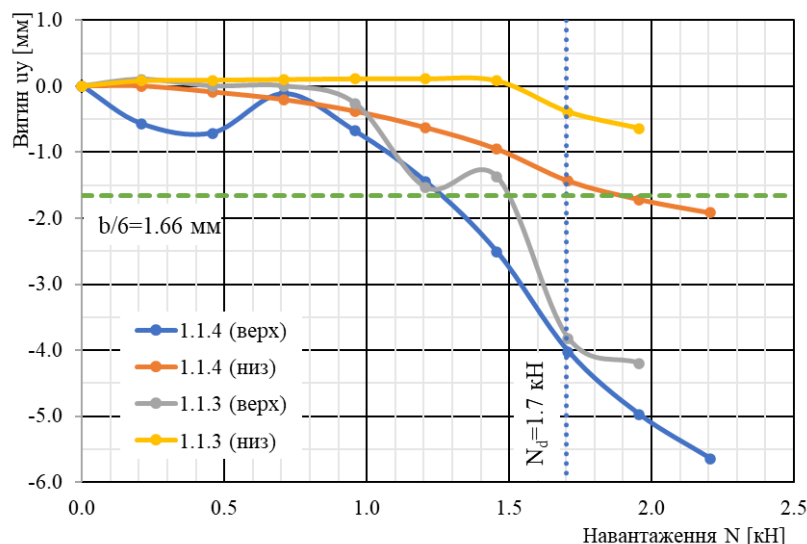


Рис.3.39. Аналіз залежності бокових деформацій від прикладеного навантаження для балок Вм-1.1.3 та Вм-1.1.4.

Рис.3.40, демонструє графік залежності бокових деформацій від прикладеного навантаження для балок Вм-3.1.1 та Вм-3.1.2. Як видно із графіку при навантаженні $N_d = 6.8$ кН, бокові вигини балки верхньої зони Вм-3.1.1 та Вм-3.1.2 перевищили значення $b/6$, на етапі $N_i = 5.3$ кН. На етапі завантаження $N_d = 6.8$ кН балки Вм-3.1.1 та Вм-3.1.2 коефіцієнт використання даних балок становив 0.52 та 0.66. Припинення експлуатації балки на даному навантаженні є доцільним та забезпечує достатньою несучу здатність балок.

На рис.3.41 зображено графік залежності бокового вигину для балки Вм-1.2.4. Як видно із графіку, значення бокового вигину верхньої зони перевищило значення координати ядра перерізу на етапі навантаження близькому до руйнування. Коефіцієнт використання балки Вм-1.2.4 при навантаженні $N_d = 6.8$ кН, становив 0.57.

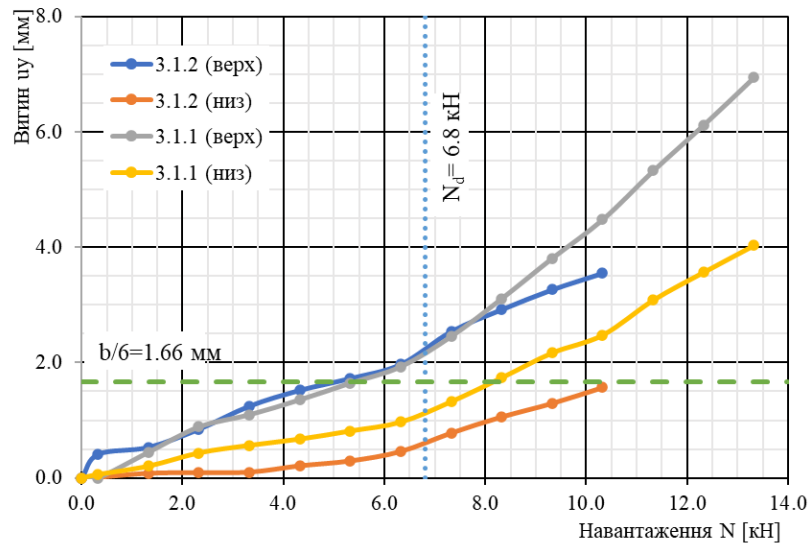


Рис.3.40. Аналіз залежності бокових деформацій від прикладеного навантаження для балок Vm-3.1.1 та Vm-3.1.2.

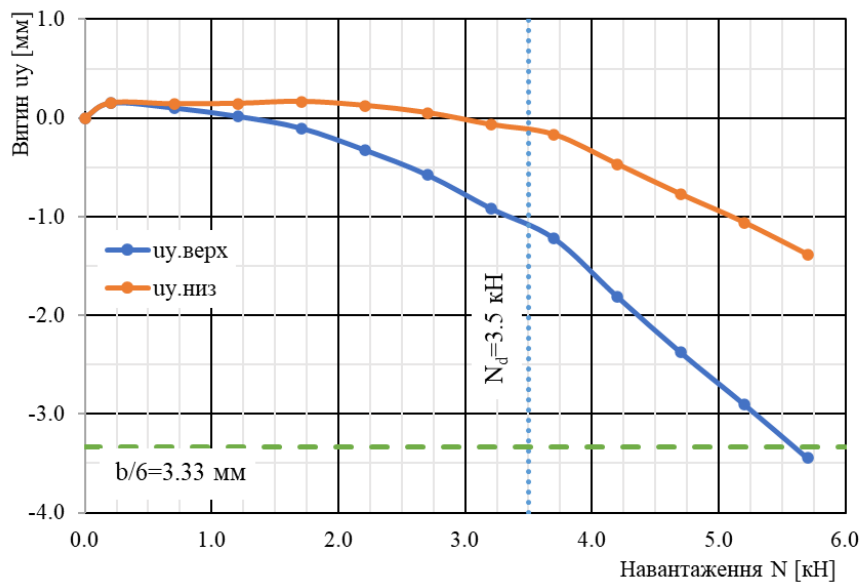


Рис.3.41. Аналіз залежності бокових деформацій від прикладеного навантаження для балки Vm-1.2.4.

Як видно із результатів дослідження одношарові балки були більш схильні до бокового вигину. Додавання одного додаткового шару скла робило їх значно стабільнішими. Окрім того застосування двох шарів, було доцільним із точки зору безпеки. Балки із двома і більше шарами скла, не зазнавали повного руйнування і не було падіння конструкції балки. Це відбувалось завдяки технології триплексу, яка з'єднувала уже зруйновані частинки скла між собою. Перевищення координати

ядра перерізу відбувалось при значенні навантаження, яке було вдвічі менше від руйнівного та не мало суттєвого впливу на несучу здатність перерізу.

Порівняння досліджених балок

На рис.3.42 зображено порівняльні графіки залежності відносних деформацій від прикладеного навантаження для балок серії 1. Порівняння виконано для балок, які досліджувались із постійним приростом навантаження (п.3.2.1) та контрольованим приростом навантаження (п.3.2.2). Для порівняння було вибрано відносні деформації верхньої зони.

На рис.3.42, а, зображено порівняння відносних деформацій для одношарових балок серії 1 марки Вм-1.1.2 та Вм-1.1.4. Як видно з графіку різниця в зміні відносних деформацій, для балок досліджених з різним приростом навантаження є доволі суттєвою. Як видно із графіку, значення відносних деформацій при навантаженні в $N_i = 1.0$ кН, для балки з ступінчатим приростом навантаження становило $\varepsilon_{Вм-1.1.4}^{низ} = 1.1 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{Вм-1.1.4}^{верх} = -2.2 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні. В той час як для балки із неперервним $\varepsilon_{Вм-1.1.2}^{низ} = 3.4 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{Вм-1.1.2}^{верх} = -3.3 \cdot 10^{-4}$. Для верхньої зони значення відносних деформацій було в 1.5 рази більше для балки з безперервними приростом навантаження, а для нижньої в 3 рази.

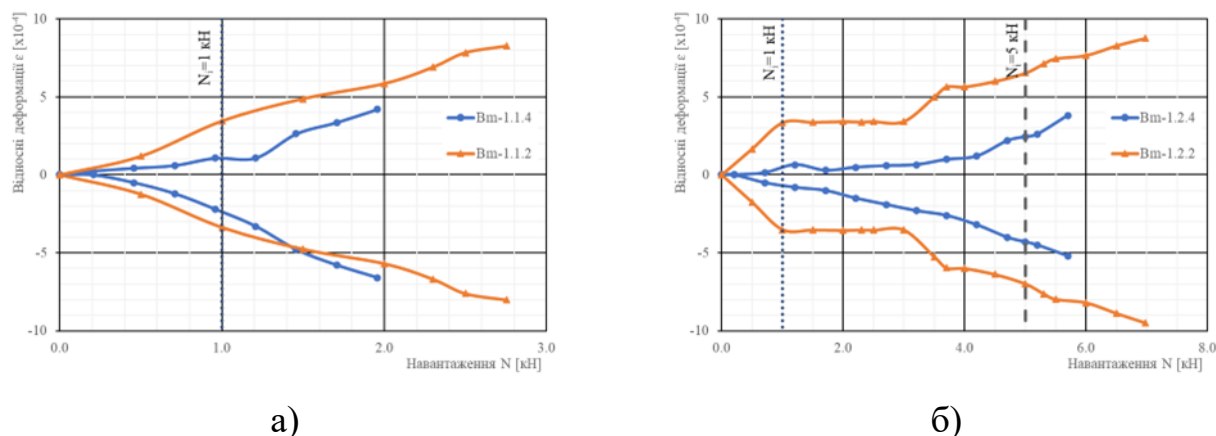


Рис.3.42. Порівняння залежності відносних деформацій від навантаження для балок: а) Вм-1.1.2 та Вм-1.1.3; б) Вм-1.2.2 та Вм-1.2.4.

Рис. 3.42, б зображає аналогічне порівняння для двошарових балок марки Вм-1.2.2 та Вм-1.2.4. Як видно із даного графіку, для двошарових балок різниця у тому як прикладалось навантаження також є значною. При навантаженні $N_i =$

1.0 кН, значення відносних деформацій для балки, яка була досліджена із постійним приростом навантаження Вm-1.2.4, склали $\varepsilon_{Вm-1.2.4}^{\text{низ}} = 0.65 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{Вm-1.2.4}^{\text{верх}} = -0.8 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні. У той час для балки Вm-1.2.2: $\varepsilon_{Вm-1.2.2}^{\text{низ}} = 3.35 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{Вm-1.2.2}^{\text{верх}} = -3.5 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні. Відрізнялись вони на користь балки із постійним приростом навантаження, відповідно у 4.4 рази для нижньої зони та 5.2 рази для верхньої зони. При навантаженні $N_i = 5.0$ кН, значення відносних деформацій для балки Вm-1.2.4 склали $\varepsilon_{Вm-1.2.4}^{\text{низ}} = 2.44 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{Вm-1.2.4}^{\text{верх}} = -4.3 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні. У той час для балки Вm-1.2.2: $\varepsilon_{Вm-1.2.2}^{\text{низ}} = 6.5 \cdot 10^{-4}$ у нижній зоні та $\varepsilon_{Вm-1.2.2}^{\text{верх}} = -6.9 \cdot 10^{-4}$ у верхній зоні. Відрізнялись вони на користь балки Вm-1.2.2 із постійним приростом навантаження, відповідно у 2.7 рази для нижньої зони та 1.6 рази для верхньої зони.

При цьому руйнівні навантаження для балок висотою 100 мм становили: $N_u = 2.754$ кН для балки Вm-1.1.2, яка досліджувалась із постійним приростом навантаження та $N_u = 2.21$ кН для балки Вm-1.1.4, яка досліджувалась із ступеневим приростом навантаження. Що становило у співвідношенні 1.2. Таке ж співвідношення 1.2 для руйнівних навантажень було для двошарових балок. Значення руйнівного навантаження становило $N_u = 6.976$ кН для балки Вm-1.2.2, яка досліджувалась із постійним приростом навантаження та $N_u = 5.71$ кН для балки Вm-1.2.4.

Було виконано порівняння відносних деформацій верхньої зони для балок в межах однієї серії з різною кількістю шарів скла, які були дослідженні з приростом навантаження. Також було порівняно між собою балки із однаковою кількістю скла та різною висотою. Порівняння відбувалось при контрольних ступенях навантаження які становили $N_i = 1.0, 5.0, 10.0$ кН. Результати подані у табл.3.11.

Графіки залежності відносних деформацій подано на рис. 3.43. Значення напруження σ_i в момент навантаження N_i отримані із рівняння 2.3 за законом Гука.

Таблиця порівняння результатів дослідження балок

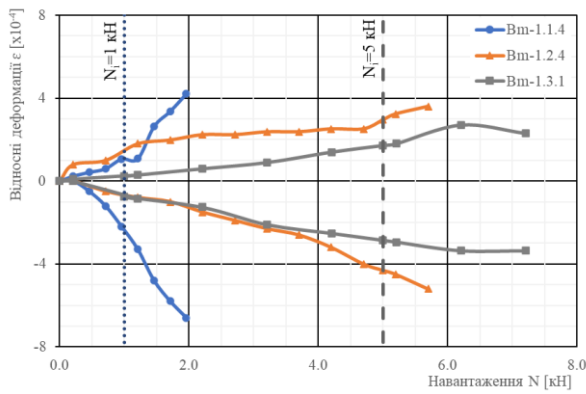
Марка	Етап навантаження								
	$N_i = 1$ кН			$N_i = 5$ кН			$N_i = 10$ кН		
	$u_{z,i}$	$u_{y,i}$	σ_i	$u_{z,i}$	$u_{y,i}$	σ_i	$u_{z,i}$	$u_{y,i}$	σ_i
	[мм]	[мм]	[МПа]	[мм]	[мм]	[МПа]	[мм]	[мм]	[МПа]
Vm-1.1.4	0.5	1.5	24.0	-	-	-	-	-	-
Vm-1.2.4	0.2	0.1	10.4	1.0	2.7	30.1	-	-	-
Vm-1.3.1	0.1	0.5	4.7	1.0	1.8	22.2	-	-	-
Vm-2.1.2	0.1	0.3	8.9	0.7	0.6	20.6	-	-	-
Vm-2.2.2	0.1	0.4	3.7	0.5	0.8	8.9	1.2	1.8	23.0
Vm-2.3.2	0.1	0.0	3.0	0.3	0.1	5.9	0.9	0.1	10.6
Vm-3.1.1	0.1	0.3	2.1	0.5	1.6	6.4	1.1	4.3	13.6
Vm-3.2.2	0.1	0.0	2.0	0.4	0.1	6.5	1.1	0.4	11.1
Vm-3.3.2	0.1	0.1	1.1	0.2	0.4	5.8	0.6	0.9	10.6

Серія 1. Як видно із графіку 3.43, а та таблиці 3.11, балки серії 1 показали себе найгірше в порівнянні із іншими серіями. Одношарова балка серії 1 Vm-1.1.4 при навантаженні $N_i = 1$ кН, мала напруження $\sigma_i = 24$ МПа. Додавання одного шару скла (Vm-1.2.4) зменшило на цьому етапі напруження в 2.3 рази до $\sigma_i = 10.4$ МПа. Аналогічний вплив на цьому етапі навантаження мало і додавання третього шару скла. Напруження зменшились у 2.2 рази, в порівнянні із двошаровою балкою, і становило $\sigma_i = 4.7$ МПа. Як видно із таблиці 3.11, значення бокового вигину при цьому було найбільшим для балки із одним шаром скла, $u_{y,i} = 1.5$ мм. Тоді як для балок із двома та трьома шарами він був не значним $u_{y,i} = 0.1$ мм та $u_{y,i} = 0.5$ мм.

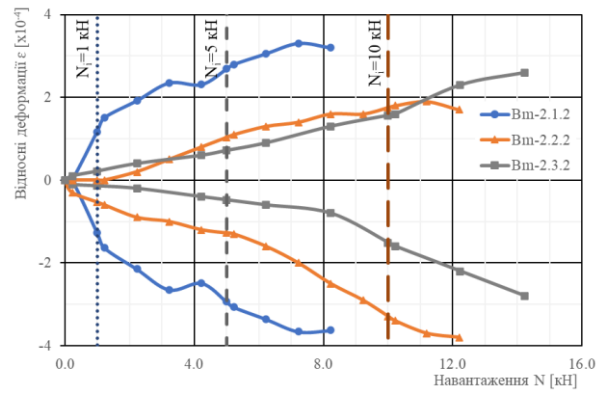
На етапі завантаження $N_i = 5$ кН, балка Vm-1.2.4 мала значення напруження $\sigma_i = 30.1$ МПа, проти $\sigma_i = 22.2$ МПа для балки Vm-1.3.1. При такому навантаженні бокові деформації становили $u_{y,i} = 2.7$ мм для двошарової балки та $u_{y,i} = 1.8$ мм, для балки із трьома шарами.

Серія 2. На графіку 3.43, б, зображено порівняння балок серії 2 за різною кількістю шарів скла. При навантаженні $N_i = 1$ кН, одношарова балка Vm-2.1.2 мала значення напруження $\sigma_i = 8.9$ МПа, двошарова Vm-2.2.2 у 2.4 рази менше значення, $\sigma_i = 3.7$ МПа. Тришарова Vm-2.3.2 мала у 3 рази менше значення напруження ніж одношарова $\sigma_i = 3.0$ МПа. Бокові деформацій при цьому набули

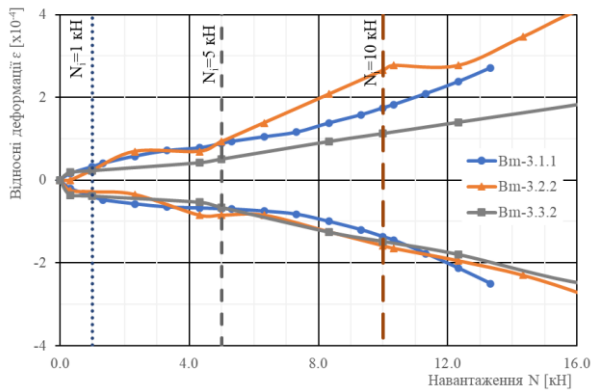
значення $u_{y,i} = 0.3$ мм для одношарової балки, $u_{y,i} = 0.4$ мм для двошарової та $u_{y,i} = 0.0$ мм для балки із трьома шарами скла.



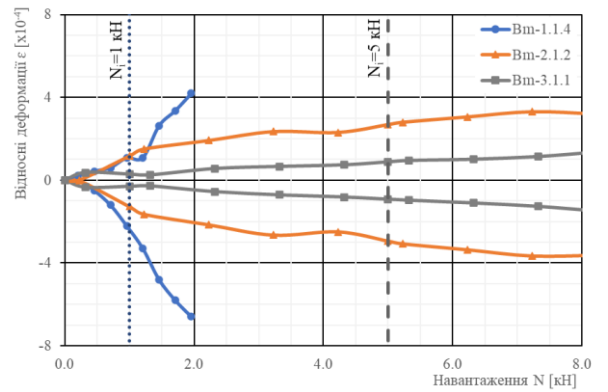
а)



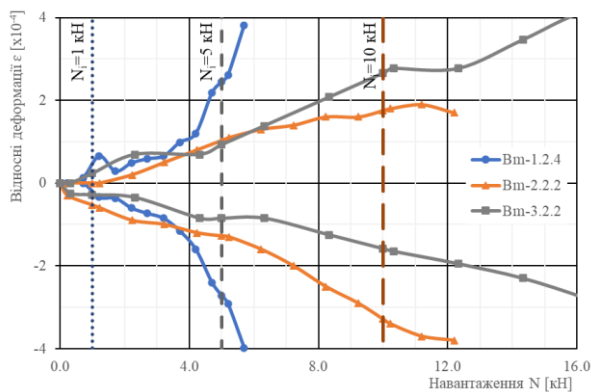
б)



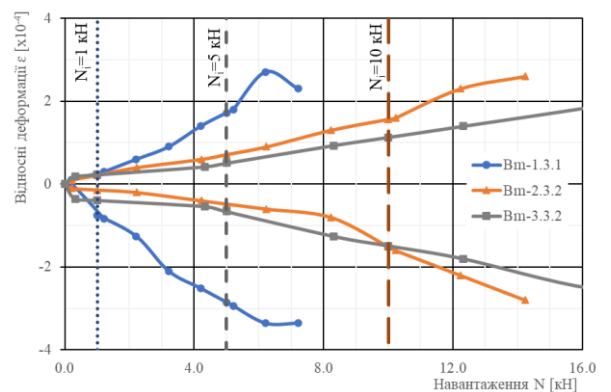
в)



г)



д)



е)

Рис.3.43. Порівняння залежності відносних деформацій від навантаження для балок: а) Серії 1; б) Серії 2; в) Серії 3; г) Одношарових балок різної висоти; г) Двошарових балок різної висоти; е) г) Тришарових балок різної висоти.

При значенні навантаження $N_i = 5$ кН, значення напруження для балки Bm-2.1.2 становило $\sigma_i = 20.6$ МПа Співвідношення між одношаровою та двошаровою

балкою майже не змінилось, напруження відрізнялось у 2.3 рази та становило $\sigma_i = 8.9$ МПа. Схожа ситуація спостерігалась і для тришарової балки, напруження відрізнялось у 3.5 в порівнянні із одношаровою та становило $\sigma_i = 5.9$ МПа. Бокові деформації при цьому зросли до $u_{y,i} = 0.6$ мм для одношарової балки, $u_{y,i} = 0.8$ мм для двошарової та $u_{y,i} = 0.1$ мм для тришарової балки.

На етапі навантаження $N_i = 10$ кН, балка Вm-2.2.2 мала значення напруження $\sigma_i = 23.0$ МПа, проти $\sigma_i = 10.6$ МПа для балки Вm-2.3.2. При цьому бокові деформації балки Вm-2.3.2 залишився без змін $u_{y,i} = 0.1$ мм, а для балки із двома шарами Вm-2.2.2 зріс до $u_{y,i} = 1.8$ мм.

Серія 3. На рис.3.43, в зображеного графіки залежності відносних деформацій від прикладеного навантаження для балок серії 1. При значенні навантаження $N_i = 1$ кН, для одношарової балки Вm-3.1.1 напруження становило $\sigma_i = 2.1$ МПа. Для балки Вm-3.2.2 із двома шарами скла напруження було майже ідентичним $\sigma_i = 2.0$ МПа. Тришарова балка при такому значенні навантаження досягнула значення напруження $\sigma_i = 1.1$ МПа, що майже вдвічі менше ніж попередні. Значення бокових деформацій при цьому становили $u_{y,i} = 0.3$ мм для балки Вm-3.1.1, $u_{y,i} = 0$ мм для балки Вm-3.2.2 та $u_{y,i} = 0.1$ мм для балки Вm-3.3.2.

При навантаженні $N_i = 5$ кН, співвідношення між значеннями напруження для одношарової та двошарової балки майже не змінилось. Для балки Вm-3.1.1 – $\sigma_i = 6.4$ МПа, а для балки Вm-3.2.2 – $\sigma_i = 6.5$ МПа. Для тришарової балки значення напружень було $\sigma_i = 5.8$ МПа. Бокові деформації при цьому зросли до $u_{y,i} = 1.6$ мм для одношарової балки, $u_{y,i} = 0.1$ мм для двошарової та $u_{y,i} = 0.4$ мм для тришарової балки.

Порівняння при навантаженні $N_i = 10$ кН показало наступні значення. Для одношарової балки Вm-3.1.1 значення напруження становило $\sigma_i = 13.6$ МПа. Двошарова балка Вm-3.2.2 набула значення $\sigma_i = 11.1$ МПа, а балка із трьома шарами скла $\sigma_i = 10.6$ МПа. Значення напружень були доволі близькі між собою за значенням. При цьому значення бокових деформацій становили $u_{y,i} = 4.3$ мм

для балки Вм-3.1.1, $u_{y,i} = 0.4$ мм для балки Вм-3.2.2 та $u_{y,i} = 0.9$ мм для балки Вм-3.3.2.

На рис.3.43 г, д, е зображено порівняльні графіки залежності відносних деформацій від прикладеного навантаження для аналогічних балок. Графіки поданні окремо для однакової кількості шарів скла. Балки серії висотою 100 мм показали себе найгірше, в порівнянні із балками серії 2 та серії 3. Їх графіки мали дуже стрімкий характер приросту в порівнянні із іншими двома серіями.

Згідно із отриманими даними було побудовано графік залежності зміни напружень σ_i від кількості шарів скла при дії контрольного навантаження N_i 1 кН, 5 кН та 10 кН (рис.3.44).

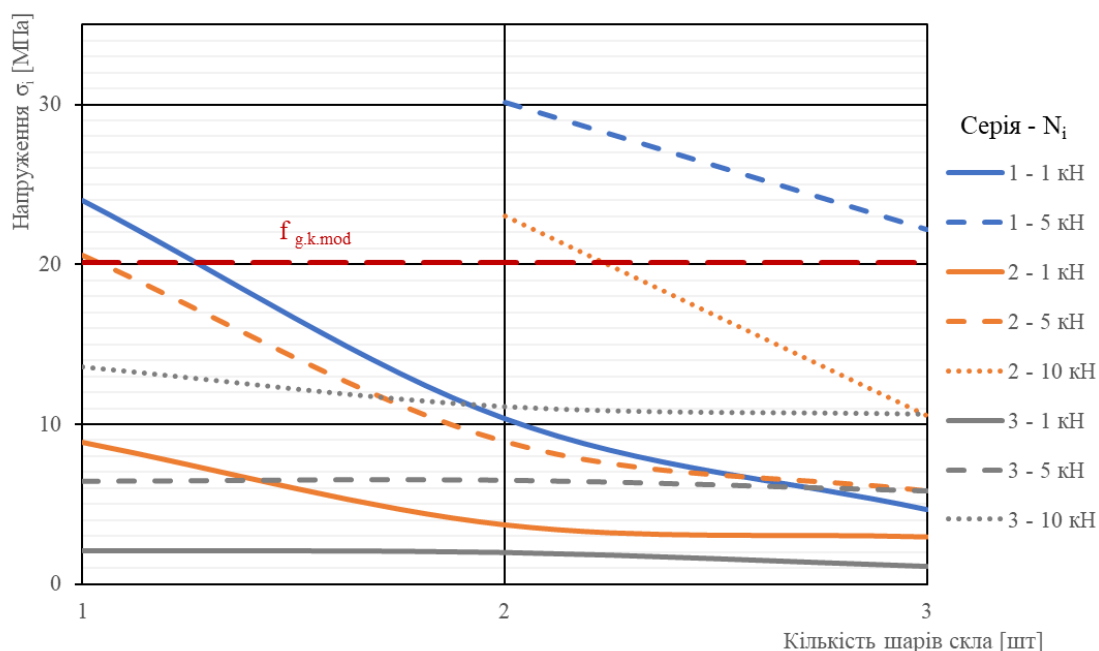


Рис.3.44. Графік залежності зміни напружень σ_i від кількості шарів скла.

Аналогічно до графіку на рис.3.44 було побудовано графік залежності зміни напружень σ_i від висоти балки при дії контрольного навантаження N_i 1 кН, 5 кН та 10 кН (рис.3.45).

Із рис.3.44. при контрольному навантаженні $N_i = 1$ кН, було розглянуто три серії балок. Балка серії 1 із одним шаром скла показала себе найгірше із значенням напруження при $N_i = 1$ кН – $\sigma_i = 24$ МПа. Після додавання одного шарів скла

значення напруження змінилось в 2.3 і становило $\sigma_i = 10.4$ МПа. Додавання третього шару скла, змінило напруження ще у 2.2 рази – $\sigma_i = 4.7$ МПа.

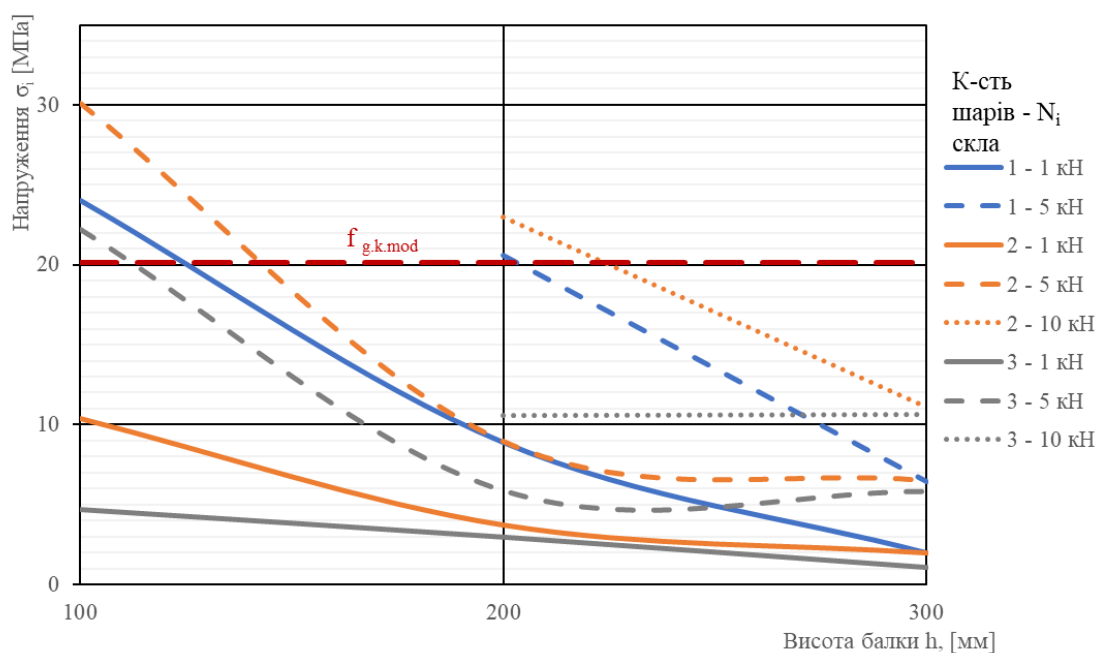


Рис.3.45. Графік залежності зміни напружень σ_i від висоти балки.

Балка серії 2 із одним шаром скла при $N_i = 1$ кН, мала значення напруження $\sigma_i = 8.9$ МПа. Додавання одного шару скла змінило значення напруження в 2.4 рази, його значення для двошарової балки становило $\sigma_i = 3.7$ МПа. Після додавання третього шару скла зменшення напруження уже не було таким стрімким, всього у 1.3 рази і становило $\sigma_i = 3.0$ МПа.

Балка серії 3 із одним шаром скла при навантаженні $N_i = 1$ кН, мала значення $\sigma_i = 2.1$ МПа. Із другим шаром скла це значення майже не змінилось і становило $\sigma_i = 2.0$ МПа. Уже із додаванням третього шару скла значення напруження змінилося у 1.8 разів – $\sigma_i = 1.1$ МПа.

Із рис.3.45, при контрольному навантаженні $N_i = 1$ кН, для балки із однаковою кількістю шарів скла проведено оцінку впливу зміни висоти балки. Для балки з одним шаром скла висотою 100 мм напруження становило $\sigma_i = 24$ МПа. Із збільшенням висоти до 150 мм, напруження зменшилось у 2.7 разів до $\sigma_i =$

8.9 МПа. При висоті балки 200 мм це значення уже становило у 4.2 рази менше – $\sigma_i = 2.1$ МПа.

При $N_i = 1$ кН, для балки із двома шарами та висотою 100 мм було зафіксовано напруження $\sigma_i = 10.4$ МПа. Із збільшенням висоти балки до 150 мм, значення напруження зменшилось у 2.8 рази і становило $\sigma_i = 3.7$ МПа. При висоті балки 200 мм значення напруження зменшилось у 1.9 разів і становило $\sigma_i = 2.0$ МПа.

Балка із трьома шарами скла висотою 100 мм, при $N_i = 1$ кН мала напруження $\sigma_i = 4.7$ МПа. Далі збільшення висоти до 150 мм, зменшило значення напруження у 1.6 до значення $\sigma_i = 3.0$ МПа. При висоті балки 200 мм це значення уже становило у 2.7 рази менше – $\sigma_i = 1.1$ МПа.

Отже при контрольному напруженні $N_i = 1$ кН, згідно графіків на рис. 3.44 та 3.45 добре себе показали балки серії 1 висотою 100 мм і двома шарами скла із значенням напруження $\sigma_i = 10.4$ МПа та балки серії 2 висотою 150 і одним шаром скла із напруженням $\sigma_i = 8.9$ МПа. Подальше додавання шарів скла та збільшення висоти, також давало позитивний ефект, але мало значно вищий запас несучої здатності.

У ході аналогічного аналізу графіків на рис. 3.44 та 3.45, було встановлено, що для значення контрольного навантаження $N_i = 5$ кН, найбільш ефективно було застосовувати балки серії 2 висотою 150 мм із двома шарами скла ($\sigma_i = 8.9$ МПа). Напруження балок серії 1 із висотою 100 мм, при навантаженні $N_i = 5$ кН перевищували значення допустимого напруження $f_{g.k.mod}$ та не можуть бути застосовані при даному навантаженні.

Для контрольного навантаження $N_i = 10$ кН на рівних показали себе балки серії 3 висотою 200 мм із одним та двома шарами скла та напруженнями $\sigma_i = 11.1 \dots 13.6$ МПа та балка серії 2 висотою 150 мм із трьома шарами скла, яка мала значення напруження $\sigma_i = 10.6$ МПа.

Не зважаючи на те, що балки із одним шаром скла показали себе добре у даних порівняннях їх застосовування не рекомендоване виходячи із міркувань

безпеки та схильності до надмірної бокової деформації. Наприклад, для балки серії 3 висотою 200 мм із одним шаром скла, боковий вигин становив $u_{y,i} = 4.3$ мм.

Застосування кореляції цифрових зображень

Для визначення відносних деформацій було використано два методи дослідження (п.2.3) – на грані 1 за допомогою механічних екстензометрів та на грані 2 за допомогою методу кореляції цифрових зображень (п.2.5). Протокол дослідження скляних балок за допомогою методу кореляції цифрових зображень поданий у додатку В на прикладі балки Вm-2.2.1. Для дослідження скляних конструкцій даний метод уже був застосований у роботах [93,94], та був адаптований за допомогою масштабуючих коефіцієнтів, у роботі [99]. Для дослідження скляних плит була використана методика із використанням цифрової користувачької фотокамери яка описана у п.2.5 і показала високу збіжність отриманих результатів (п.3.4 [99]). У дослідженні [99] було виконано порівняння дублюючого механічного екстензометра на одній грані скляної балки.

У свою чергу таке порівняння є репрезентативним для порівняння в межах дослідження скляних балок, оскільки не було використано двох методів для заміру відносних деформацій для однієї грані балки. Та якщо співставити значення відносних деформацій для одношарових балок, то значення отримані за допомогою КЦЗ мали високу збіжність із значеннями отриманими за допомогою механічних екстензометрів (рис.3.10, 3.20, 3.30).

Отже, згідно із дослідженням скляних балок та скляних плит [99], використання цифрових користувачьких фотокамер, як джерела зчитування мало місце при виконанні усіх супутніх умов експерименту, які описані у п.2.5, та підходить для дослідження зразків, які навантажуються поетапно та не вимагають виконання зчитування зображень у швидкій серійній зйомці. Проте, використання саме такого джерела зчитування зображень для КЦЗ, вимагає від дослідника чималих зусиль для попередньої підготовки зразка, роботи із зразком під час експерименту та подальшої обробки зображень у спеціалізованому програмному забезпеченні.

Аналіз характеру руйнування скляних балок

За характером руйнування усі балки, окрім Вm-3.2.1, мали однаковий вигляд. Даний характер руйнування був ідентичним до попередніх досліджень скляних балок [108,109]. Руйнування такого вигляду, дослідники називають «тюльпаноподібним», даний термін для опису руйнування прийнято застосовувати і у даній роботі.

У тюльпаноподібному характері руйнування можна виділити два основних етапи (рис.3.46).

Етап 1 – це розкриття тріщини у нижній розтягненій зоні (рис.3.47). Утворена тріщина була вертикальною, яка поширювалась на висоту більше 10 мм від низу балки. Утворення тріщини відбувалось миттєво на всю її висоту. За виглядом ця тріщина була наче прямий гладкий поріз без утворення сусідніх тріщин.

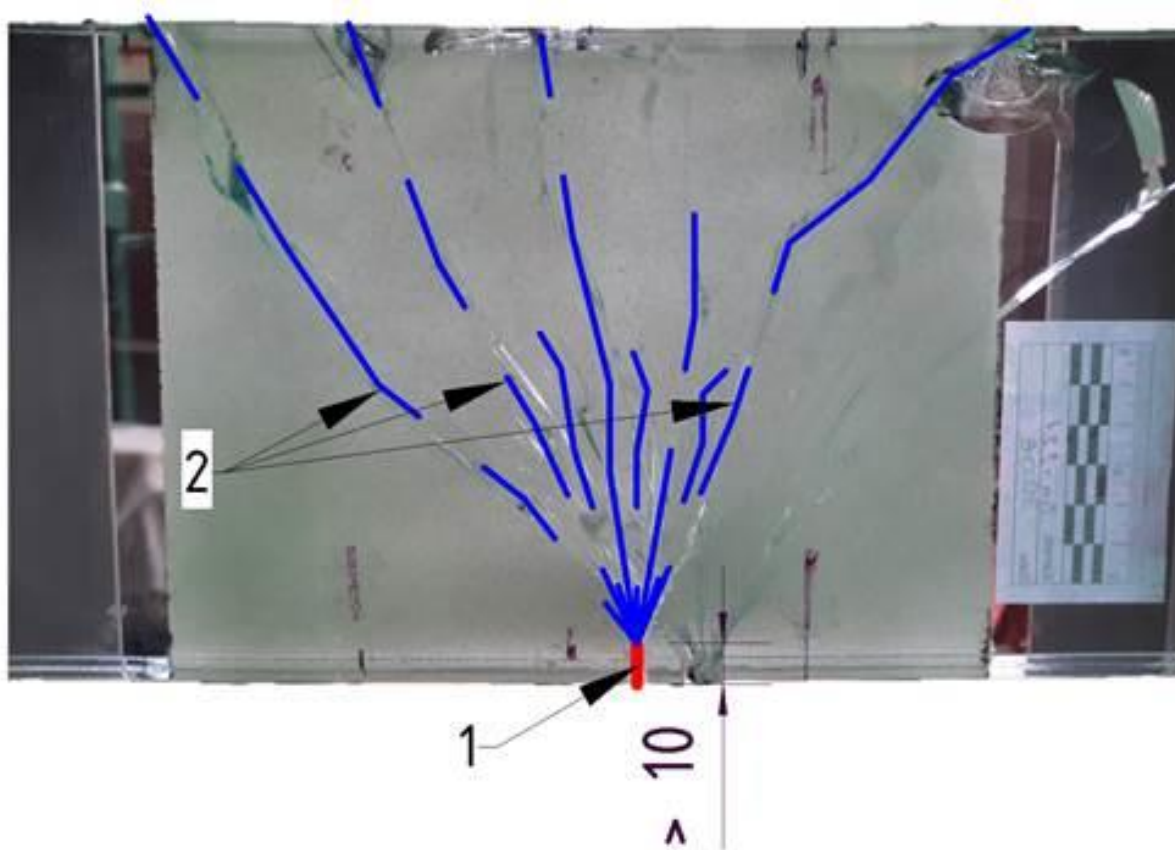


Рис.3.46. Тюльпаноподібний характер руйнування скляної балки:

1- Етап 1; 2- Етап 2

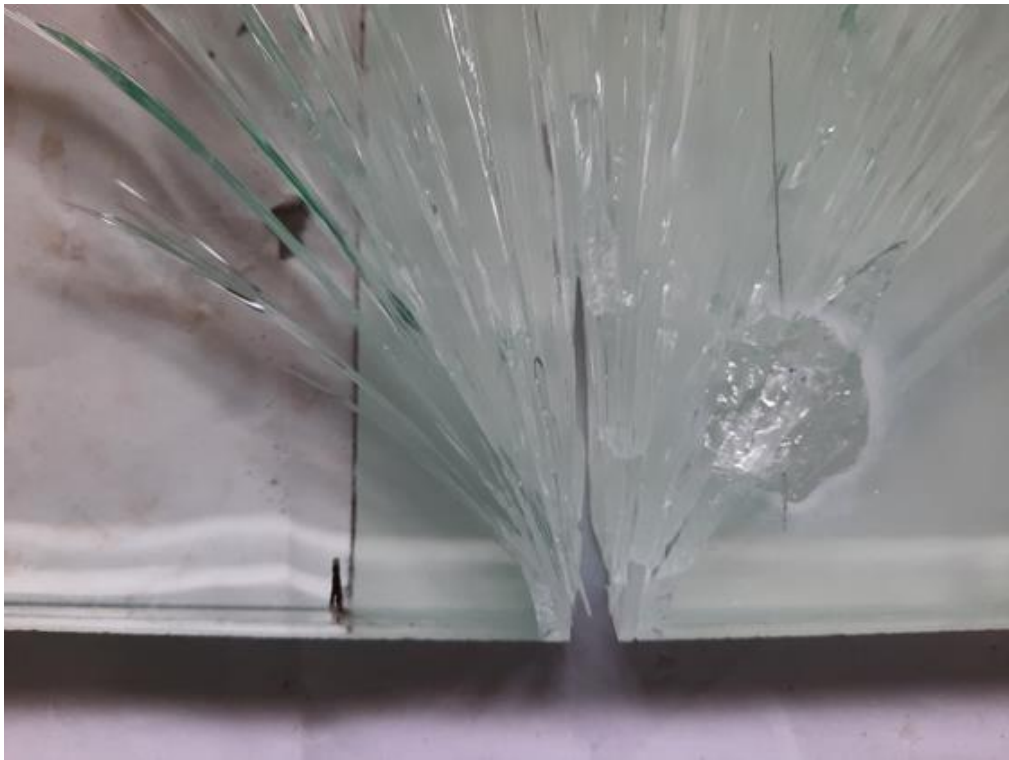


Рис.3.47. Розкриття первинної тріщини у нижній зоні скляної балки.

Етап 2 – розкриття тріщини від верху первинної тріщини до верхньої зони балки. Даний етап відбувся миттєво відразу після етапу 1. Тріщини брали свій початок від верхньої точки первинної тріщини і поширювались під різними кутами, утворюючи своїм виглядом сітку тріщин схожу по формі на пелюстку тюльпану.

Даний характер руйнування підтверджує руйнування балки від дії згинального моменту в зоні його максимального значення. Максимальне нормальне напруження – це напруження розтягу, яке утворювалось у нижній зоні.

3.4. Висновки до розділу 3

1. За результатами дослідження скляних зразків на триточковий згин було отримано результати міцності скла на розтяг при згині. Проведено статистичний аналіз отриманих результатів та отримано характеристичне значення міцності скла на розтяг при згині. Для серії 1, зразків які досліджувались із горизонтальною орієнтацією, характеристична міцність скла становила $f_{g,k} = 35,8$ МПа. Для зразків серії 2, із вертикальною орієнтацією зразка – $f_{g,k} = 32,23$ МПа. За отриманими

значення результатів було визначено розрахункове значення міцності скла на розтяг при згині згідно із prEN 16612, яке становило $f_{g,d} = 17.93$ МПа.

2. Усі балки окрім, балки Вm-2.3.1, мали однаковий характер руйнування: спочатку утворювалась тріщина у нижній розтягненій зоні, яка потім поширювалась у вигляді тюльпанової пелюстки до верхньої зони. Балки зруйнувались внаслідок вичерпання несучої здатності на згин. Значення руйнівного напруження для великої кількості досліджених балок перевищувало характеристичне значення міцності на розтяг при згині $f_{g,k}$. Для прогнозування руйнування тонких скляних балок, які працюють на згин, рекомендовано занижувати міцність на коефіцієнт 1.6, який відповідає значенню коефіцієнта надійності за матеріалом для звичайного флоат скла згідно із prEN 16612.

4. Тривалість та швидкість прикладання навантаження мають прямий вплив на несучу здатність скляних балок. Скляні балки, які досліджувались із постійним приростом навантаження мали значно вище значення нормального напруження в момент навантаження N_i . Для одношарових балок різниця у відносних деформаціях при навантаженні $N_i = 1$ кН, склала до 3-х разів. Для двошарових балок при $N_i = 1$ кН значення відрізнялись до 5-ти разів, та у 2.7 рази при навантаженні $N_i = 5$ кН. При цьому значення руйнівних навантажень відрізнялись у 1.2 рази, однаково для одношарових та двошарових балок.

5. Порівняння балок при контрольних навантаженнях показало, що як і збільшення кількості шарів скла, так і збільшення висоти балки позитивно впливають на значення запасу несучої здатності. При значенні $N_i = 1$ кН найбільш ефективним було застосування балки серії 1, вистою 100 мм і двома шарами скла із значенням напруження $\sigma_i = 10.4$ МПа. Для навантаження $N_i = 5$ кН – балки серії 2 висотою, 150 мм із двома шарами скла та напруженнями $\sigma_i = 8.9$ МПа. При $N_i = 10$ кН – двошарову балку серії 3 із висотою 200 мм або тришарову балку серії 2, значення напружень при цьому становили $\sigma_i = 11.1$ МПа та $\sigma_i = 10.6$ МПа відповідно. Використання балок із 1 шаром скла не є рекомендованим, оскільки вони схильні до великих бокових деформацій та небезпечні під час повного руйнування конструкцій.

6. Використання користувацьких фотокамер із кольоровою матрицею, як джерела записування інформації та подальшого її аналізу за допомогою методу кореляції цифрових зображень є виправданим. У даному дослідженні покази отримані методом КЦЗ показали високу збіжність із результатами отриманими за допомогою механічних приладів.

РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРОЕКТУВАННЯ СКЛЯНИХ БАЛОК

4.1. Аналітичний розрахунок скляних балок на згин із урахуванням втрати стійкості

Розрахунок напружено-деформованого стану скляних балок на чотири-точковий згин за 1-ою групою граничних станів передбачає розрахунок за нормальними напруженнями із урахуванням втрати стійкості. У практичному використанні перевірка несучої здатності балки має вигляду 4.1 (6.77 [135] та п.7.3 [25]) . Наведений підхід використовує апроксимацію на основі кривих втрати стійкості виражених у коефіцієнтах α_{LT} та α_0 п.6.4.3.1[135].

$$M_{Ed} \leq \chi_{LT} \cdot W_z \cdot f_{g;d}, \quad (4.1)$$

де, M_{Ed} – розрахунковий згинальний момент;

$W_z = \frac{bh^2}{6}$ – момент опору відносно осі «z»;

$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}$ – знижувальний коефіцієнт втрати стійкості за

втратою плоскої форми згину;

$$\phi_{LT} = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \alpha_0) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right];$$

$\alpha_{LT} = 0.26$ – коефіцієнт недосконалості для кривої втрати стійкості скляних балок при згині п.6.4.3.1[135];

$\alpha_0 = 0.2$ – обмежувальний коефіцієнт недосконалості для кривої втрати стійкості скляних балок при згині п.6.4.3.1[135];

$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_{g;d}}{M_{cr,z}}}$ – приведення значення умовної гнучкості;

$M_{cr,z}$ – критичний момент втрати стійкості відносно осі «z».

Коефіцієнт α_0 – є верхньою межею умовної гнучкості, для якої можна використовувати рівність 4.1 [25,135]. При $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0.2$, знижувальний коефіцієнт втрати стійкості χ_{LT} буде мати значення рівне 1, а отже рівняння 4.1 набудатиме вигляду 4.2:

$$M_{Ed} \leq W_z \cdot f_{g;d} \quad (4.2)$$

За наведеною вище методикою був визначено розрахунковий момент для скляних балок кожної серії. Для визначення розрахункових геометричних характеристик балок були використанні дані замірів подані у табл.2.2. Значення розрахункової міцності скла $f_{g;d}$ прийнято з рівняння 3.2. Результати теоретичного розрахунку скляних балок на згин із урахуванням втрати стійкості подані у табл.4.1. Алгоритм розрахунку скляних балок із урахуванням втрати стійкості подано на рис.4.1.

Табл. 4.1

Теоретичний розрахунок скляних балок на згин із урахуванням втрати стійкості

Марка	Критичний момент $M_{cr,z}$	λ_{LT}	χ_{LT}	Розрахункове навант. N_d	Розрахунковий момент M_{Ed}	Макс. експериментальний момент M_u	Коеф. викор. перерізу $f_{g,d}/\sigma_u$
	[кН·м]			-	-	[кН]	[кН·м]
Vm-1.1.1	2.63	0.34	0.96	1.7	0.29	0.59	0.50
Vm-1.1.2	2.59	0.34	0.96	1.7	0.29	0.48	0.60
Vm-1.1.3	2.81	0.33	0.96	1.7	0.30	0.39	0.77
Vm-1.1.4	2.77	0.33	0.96	1.7	0.29	0.39	0.76
Vm-1.1.5	2.63	0.34	0.96	1.7	0.29	0.41	0.71
Vm-1.1.6	2.63	0.34	0.96	1.7	0.29	0.86	0.33
Vm-1.2.1	20.98	0.17	1.00	3.4	0.59	1.20	0.50
Vm-1.2.2	21.08	0.17	1.00	3.4	0.60	1.23	0.49
Vm-1.2.3	23.52	0.16	1.00	3.5	0.62	0.74	0.85
Vm-1.2.3	23.85	0.16	1.00	3.5	0.62	1.09	0.57
Vm-1.3.1	78.42	0.11	1.00	5.3	0.93	1.27	0.74
Vm-1.3.2	78.35	0.11	1.00	5.3	0.94	1.44	0.65
Vm-2.1.1	4.23	0.40	0.94	3.9	0.65	1.44	0.45
Vm-2.1.2	4.11	0.41	0.94	3.9	0.65	1.44	0.45
Vm-2.2.1	35.50	0.20	1.00	7.9	1.40	2.32	0.60
Vm-2.2.2	32.29	0.20	1.00	7.7	1.35	2.15	0.63
Vm-2.3.1	116.79	0.13	1.00	11.9	2.08	2.68	0.78
Vm-2.3.2	118.82	0.13	1.00	12.0	2.10	2.85	0.74
Vm-3.1.1	5.44	0.47	0.92	6.8	1.10	2.34	0.47
Vm-3.1.2	5.38	0.47	0.92	6.9	1.10	1.81	0.61
Vm-3.2.1	46.61	0.23	0.99	14.1	2.45	4.27	0.58
Vm-3.2.2	47.18	0.23	0.99	14.1	2.46	4.62	0.53
Vm-3.3.1	163.02	0.15	1.00	21.4	3.76	5.67	0.66
Vm-3.3.2	163.36	0.15	1.00	21.0	3.68	6.37	0.58

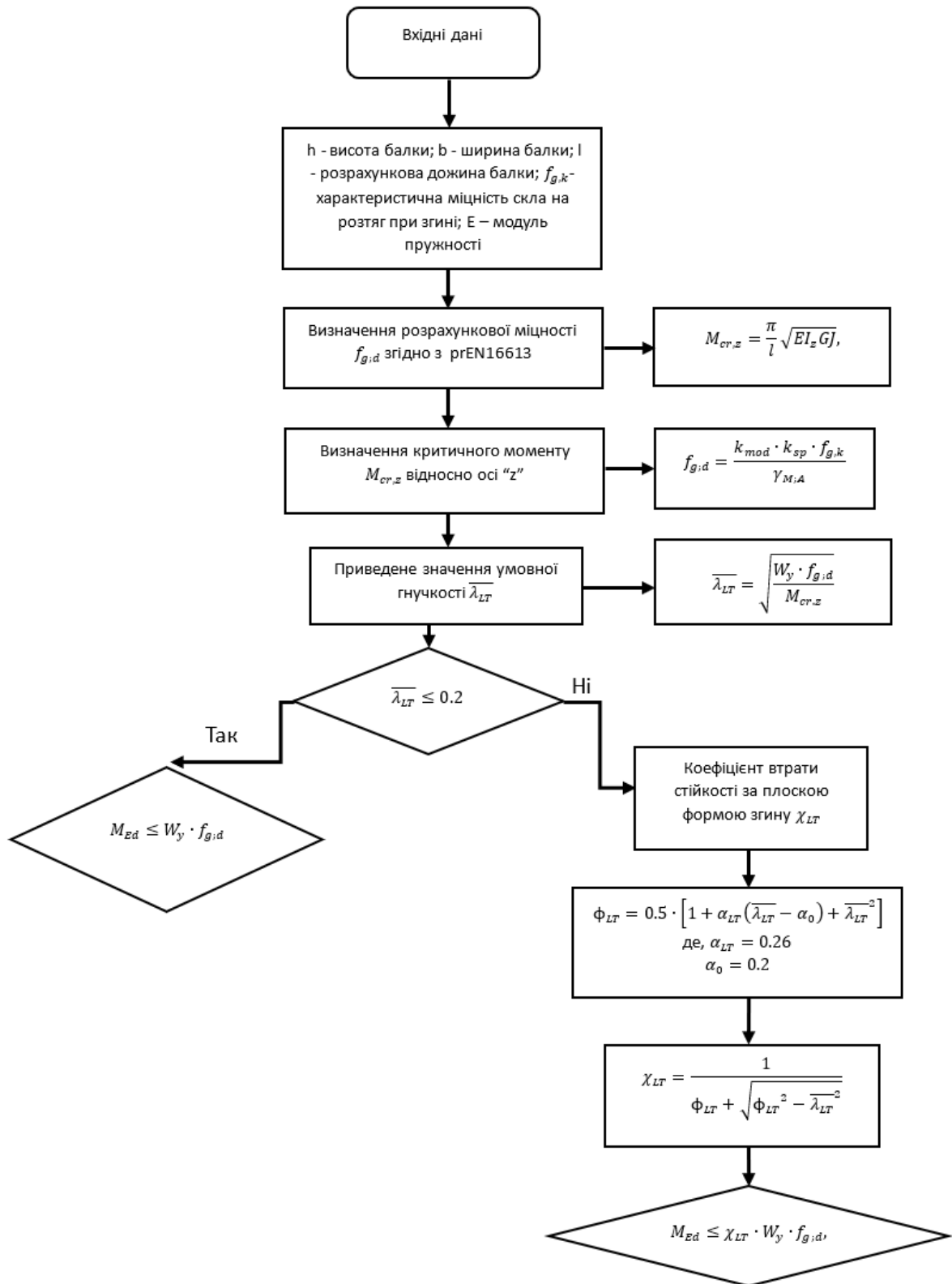


Рис.4.1. Алгоритм розрахунку скляних балок із урахуванням втрати стійкості

Як видно з таблиці 4.1, коефіцієнт який відповідає за вплив втрати стійкості χ_{LT} , мав місце для одношарових балок. Зі збільшенням висоти перерізу балки зменшувалось значення даного коефіцієнту. Аналітичний розрахунок скляних балок на згин із урахуванням втрати стійкості за кривими наведеними у [135] дає

достатній запас міцності і може бути використаний для проектування скляних балок.

4.2. Розрахунок скляних балок, які працюють на згин методом скінчених елементів

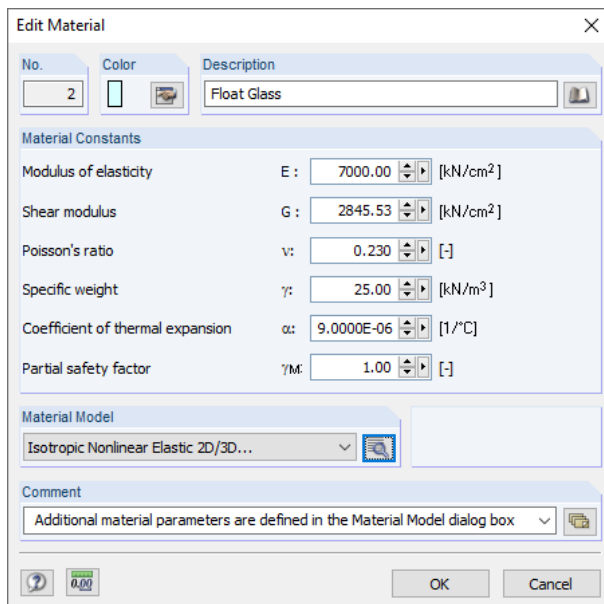
Розрахунок балок був виконаний у програмному комплексі Dlubal RFEM [143] із використанням додаткових модулів нелінійності та модуля розрахунку скляних пластинчатих елементів RF-Glass. Метою моделювання була перевірка максимальних напружень, які виникали в балці під час руйнівного навантаження та оцінка використання модуля для проектування скляних конструкцій RF Glass у проектуванні скляних балок.

Для цього було виконано наступні скінчено-елементні задачі:

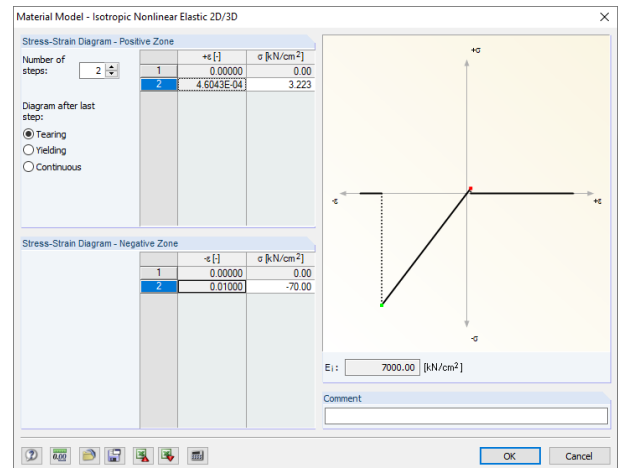
- Модель виконана за допомогою об'ємних скінчених із нелінійними характеристиками матеріалів елементів із заданим навантаженням;
- Модель виконана за допомогою пластинчатих скінчених елементів, та проаналізована у додатковому модулі RF-Glass, який використовує лінійні залежності для матеріалів.

Для моделювання скляних балок об'ємними скінченими елементами було використано матеріал, із характеристиками скла, отриманими з експериментальних досліджень у п.3.1. Матеріал скла був заданий з нелінійними властивостями. На рис. 4.2, а зображено характеристики скла, а на рис.4.2, б зображено параметри фізичної нелінійності даного матеріалу. Характеристики матеріалу плівки для триплексу були використанні з технологічної карти EVASAFE [140]. Параметри матеріалу плівки зображені на рис.4.2, в.

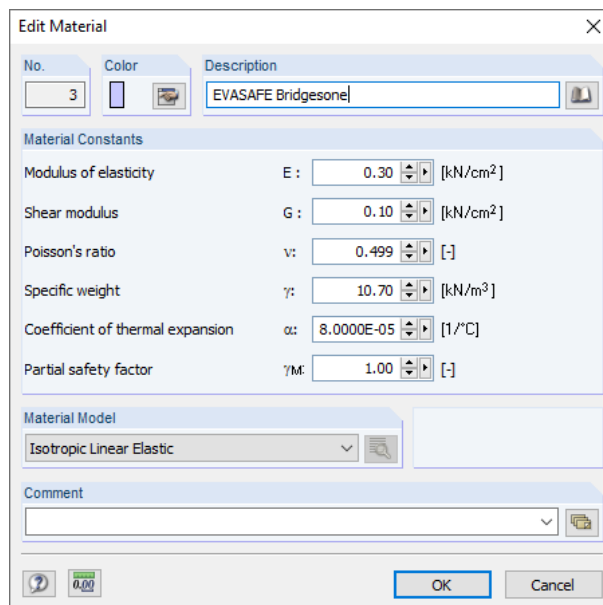
Об'ємні скінченні елементи були застосовані двох типів. Перший – це елемент типу «Solid», який передає зусилля у всіх напрямках. Другий тип застосовувався для плівки, а саме елемент типу «Contact», що використовує тіло об'ємного елемента як площину для передачі зусилля зі заданими умовами. У даному випадку – це була передача зсуву між шарами.



a)



б)



в)

Рис.4.2. Характеристики матеріалів в програмному комплексі Dlubal RFEM: а) характеристики скла; б) параметри фізичної нелінійності; в) параметри плівки EVASAFE.

Скінчено елементна модель на прикладі балки із двома шарами скла зображена на рис.4.3. Модель виконана у відповідності до схеми дослідження балки на чотириточковий згин (див п.2.3 - 2.4). Відстань між опорами становила 900 мм, також було застосоване бокове розкріплення. Відстань від краю балки до точки прикладання навантаження становила 400 мм, відстань між точками прикладання навантаження 200 мм.

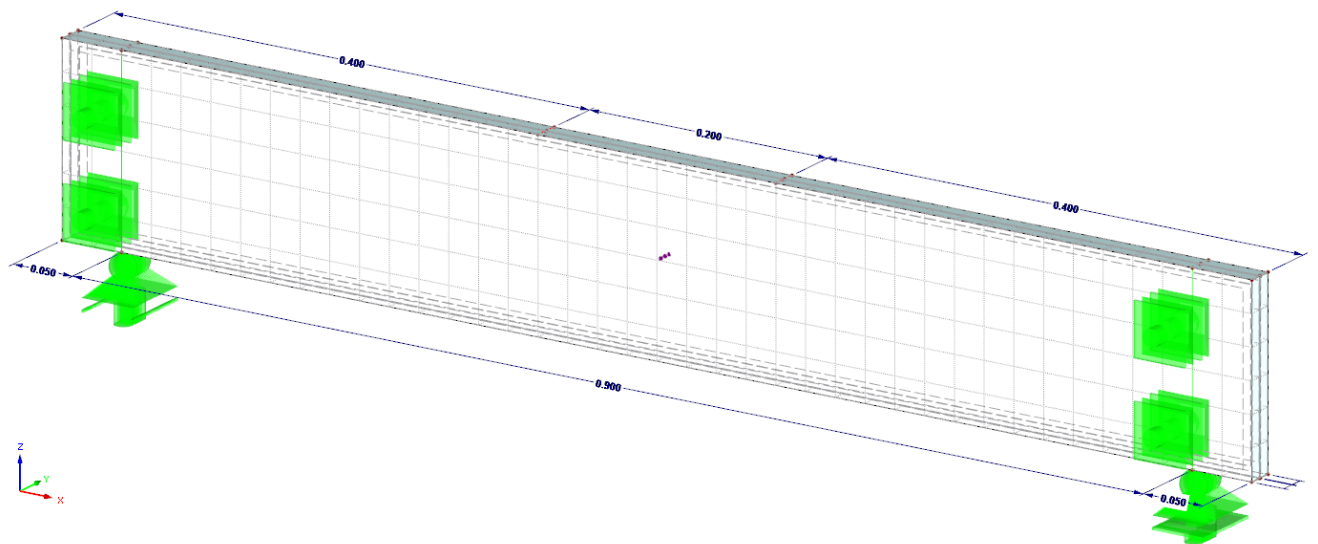


Рис.4.3. Загальний вигляд CE моделі в програмному комплексі Dlubal RFEM з використанням об'ємних скінчених елементів.

Для аналізу скляних балок в модулі RF-Glass було виконано пластинчасту модель балки. Пластини були виконані товщиною 10 мм для одношарової балки, 20 мм для двошарової та 30 мм для тришарової. Такий аспект моделювання зумовлений специфікою роботи із додатковим модулем RF-Glass. Далі у модулі RF-Glass було виконано моделювання шарів балки. На рис.4.4 зображений приклад такого моделювання для балки з трьох шарів.

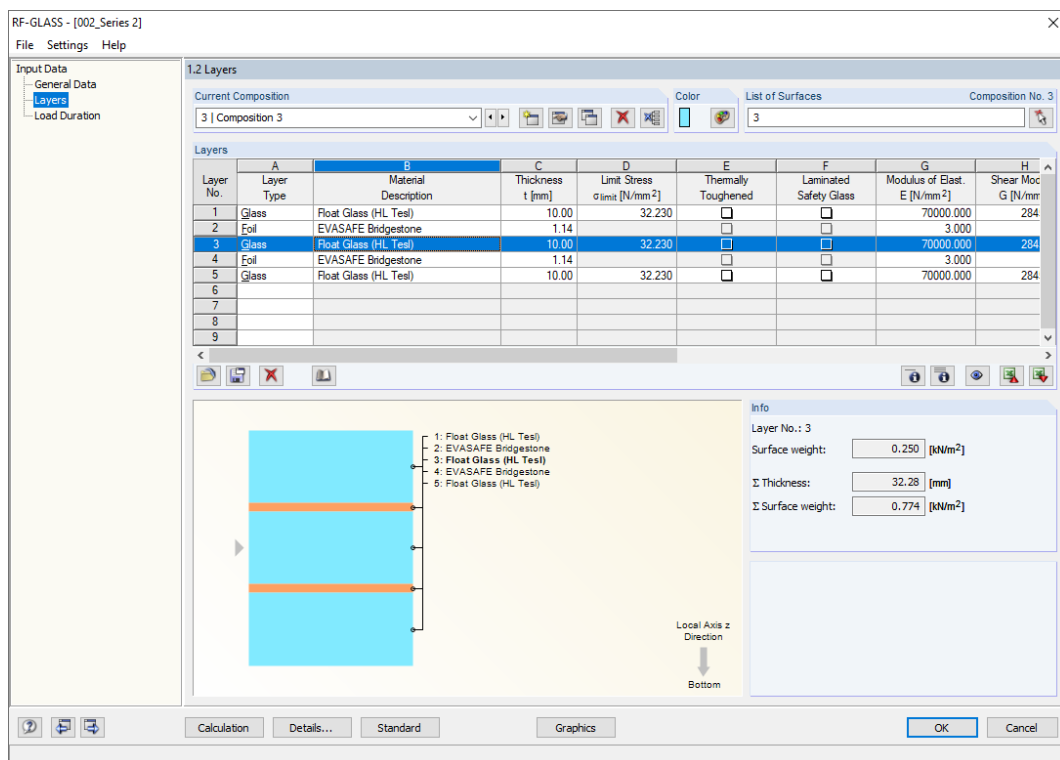


Рис.4.4. Моделювання шарів балки у RF-Glass.

Балки було завантажено розрахунковим навантаженням N_d , визначеним із рівняння 3.4. Отримано результати розрахунку. Для об'ємних скінчених елементів було отримано значення максимальних напружень $\sigma_{FEM.1}$. А також результати граничних напружень отримані за допомогою модуля для проектування RF-Glass.

За результатами розрахунку з використанням об'ємних скінчених елементів із нелінійними характеристиками скла було отримано епюри розподілу зусиль та напружень. На рис.4.5 зображено епюру нормальних напружень $\sigma_{FEM.1}$ на прикладі двошарової балки висотою 150 міліметрів. Із розподілу напружень видно, що значення нормальних напружень стиску у верхній зоні були більшими, ніж напруження розтягу у нижній: $\sigma_{FEM.1\text{верх}} = -19.3$ МПа та $\sigma_{FEM.1\text{низ}} = 17.3$ МПа. Це відповідає характеру приросту значення відносних деформацій які були подані у розділі 3. При моделюванні об'ємними скінченими елементами напруження у нижній зоні були близькими до значення розрахункової міцності скла на розтяг при згині $f_{g;d} = 17.93$ МПа при навантаженні N_d . Результати розрахунку подані у табл.4.2.

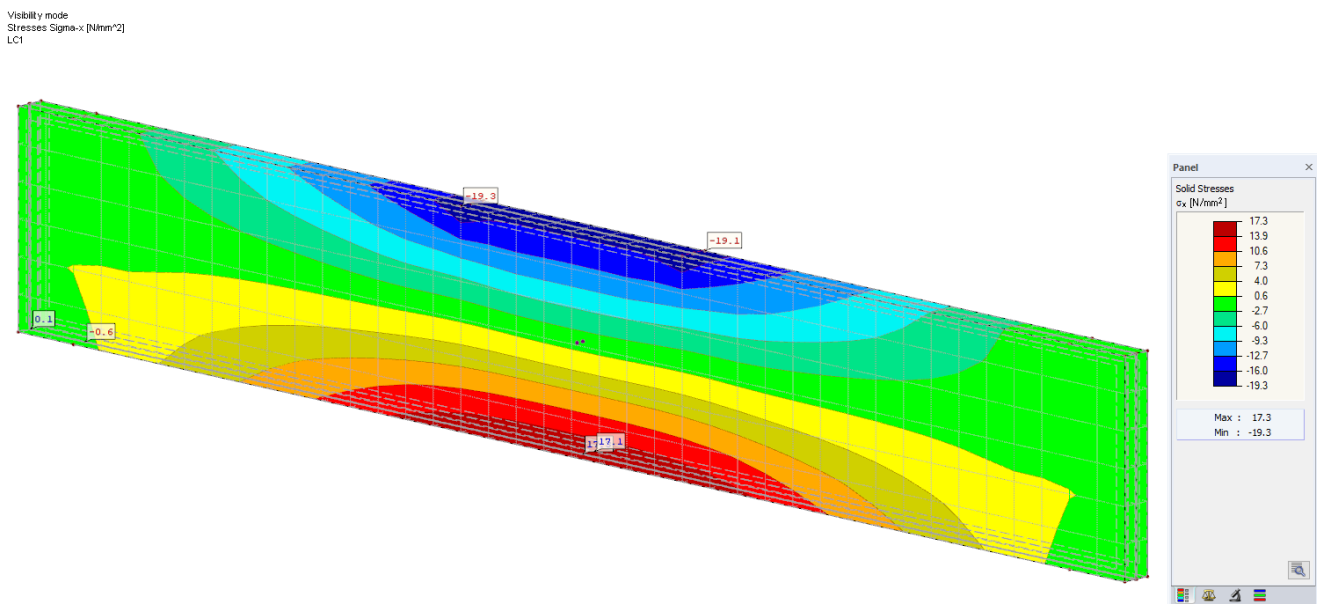


Рис.4.5. Епюра нормальних напружень $\sigma_{FEM.1}$.

Результати розрахунку за допомогою додаткового модуля RF-Glass, показали більші значення нормальних напружень. На прикладі аналогічної балки з двох шарів скла висотою 150 мм, були отримані значення напружень $\sigma_{FEM.2\text{верх}} =$

–21.24 МПа та $\sigma_{FEM.2\text{низ}} = 18.36$ МПа (рис.4.6). Ці значення перевищували значення розрахункової міцності скла на розтяг при згині $f_{g;d} = 17.93$ МПа. Результати розрахунку подані у табл.4.2.

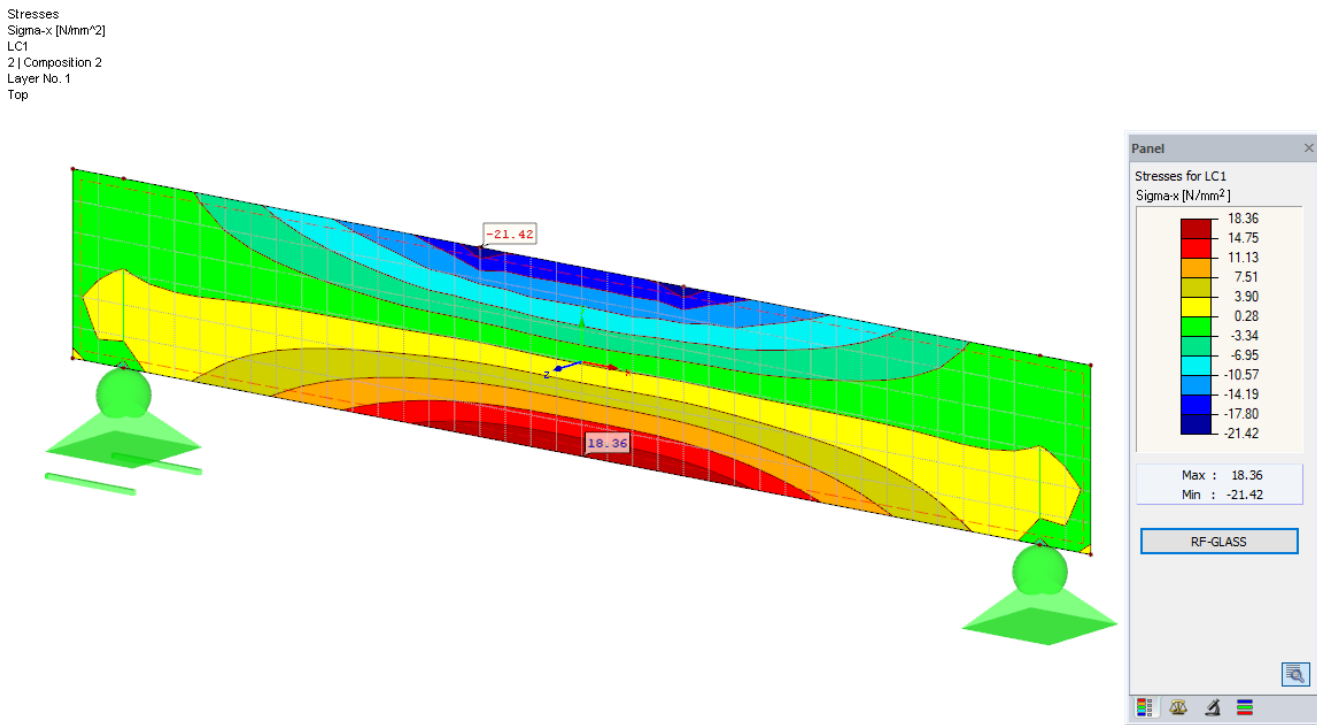


Рис.4.6. Епюра нормальних напружень $\sigma_{FEM.2}$.

Додатковий модуль розрахунку скляних пластинчатих елементів дозволяє також побачити нормальні напруження у кожному шарі скла (рис.4.7). Даний модуль спеціалізується на пластинчатих елементах, тобто призначений для плит. Тому аналіз напружень в перерізі можна виконати лише вздовж локальної осі z пластини у зонах максимальних напружень, можливості отримати такий ж аналіз для вздовж осі y не передбачено.

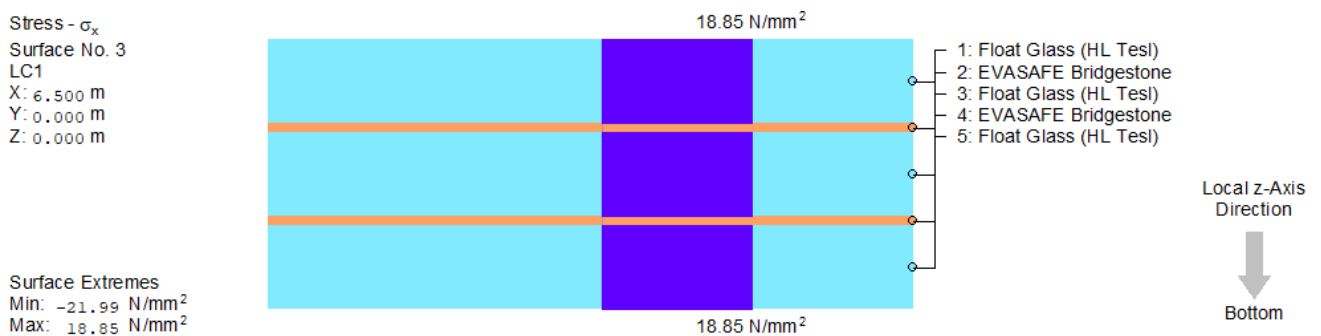


Рис.4.7. Аналіз напружень у кожному шарі скла у RF-Glass.

Розрахунок скляних балок на згин методом скінченних елементів

Марка	Розр. на- вант. N_d	$\sigma_{FEM.1низ}$	$\sigma_{FEM.1верх}$	$\sigma_{FEM.2низ}$	$\sigma_{FEM.2верх}$
	[кН]	[МПа]	[МПа]	[МПа]	[МПа]
Vm-1.1	1.7	16.5	-17.2	18.28	-19.25
Vm-1.2	3.4	16.3	-17.1	18.07	-19.03
Vm-1.3	5.3	16.8	-17.8	18.7	-19.69
Vm-2.1	3.9	17.4	-19.5	18.69	-21.81
Vm-2.2	7.7	17.3	-19.3	18.36	-21.42
Vm-2.3	11.9	17.6	-19.8	18.85	-21.99
Vm-3.1	6.8	17.5	-21.5	18.51	-24.59
Vm-3.2	14.1	17.9	-22.6	19.06	-25.31
Vm-3.3	21.0	17.3	-21.3	18.24	-24.23

Отже, із результатів розрахунку скляних балок методом скінчених елементів, значення напружень отримані за допомогою МСЕ розрахунку з використання нелінійних властивостей матеріалів показав ближчі значення максимальних напружень до тих, які були визначенні аналітично, але вони мали менше значення, ніж розрахункова міцність скла на розтяг при згині. Додатковий спеціалізований модуль для проектування пластинчатих скляних конструкцій RF-Glass, у якому застосовувались лінійні залежності для характеристик матеріалів, в результаті надає більші значення максимальних напружень, що позитивно впливає на запас міцності. Функціонал даного модулю призначений для розрахунку плит, але можливість розрахунку та проектування балок у даному модулі також присутня.

4.3. Рекомендації щодо проектування тонких скляних балок

Після проведення та аналізу досліджень і виконання теоретичних розрахунків балок на стійкість при згині, оцінки використання методу скінчених елементів для аналізу складного напруженого стану скляних балок після втрати стійкості, було розроблено наступні рекомендації щодо проектування скляних балок:

1. Рекомендовано виготовляти тонкі багат шарові скляні балки із флоат скла за технологією триплекс.

2. Експлуатацію тонких скляних балок, що працюють на чотириточковий згин необхідно виконувати в межах розрахункового значення міцності на розтяг при згині. Для визначення розрахункового значення міцності при згині рекомендовано використовувати методику із використанням коефіцієнтів тривалості навантаження згідно із prEN 1661.

3. Розрахунок несучої здатності тонких багат шарових скляних балок рекомендовано використовувати методику розрахунку міцності перерізу на згин з понижувальним коефіцієнтом втрати стійкості, який визначається за кривими втрати стійкості з використанням коефіцієнтів $\alpha_0 = 0.2$ та $\alpha_{LT} = 0.26$, для визначення параметрів цих кривих.

4. Рекомендовано використовувати балки з двох та більше шарів скла для забезпечення додаткової стабільності балки та безпеки експлуатації конструкції.

5. Для розрахунку конструкцій тонких багат шарових скляних балок методом скінчених елементів рекомендовано використовувати RF-Glass, у якому застосовуються лінійні залежності для характеристик матеріалів.

4.4. Висновки до розділу 4

1. Виконано аналітичний розрахунок тонких багат шарових скляних балок на чотириточковий згин із понижувальними коефіцієнтами втрати стійкості згідно з CNR-DT-210. Визначення коефіцієнта втрати стійкості було виконано за кривими втрати стійкості з використанням коефіцієнтів $\alpha_0 = 0.2$ та $\alpha_{LT} = 0.26$. Даний метод показав достатній запас міцності для скляних балок та може бути використаний для проектування скляних балок.

2. Виконано розрахунок скляних балок на чотириточковий згин із використанням методу скінчених елементів. Розрахунок полягав у використанні нелінійних залежностей матеріалу та об'ємних скінчених елементів для моделювання скляних багат шарових балок. Даний метод показав велику збіжність

із аналітичними розрахунками та може бути використаний у проектуванні скляних конструкцій.

3. Додатковий модуль для розрахунку та проектування скляних конструкцій RF -Glass, який входить до програмного комплексу Dlubal RFEM, був використаний для розрахунку скляних балок які працюють на чотириточковий згин. Даний модуль базується на методі скінчених елементів із використанням пластинчатих SE та лінійну залежністю для характеристик матеріалів. Результати максимальних напружень отримані даним методом були більшими за значення, отримані аналітично.

4. За результатами досліджень наведено рекомендації щодо проектування тонких багатосарових скляних балок, які працюють на чотириточковий згин.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Було виконано аналіз актуальних досліджень тонких багатошарових скляних балок, встановлено сучасний стан тематики дослідження, визначено і поставлено основні напрямки дослідження та завдання несучої здатності скляних балок, які працюють на чотириточковий згин. Виконано аналіз використання методу кореляції цифрових зображень із використанням користувацьких бездзеркальних камер із кольоровим сенсором, як джерела записування інформації.

2. Виконано дослідження міцності двох серій скляних зразків скла на розтяг при згині із різною орієнтацією зразків відносно ширини поперечного перерізу. За результатами дослідження проведено статистичний аналіз величини міцності скла на згин за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла. Для серії 1, зразків які досліджувались із горизонтальною орієнтацією, характеристична міцність скла становила $f_{g,k} = 35,8$ МПа. Для зразків серії 2, із вертикальною орієнтацією зразка – $f_{g,k} = 32,23$ МПа. За отриманими значення результатів було визначено розрахункове значення міцності скла на розтяг при згині згідно із prEN 16612, яке становило $f_{g,d} = 17,93$ МПа.

3. Розроблено методику дослідження скляних балок на чотириточковий згин із ступінчастим приростом навантаження. Для дослідження було виготовлено дослідну установку для випробовування скляних балок на згин. На дану дослідну установку отримано патент «Установка для випробування скляних балок на чотириточковий згин», Патент України на корисну модель №153096.

4. Було випробувано 24 тонких скляних балки на чотириточковий згин згідно з програмою дослідження. Балки виготовленні з різною висотою та різними шарами скла. Експериментально визначено значення допустимого напруження для безпечної експлуатації тонких багатошарових скляних балок. Значення обмеження напруження досягалися при заниженні міцності на розтяг при згині на коефіцієнт 1.6, що відповідає значенню коефіцієнта надійності за матеріалом для звичайного флоат скла згідно із prEN 16612.

На несучу здатність балок впливав фактор тривалості та швидкості прикладання навантаження. Для одношарових балок серії 1 висотою 100 мм, при

контрольному навантаженні $N_i = 1$ кН, різниця в напруженні для балок, які досліджувались із постійним приростом навантаження та ступеневим, становила до 3-х разів більше для балок із постійним приростом навантаження. Для двошарових при $N_i = 1$ кН, збільшення напруження було до 5 разів та у 2.7 рази при навантаженні $N_i = 5$ кН.

При порівнянні балок із різною кількістю шарів скла та різною висотою перерізу при контрольних навантаженнях було побудовано графіки залежності напружень від змінної кількості шарів скла та висоти перерізу балки. Було визначено, що при значенні контрольного навантаження $N_i = 1$ кН найбільш ефективним було застосування балки висотою 100 мм із двома шарами скла, яка мала значення напруження $\sigma_i = 10.4$ МПа. Для значення контрольного навантаження $N_i = 5$ кН, найбільш ефективними були балки висотою 150 мм та двома шарами скла, із напруженням $\sigma_i = 8.9$ МПа. При навантаженні $N_i = 10$ кН – балки висотою 200 мм із двома шарами скла та балки висотою 150 мм із трьома шарами, що мали значення напружень $\sigma_i = 11.1$ МПа та $\sigma_i = 10.6$ МПа відповідно. Балки із одним шаром скла не рекомендовано застосовувати для конструкцій, оскільки вони схильні до великих бокових деформацій та небезпечні під час повного руйнування конструкцій.

Усі балки окрім, балки Вm-2.3.1, мали однаковий характер руйнування: спочатку утворювалась тріщина у нижній розтягненій зоні, яка потім поширювалась у вигляді тюльпанової пелюстки до верхньої зони.

5. Було використано користувацьку фотокамеру із кольоровим сенсором як джерела записування інформації. Уточнено та описано методику підготовки експерименту та подальшого її аналізу отриманих результатів за допомогою методу кореляції цифрових зображень. КЦЗ із використання користувацької камери із кольоровим сенсором у даному дослідженні показав себе добре та дав збіжність із дублюючими механічними приладами.

6. За результатами досліджень сформовано рекомендації щодо проектування тонких багатошарових скляних балок. Експлуатацію тонких скляних балок, що працюють на чотириточковий згин необхідно виконувати в межах

розрахункового значення міцності на розтяг при згині. Для визначення розрахункового значення міцності при згині рекомендовано використовувати методику із використанням коефіцієнтів тривалості навантаження згідно із prEN 1661. Розрахунок несучої здатності тонких багатошарових скляних балок рекомендовано використовувати методику розрахунку міцності перерізу на згин із понижувальним коефіцієнтом втрати стійкості, який визначається за кривими втрати стійкості з використанням коефіцієнтів $\alpha_0 = 0.2$ та $\alpha_{LT} = 0.26$. Рекомендовано використовувати балки з двох та більше шарів скла для забезпечення додаткової стабільності балки та безпеки експлуатації конструкції. Для розрахунку конструкцій тонких багатошарових скляних балок методом скінчених елементів рекомендовано використовувати RF-Glass, у якому застосовуються лінійні залежності для характеристик матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Demchyna B. et al. Determination of physical and mechanical characteristics of glass for bending: comparison of strength values under different conditions of the orientation of a test sample // Building constructions. Theory and Practice. 2022. № 10. С. 11–23.
2. Surmai M. et al. The Experimental Research of Glass Multilayer Columns with a Central Compression. Lviv Polytechnic National University, 2018. С. 55–60.
3. Demchyna B. et al. 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. Вип. 4, № 12–106. С. 52–59.
4. Sobczak-Piąstka J. et al. Assessment of the effect of lateral loss of stability for flat glass beams // AIP Conf Proc. 2023. Вип. 2949, № 1. С. 020016.
5. KOZAK R., DEMCHYNA B. RESEARCH OF GLASS BEAMS FOR FOUR-POINT BENDING USING THE METHOD OF DIGITAL IMAGE CORRELATION // Building constructions. Theory and Practice. Kyiv National University of Construction and Architecture, 2022. № 12. С. 16–26.
6. Digs Reveal Stone-Age Weapons Industry With Staggering Output [Електроний ресурс]. URL: <https://www.nationalgeographic.com/history/article/150413-Paleolithic-obsidian-weapons-arteni-armenia-archaeology>.
7. Ward-Harvey K. Fundamental building materials. Universal-Publishers, 2009. 118 с.
8. Henderson J. Early Glass in the Middle East and Europe // Ancient Glass. Cambridge University Press, 2013. С. 127–157.
9. Moore N.H. Old Glass – European and American. New York: Tudor Publishing, 1935. 394 с.
10. Ersoy U. Seeing through glass: The fictive role of glass in shaping architecture from Joseph Paxton’s “Crystal Palace” to Bruno Taut’s “Glashaus.” 2008.

11. Auerbach J. Victorian Prism: Refractions of the Crystal Palace (review) // *Vic Stud.* 2008. Вып. 50. С. 508–510.
12. Clark K. *Heroic Materialism. Civilisation.* New York: Harper & Row, 1969. Вып. 13.
13. Leith Ian. *Delamotte's Crystal Palace : a Victorian pleasure dome revealed.* English Heritage, 2005. 122 с.
14. Polak A. *Glass : its tradition and its makers.* New York: Putnam, 1975. 224 с.
15. Fitzgerald F. *Bessemer: the technology and the times* // *Interdisciplinary Science Reviews.* Maney Publishing, 2012. Вып. 23, № 4. С. 362–371.
16. Loveridge D. *Through a glass darkly. The future and business* // *Futures.* 1988. Вып. 20, № 6. С. 679–691.
17. THE “BARLEY BENT” RANGE GLASS FOR HISTORIC SETTINGS. 2020.
18. OBITUARIES ; Sir Alastair Pilkington // *The Independent.* 2011.
19. Oxley B.W. *Lionel Alexander Bethune (Alastair) Pilkington. 7 January 1920—5 May 1995* // *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society.* The Royal Society, 2022. Вып. 74. С. 339–361.
20. Robson S. *English: The main library of Lancaster University, with the Sir Alastair Pilkington Reading Room in the background.* 2015.
21. Pilkington L.A.B. *Review Lecture. The Float Glass Process* // *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci.* The Royal Society, 1969. Вып. 314, № 1516. С. 1–25.
22. Bricknell D. *Innovation investment: Pilkington float glass as a case study* // *Glass Technology - European Journal of Glass Science and Technology Part A.* 2007. Вып. 48.
23. Pilkington A. *Floating windows* // *Manufacturing Engineer.* 1995. Вып. 74, № 2. С. 93–96.
24. Diogo C. David J. Bricknell. *Float: Pilkingtons' Glass Revolution.* Carnegie House, Lancaster, UK: Crucible Books, 2009. vii + 248 рс. ISBN 978-1-

- 905472-11-6, £20.00 (hardcover). // Enterp Soc. Cambridge University Press (CUP), 2012. Вип. 13, № 1. С. 193–194.
25. Feldmann M. et al. Guidance for European Structural Design of Glass Components.
 26. ГСТУ 21-004.1-2003 Скло натрій-кальцій силікатне будівельне, технічне і тарне. Методи визначення масової частки діоксиду кремнію.
 27. ДСТУ Б В.2.7-122:2009 Будівельні матеріали. Скло листове. Технічні умови (EN 572:2004, NEQ).
 28. Inoue M. et al. 2-Point Bending Strength of Glass Fibers // Zairyo/Journal of the Society of Materials Science, Japan. 2008. Вип. 57, № 6. С. 557–561.
 29. Nurhuda I. The Statistical Distribution of the Strength of Glass. 2009.
 30. Pepi J.W. Weibull Analysis // Strength Properties of Glass and Ceramics. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2014.
 31. EN 61649:2008 Weibull analysis.
 32. EN 12603:2002 Glass in building - Procedures for goodness of fit and confidence intervals for Weibull distributed glass strength data.
 33. Duffy S.F., Powers L.M., Starlinger A. Reliability analysis of structural ceramic components using a three-parameter Weibull distribution // J Eng Gas Turbine Power. 1993. Вип. 115, № 1. С. 109–116.
 34. 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. С. 40–58.
 35. Демчина Б. et al. Визначення фізико-механічних властивостей скла на згин за допо-могою двопараметричного розподілу Вейбулла // Будівельні конструкції. Теорія і практика. Київський національний університет будівництва і архітектури, 2020. № 6. С. 94–113.
 36. 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. Вип. 87, № 2. С. 49–61.
37. Janssen M., Veer F., Nägele T. The possibilities of glass bond adhesives. GPD, 2005. С. 436–439.
 38. Veer F., Zuidema J. The strenght of glass, effect of edge quality // Glass processing days. Glass processing days / tamglass ltd.Oy, 2003. С. 106–109.
 39. EN 1288-3 Glass in Building - Determination of the Bending Strength of Glass - Part 3: Test with Specimen Supported at Two Points (Four Point Bending).
 40. ASTM C158-02 Standard Test Methods for Strength of Glass by Flexure (Determination of Modulus of Rupture).
 41. Pepi J.W. Applied Stress Determination // Strength Properties of Glass and Ceramics. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2014.
 42. Pepi J.W. Inert Strength Determination // Strength Properties of Glass and Ceramics. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2014.
 43. DIN 18008-1:2010-12 Glass in Building - Design and construction rules - Part 1: Terms and general bases. 2010. 14 с.
 44. TRLV:2006-08 Technical Regulations for the Use of Glazing with Linear Supports. Berlin: Deutsches Institut fur Bautectnik, 2006.
 45. prEN 16612: Glass in building – Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing (NA 005-09-25 AA N 870, CEN/TC129/WG8 – N312).
 46. ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010 Єврокод 5. Проектування дерев`яних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1995-1-1:2004, IDT) [Електроний ресурс].
 47. Peters W.H., Ranson W.F. Digital Imaging Techniques In Experimental Stress Analysis // <https://doi.org/10.1117/12.7972925>. SPIE, 1982. Вип. 21, № 3. С. 427–431.
 48. Schreier H., Orteu J.J., Sutton M.A. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications // Image

- Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications. Springer US, 2009. 1–321 с.
49. Yang J., Bhattacharya K. Augmented Lagrangian Digital Image Correlation (AL-DIC) Code Manual. 2020.
 50. Schreier H., Orteu J.J., Sutton M.A. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications // Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications. Springer US, 2009. 1–321 с.
 51. Blikharsky Y. et al. Review of Development and Application of Digital Image Correlation Method for Study of Stress–Strain State of RC Structures // Applied Sciences (Switzerland). MDPI, 2022. Вып. 12, № 19.
 52. Mousa M.A. et al. A Digital Image Correlation Technique for Laboratory Structural Tests and Applications: A Systematic Literature Review // Sensors. 2023. Вып. 23, № 23. С. 9362.
 53. Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics // Experimental Mechanics 1985 25:3. Springer, 1985. Вып. 25, № 3. С. 232–244.
 54. Bruck H.A. et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction // Experimental Mechanics 1989 29:3. Springer, 1989. Вып. 29, № 3. С. 261–267.
 55. Keating T.J., Wolf C.R., Scarpace F.L. An Improved Method of Digital Image Correlation // Photogramm Eng Remote Sensing. 1975. Вып. 41, № 8. С. 993–1002.
 56. Papanikolaou A. et al. 3D digital image correlation system for monitoring of changes induced by RH fluctuations on parchment // Electronic Imaging. Society for Imaging Science & Technology, 2021. Вып. 2021, № 18. С. 65-1-65–67.
 57. Fouque R. et al. Stereo digital image correlation: Formulations and perspectives // Comptes Rendus - Mecanique. Academie des sciences, 2021. Вып. 349, № 3. С. 453–463.

58. Digital Image Correlation (DIC) [Электроний ресурс]. URL: <https://www.lavision.de/en/techniques/dic-dvc/>.
59. Chang L.-H., Chen M.-F., Chen N.-Y. Measuring Inter-Band Spatial Separation by Using Cross-Correlation Operation // Asian Conference on Remote Sensing. 2004.
60. DIC Sneakers Blog Post · iDICs [Электроний ресурс]. URL: https://idics.org/blog/post_4/.
61. KEMPNY M. DIGITAL IMAGE CORRELATION – METHOD DEVELOPMENT, SCOPE, PRINCIPLE OF FUNCTIONING, AND FUTURE GOALS // Journal of Metallic Materials. Siec Badawcza Lukasiewicz - Instytut Metalurgii Zelaza im. St. Staszica, 2022. № 3–4. С. 30–41.
62. Gdoutos E.E. Digital Image Correlation (DIC) // Solid Mechanics and its Applications. Springer Science and Business Media B.V., 2022. Вып. 269. С. 251–259.
63. Zhao H., Kong G., Sui W. 2D Transparent Soil Imaging and Digital Image Cross-Correlation // Springer Tracts in Civil Engineering. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2023. С. 141–162.
64. Chapelier M., Bouclier R., Passieux J.C. Free-Form Deformation Digital Image Correlation (FFD-DIC): A non-invasive spline regularization for arbitrary finite element measurements // Comput Methods Appl Mech Eng. Elsevier B.V., 2021. Вып. 384.
65. Passieux J.C., Bouclier R., Périé J.N. DD-DIC: A parallel finite element based digital image correlation solver // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer New York LLC, 2017. Вып. 3. С. 55–59.
66. Biscaia H.C. et al. Using digital image correlation to evaluate the bond between carbon fibre-reinforced polymers and timber // Struct Health Monit. SAGE Publications Ltd, 2022. Вып. 21, № 2. С. 534–557.

67. Chai H. et al. Digital image correlation method for detecting strain in wood drying process // *Bioresources*. 2023. Вып. 18, № 2. С. 4143–4152.
68. Rescalvo F.J. et al. Multi-side Digital Image Correlation (DIC) evaluation of CFRP bonded to poplar timber // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. Taylor and Francis Ltd., 2023.
69. Gao Z. et al. Evaluation of concrete fracture behavior based on digital image correlation // *Materialprüfung/Materials Testing*. Walter de Gruyter GmbH, 2022. Вып. 64, № 6. С. 859–873.
70. Woods J.E. et al. Towards the Use of Digital Image Correlation to Measure FRP-Concrete Debonding in Reinforced Concrete Structures // *Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2023. Вып. 278. С. 261–268.
71. Sousa J.B., Garcia S.L.G., Pierott R.M.R. Shear Behavior of Recycled Coarse Aggregates Concrete Dry Joints Keys Using Digital Image Correlation Technique // *Infrastructures (Basel)*. MDPI, 2023. Вып. 8, № 3.
72. Pour A.F. et al. Analysis of transition from diffuse to localized failure in sandstone and concrete using Digital Image correlation // *Eng Fract Mech*. Elsevier Ltd, 2022. Вып. 267.
73. Christensen C.O. et al. Digital image correlation for evaluation of cracks in reinforced concrete bridge slabs // *Infrastructures (Basel)*. MDPI AG, 2021. Вып. 6, № 7.
74. Yin W. et al. Quantitative investigation of strain partitioning and failure mechanism in ultrafine grained medium Mn steel through high resolution digital image correlation // *Scr Mater. Acta Materialia Inc*, 2023. Вып. 229.
75. Wani Z.R., Tantray M., Noroozinejad Farsangi E. In-Plane measurements using a novel streamed digital image correlation for shake table test of steel structures controlled with MR dampers // *Eng Struct*. Elsevier Ltd, 2022. Вып. 256.
76. Kim K. II et al. Strain Analysis of Multi-Phase Steel Using In-Situ EBSD Tensile Testing and Digital Image Correlation // *Metals and Materials*

- International. Korean Institute of Metals and Materials, 2022. Вып. 28, № 5. С. 1094–1104.
77. Hebert J., Khonsari M. The application of digital image correlation (DIC) in fatigue experimentation: A review // *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. John Wiley and Sons Inc, 2022.
 78. Ono Y., Yokoyama T. Determination of local constitutive behavior of AA6061–T6 friction stir welds using digital image correlation // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. SAGE Publications Ltd, 2022. Вып. 236, № 8. С. 1574–1589.
 79. Dellenbaugh L. et al. Development of a Distortion-Induced Fatigue Crack Characterization Methodology Using Digital Image Correlation // *Journal of Bridge Engineering*. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2020. Вып. 25, № 9.
 80. Shi D. et al. Axial load–deformation behavior and fracture characteristics of bolted steel to laminated timber and glulam connections // *Compos Struct*. Elsevier Ltd, 2023. Вып. 305.
 81. A Good Practices Guide for Digital Image Correlation Standardization, Good Practices, and Uncertainty Quantification Committee / ed. Jones E.M.C., Iadicola M. 2018. 101 с.
 82. LaVision Cameras for DIC [Электронный ресурс]. URL: <https://www.digitalimagecorrelation.com/en/products/cameras/cameras-for-dic/index.php> (accessed: 22.05.2023).
 83. Specifications Model Version MP Imaging Sensor. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.flir.com/products/grasshopper3-usb3/?model=GS3-U3-123S6M-vertical=machine+vision&segment=iis>
 84. Baldi A. Digital Image Correlation and Color Cameras // *Exp Mech*. Springer New York LLC, 2018. Вып. 58, № 2. С. 315–333.

85. Torres B. et al. Study on retrofitted masonry elements under shear using digital image correlation // *Sensors (Switzerland)*. MDPI AG, 2020. Вип. 20, № 7.
86. Bado M.F., Kaklauskas G., Casas J.R. Performance of Distributed Optical Fiber Sensors (DOFS) and Digital Image Correlation (DIC) in the monitoring of RC structures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing Ltd, 2019. Вип. 615, № 1.
87. Aryanto A. et al. APPLICATION OF DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD IN RC AND FRC BEAMS UNDER BENDING TEST // *International Journal of GEOMATE*. GEOMATE International Society, 2023. Вип. 24, № 101. С. 118–125.
88. Murali Krishna B. et al. QR code as speckle pattern for reinforced concrete beams using digital image correlation // *Structural Monitoring and Maintenance*. Techno Press, 2019. Вип. 6, № 1. С. 67–84.
89. Hoult N.A. et al. Measuring crack movement in reinforced concrete using digital image correlation: Overview and application to shear slip measurements // *Proceedings of the IEEE*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. Вип. 104, № 8. С. 1561–1574.
90. Lim C. et al. Strain Measuring of Composite Grid Using Digital Image Correlation // *Advances in Materials Science and Engineering*. Hindawi Limited, 2022. Вип. 2022.
91. Kumar S.L., Aravind H.B., Hossiney N. Digital image correlation (DIC) for measuring strain in brick masonry specimen using Ncorr open source 2D MATLAB program // *Results in Engineering*. Elsevier B.V., 2019. Вип. 4.
92. Бліхарський Я. Дисертація на здобуття ступеня доктора технічних наук. Залишковий ресурс залізобетонних конструкцій з пошкодженнями термічно-зміцненої арматури. 2021. 351 с.
93. Осадчук Т. Дисертація на здобуття ступеня кандидата технічних наук. Міцність та деформативність скляних багат шарових плит. Львів: Національний університет “Львівська політехніка,” 2020. 203 с.

94. Ткач Р. Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії. Несуча здатність та деформативність скляних багатошарових колон. Львів: Національний університет “Львівська політехніка,” 2021. 212 с.
95. Demchyна В., Surmai М., Tkach R. The experimental study of glass multilayer columns using digital image correlation // Archives of Materials Science and Engineering. International OCSCO World Press, 2019. Вип. 96, № 1. С. 32–41.
96. Demchyна В., Surmai М., Tkach R. Експериментальне дослідження скляних багатошарових колон на центральний стиск // Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва. 2018. № 888. С. 52–58.
97. Осадчук Т.Ю., Демчина Б.Г. Дослідження деформацій багатошарових 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. С. 153–163.
98. Демчина Б.Г., Осадчук Т.Ю., Демчина Х.Б. Міцність та деформативність багатошарових скляних плит з різних типів скла, які працюють на згин // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2017. № 69. С. 30–37.
99. Гула В. Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії. Несуча здатність, деформативність та довговічність скляних плит які працюють на згин. Львів: Національний університет “Львівська політехніка,” 2023. 174 с.
100. Tuna Kayılı M., Veer F., Çelebi G. Assessment of the energy savings and CO₂ emissions reduction of glass structures through alternative demolition scenarios // Glass Structures and Engineering. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2016. Вип. 1, № 2. С. 435–449.

101. O’Callaghan J., Coult G. An all glass cube in New York city // Proceedings of the 2008 Structures Congress - Structures Congress 2008: Crossing the Borders. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2008. Вип. 314.
102. Ishida A. Impermanent Monument for Intimate Machines // Blurred Transparencies in Contemporary Glass Architecture. Routledge, 2020. С. 124–149.
103. Apple Jungfernstieg – Eckersley O’Callaghan [Електроний ресурс]. URL: <https://www.eocengineers.com/projects/apple-jungfernstieg-108/> (accessed: 23.05.2023).
104. BMW Museum by Atelier Brückner [Електроний ресурс]. URL: <https://www.dezeen.com/2008/07/28/bmw-museum-munich-by-atelier-bruckner/> (accessed: 23.05.2023).
105. Bollinger K. et al. Tragkonstruktionen der BMW-Welt in München // Stahlbau. 2005. Вип. 74, № 7. С. 483–491.
106. Coult G. The skypool: bringing architectural imagination to life // Glass Structures and Engineering. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. Вип. 6, № 3. С. 353–373.
107. BMW Museum Munich by ATELIER BRÜCKNER | Museums [Електроний ресурс]. URL: <https://www.architonic.com/en/project/atelier-bruckner-bmw-museum-munich/5100476> (accessed: 23.05.2023).
108. 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. 113–116 с.
109. Демчина Б., Черевко М., Прокоп’юк В. Дослідження міцності та деформативності скляних балкових конструкцій // Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. 2014. № 15. С. 51–56.
110. Foster James S.A. Stability and design of steel beams in the strain-hardening range. Imperial College of Science, Technology and Medicine, 2014. 243 с.

111. Bedon C., Amadio C. Buckling analysis of simply supported flat glass panels subjected to combined in-plane uniaxial compressive and edgewise shear loads // *Eng Struct.* 2014. Вып. 59. С. 127–140.
112. Bedon C. Lateral-torsional buckling (LTB) method for the design of glass fins with continuous lateral restraints at the tensioned edge // *Compos Struct.* Elsevier Ltd, 2021. Вып. 266.
113. Pešek O., Melcher J.J. Lateral-Torsional Buckling of Structural Glass Beams. Experimental, Theoretical and Numerical Analysis // *International Journal of Structural and Civil Engineering Research.* EJournal Publishing, 2018. С. 323–330.
114. Gwóźdź M. Formulae for buckling load bearing capacity of glass structure elements // *Archives of Civil Engineering.* Polish Academy of Science, 2020. Вып. 66, № 2. С. 353–368.
115. Belis J. et al. Experimental and analytical assessment of lateral torsional buckling of laminated glass beams // *Eng Struct.* Elsevier Ltd, 2013. Вып. 51. С. 295–305.
116. Amadio C., Bedon C. Buckling of laminated glass elements in out-of-plane bending // *Eng Struct.* Elsevier Ltd, 2010. Вып. 32, № 11. С. 3780–3788.
117. Sonck D., Belis J. Elastic lateral-torsional buckling of glass beams with continuous lateral restraints // *Glass Structures and Engineering.* Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2016. Вып. 1, № 1. С. 173–194.
118. Pešek O., Melcher J. Lateral-Torsional Buckling of Laminated Structural Glass Beams. Experimental Study // *Procedia Eng.* Elsevier Ltd, 2017. Вып. 190. С. 70–77.
119. Luible A., Schärer D. Lateral torsional buckling of glass beams with continuous lateral support // *Glass Structures & Engineering* 2016 1:1. Springer, 2016. Вып. 1, № 1. С. 153–171.

120. Huang X. et al. The lateral torsional buckling behavior of laminated glass beams // International Journal of Structural Stability and Dynamics. World Scientific Publishing Co. Pte Ltd, 2020. Вып. 20, № 7.
121. Bedon C., Louter C. Finite-element numerical simulation of the bending performance of post-tensioned structural glass beams with adhesively bonded CFRP tendons // American Journal of Engineering and Applied Sciences. Science Publications, 2016. Вып. 9, № 3. С. 680–691.
122. Nour O., Salem O., Mostafa A. Experimental fire testing of large-scale glass fibre-reinforced polymer-reinforced concrete beams with mid-span straight-end bar lap splices // Fire Mater. John Wiley and Sons Ltd, 2022. Вып. 46, № 2. С. 360–375.
123. Gurung S., Salem O. Load ratio effects on the structural fire behaviour of glass fibre-reinforced polymer-reinforced concrete beams with mid-span bar lap splices – Experimental study // Fire Mater. John Wiley and Sons Ltd, 2023. Вып. 47, № 1. С. 75–85.
124. Möckel M., Juraschitz T., Louter C. Numerical simulation of the heat flow through laminated glass beams exposed to fire: A parametric study // Current Perspectives and New Directions in Mechanics, Modelling and Design of Structural Systems - Proceedings of the 8th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, 2022. CRC Press/Balkema, 2023. С. 872–878.
125. Möckel M., Lohr K., Louter C. Exploratory Study on the Load-Bearing Behaviour of Laminated Glass Beams Exposed to Fire // Challenging Glass 8: Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, CGC 2022. Challenging Glass Conference (CGC), 2022.
126. Feldmann M., Di Biase C. The CEN-TS “Structural Glass - Design and Construction Rules” as pre-standard for the Eurocode // ce/papers. Wiley, 2018. Вып. 2, № 5–6. С. 71–80.
127. Feldmann M., Di Biase C. Die CEN-TS “Design of Glass Structures” als Vornorm für den Eurocode // ce/papers. Wiley, 2019. Вып. 3, № 1. С. 73–82.

128. Feldmann M. et al. Development of bonded hybrid steel-glass beams. 2010.
129. Feldmann M., Abeln B., Preckwinkel E. Characterization of adhesive joints for hybrid steel-glass beams by means of simplified small scale tests // J ASTM Int. 2012. Вып. 9, № 1.
130. Kasper R., Sedlacek G., Feldmann M. Das Biegedrillknickverhalten von Glasträgern aus Verbundglas // Stahlbau. John Wiley & Sons, Ltd, 2007. Вып. 76, № 3. С. 167–176.
131. ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010 Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1995-1-1:2004, IDT) [Електронний ресурс].
132. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1993-1-1:2005, IDT) .
133. Belis J. Kipsterkte van monolithische en gelamineerde glazen liggers. 2005.
134. Timoshenko S.C., Gere J.M. Theory of Elastic Stability. Second Edition. McGraw-Hill International Book Company, 2012. 541 с.
135. Nazionale C., Ricerche D. CNR-DT-210: Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro.
136. Kasper A. Spontaneous cracking of thermally toughened safety glass. Part one: Properties of nickel sulphide inclusions // Glass Structures and Engineering. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2019. Вып. 4, № 3. С. 279–313.
137. Kasper A. Spontaneous cracking of thermally toughened safety glass part three: statistic evaluation of field breakage records and consequences for residual breakage probability // Glass Structures and Engineering. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2019. Вып. 4, № 3. С. 345–376.
138. Kasper A., Rubbert F. Spontaneous cracking of thermally toughened safety glass. Part four: a case study of isothermal breakages in a building, and conclusions thereof for the heat soak test // Glass Structures and Engineering.

Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2020. Вип. 5, № 2. С. 211–229.

139. EN 572-2:2012 Glass in building - Basic soda lime silicate glass products - Part 2: Float glass.
140. Bridgestone High Performance Interlayer Film EVASAFETM | glassonweb.com [Електроний ресурс]. URL: <https://www.glassonweb.com/news/bridgestone-high-performance-interlayer-film-evasafetm>.
141. ASTM C1161 Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature.
142. ДСТУ Б В.1.2-3:2006 Прогини і переміщення. Вимоги проектування.
143. Dlubal Manual. RFEM 5 Spatial Models Calculated According to Finite Element Method User Manual. 2020. 651 с.

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»
ЄДРПОУ: 43273856
Україна, 79034
м. Львів, вул. Буйка 2
Email: inbox@pelex.com.ua

№ 19/09/2023
від 19 вересня 2023

ДОВІДКА

Про впровадження результатів

При розробці проектної документації житлового комплексу готельного типу в ур. Вишні, с. Полянця Яремчанського району, Івано-Франківської області, в проекті 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 Козака Романа Петровича на тему «Несуча здатність тонких багатошарових скляних балок». Було використано рекомендації з забезпечення міцності скляних елементів.

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»



Ігор МУДРИЙ

ФІЗИЧНА ОСОБА ПІДПРИЄМЕЦЬ
СЕМЧЕНКО НАТАЛІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА

Україна, 79052, м. Львів, вул. Широка 29/7, ід. код 2694009448
тел. +38(068)82-372-26, E-mail: nsemchenkoarch@gmail.com

№ 16/1 від « 15 » серпня 2023р.
м. Львів

Щодо
впровадження результатів

ДОВІДКА
Про впровадження результатів

Видана Козаку Роману Петровичу про те, що він приймав участь у розробці проектної документації **«Створення сучасного мультифункціонального мистецького простору шляхом нового будівництва на вул. Стефаника, 3, у м. Львові»** в складі авторського колективу, як розробник конструктивної частини.

Проектом враховано впровадження інноваційних технологій щодо використання скляного покриття, а саме влаштування легких світлопрозорих просторових конструкцій накриття внутрішнього подвір'я.

Запропоноване рішення про застосування скляних елементів в робочому проекті, було прийнято у відповідності з результатами дисертаційного наукового дослідження Козака Романа Петровича на тему «Несуча здатність скляних балок які працюють на чотирьох точковий згин». Також було використано рекомендації щодо закріплення опор при дії вітрового навантаження.

З метою здійснення інноваційної діяльності в області мистецтва, використання скляних світлопрозорих конструкцій та інших конструктивних елементів для сучасного мистецького простору – це скляне покриття на дерев'яних фігурних балках, які в свою чергу опираються на хрестові залізобетонні колони, дало можливість поєднати в одному проекті історичну Львівську архітектуру палацу та сучасну конструкцію накриття внутрішнього подвір'я.

*Довідка видана за місцем вимоги.

ФОП
СЕМЧЕНКО НАТАЛІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА


Н. Семченко

ДОДАТОК Б. Протоколи дослідження скляних плоских балок з використанням методу кореляції цифрових зображень

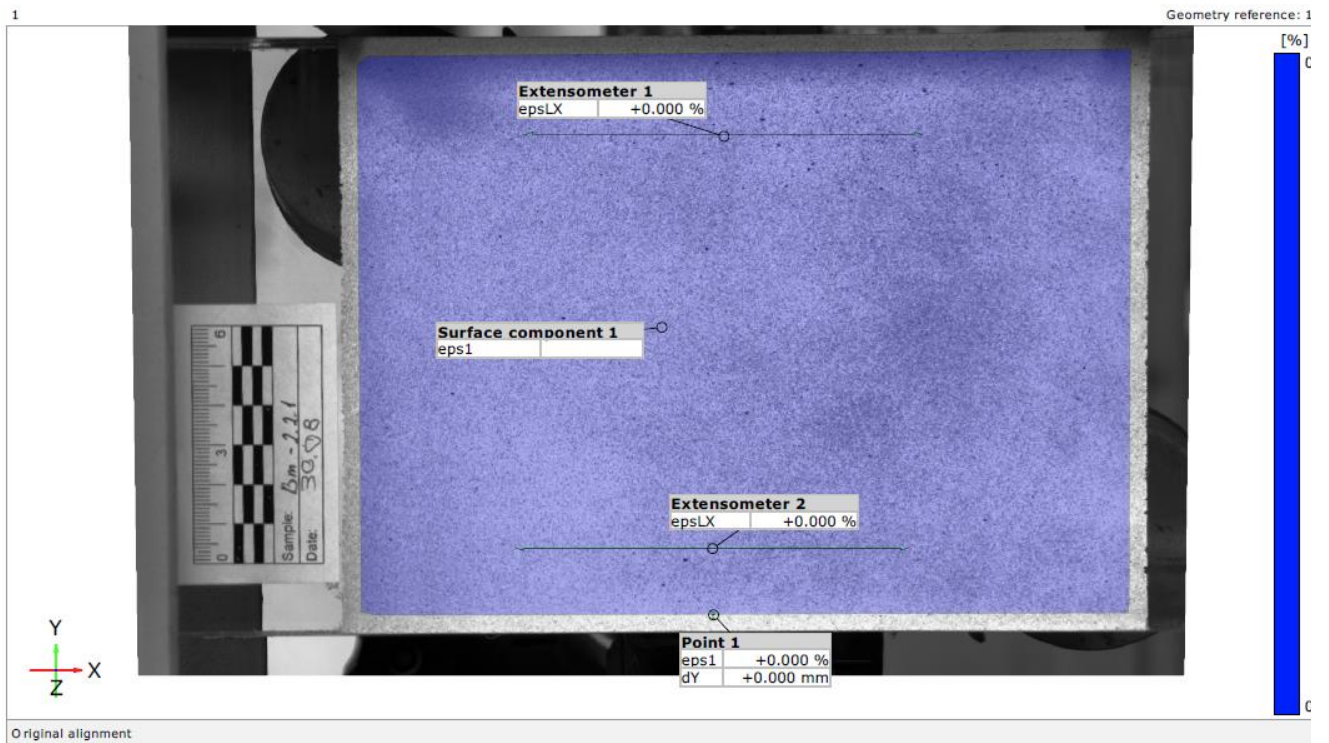


Рис.В.1. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 1

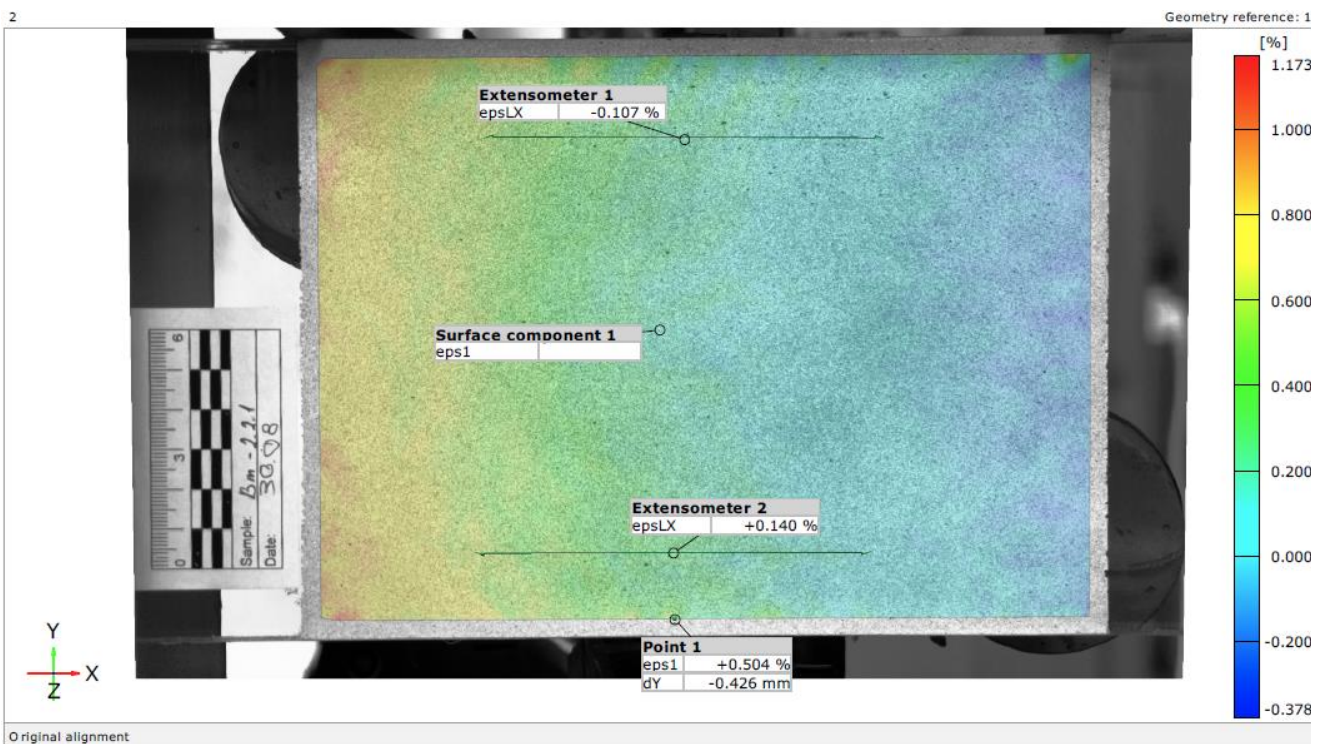


Рис.В.2. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 2

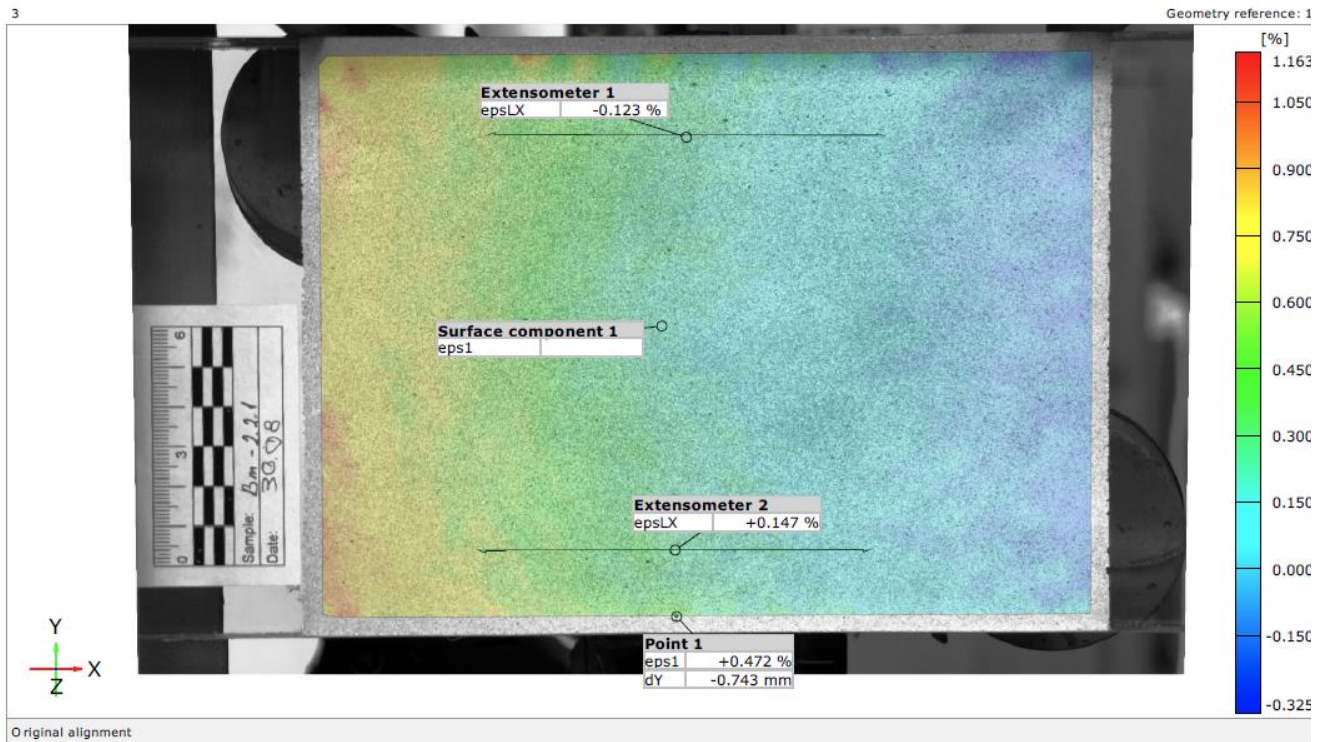


Рис.В.3. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 3

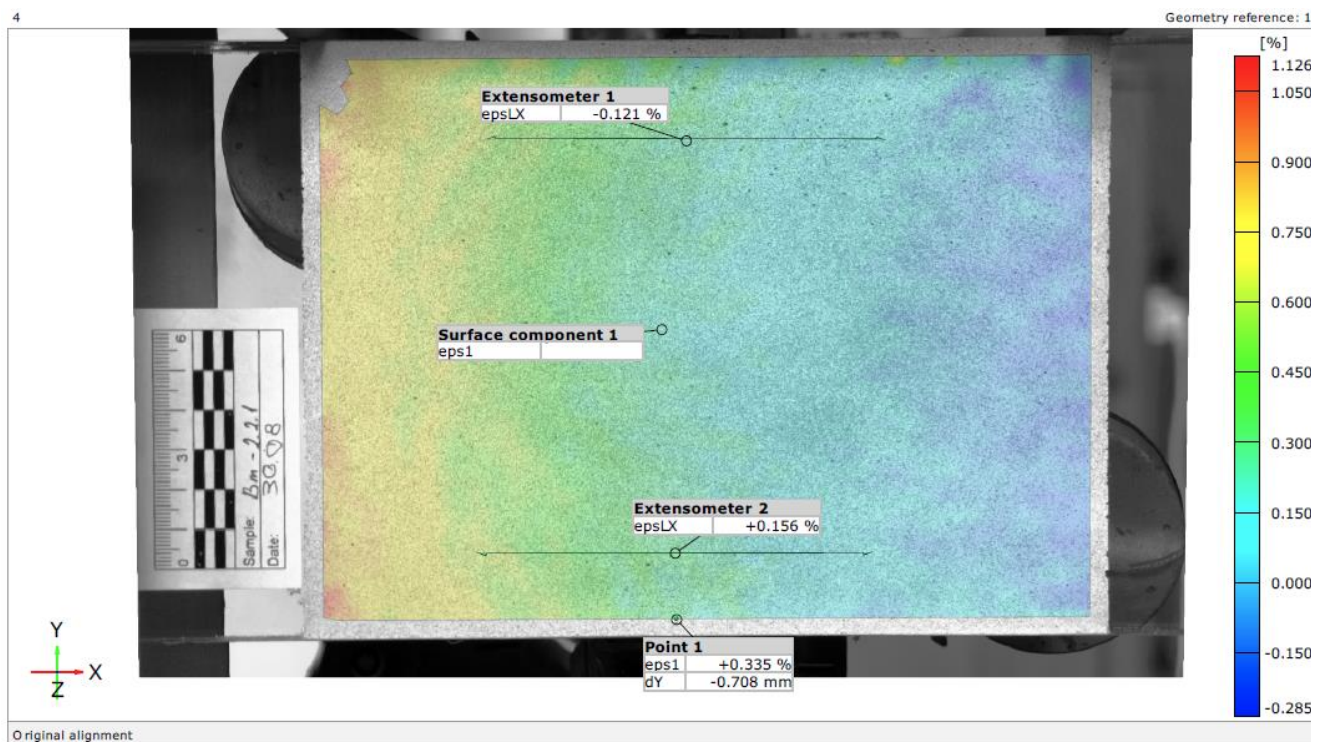


Рис.В.4. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 4

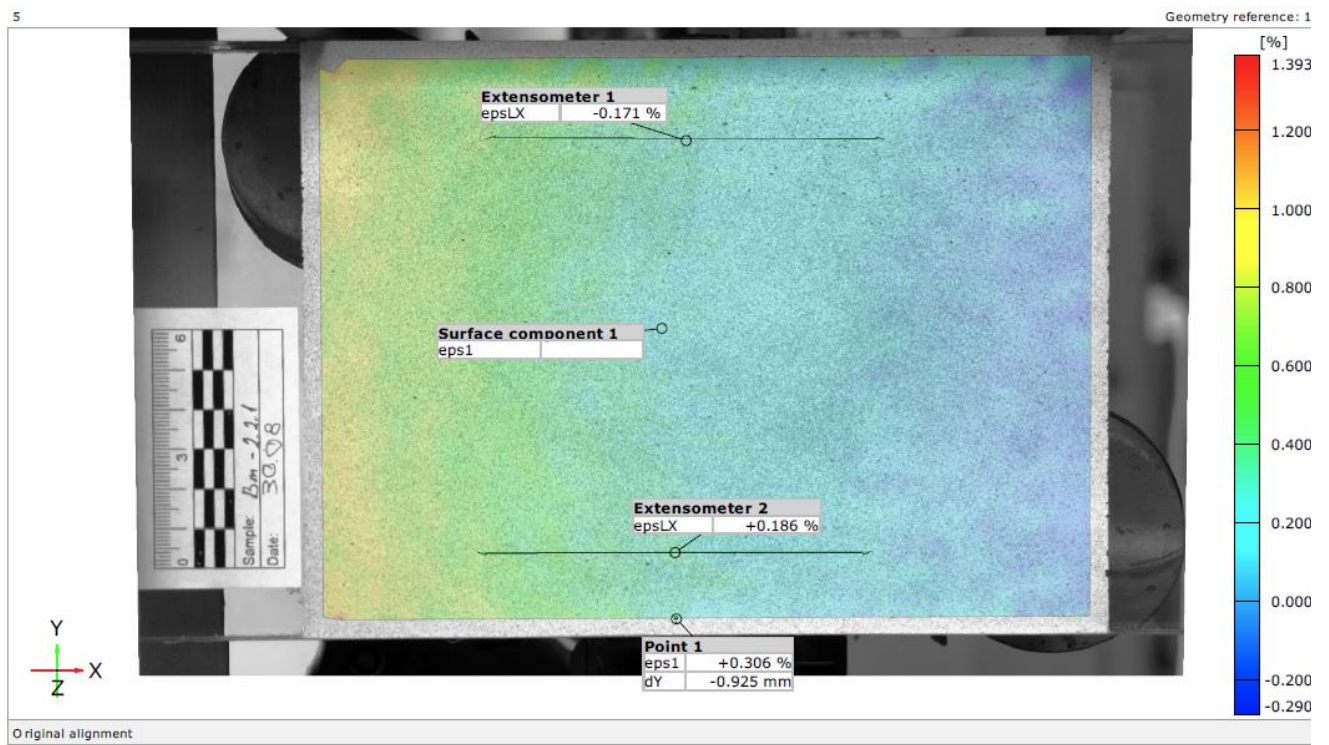


Рис.В.5. Протоколи випробувань скляної балки марки Вm-2.2.1. Етап 5

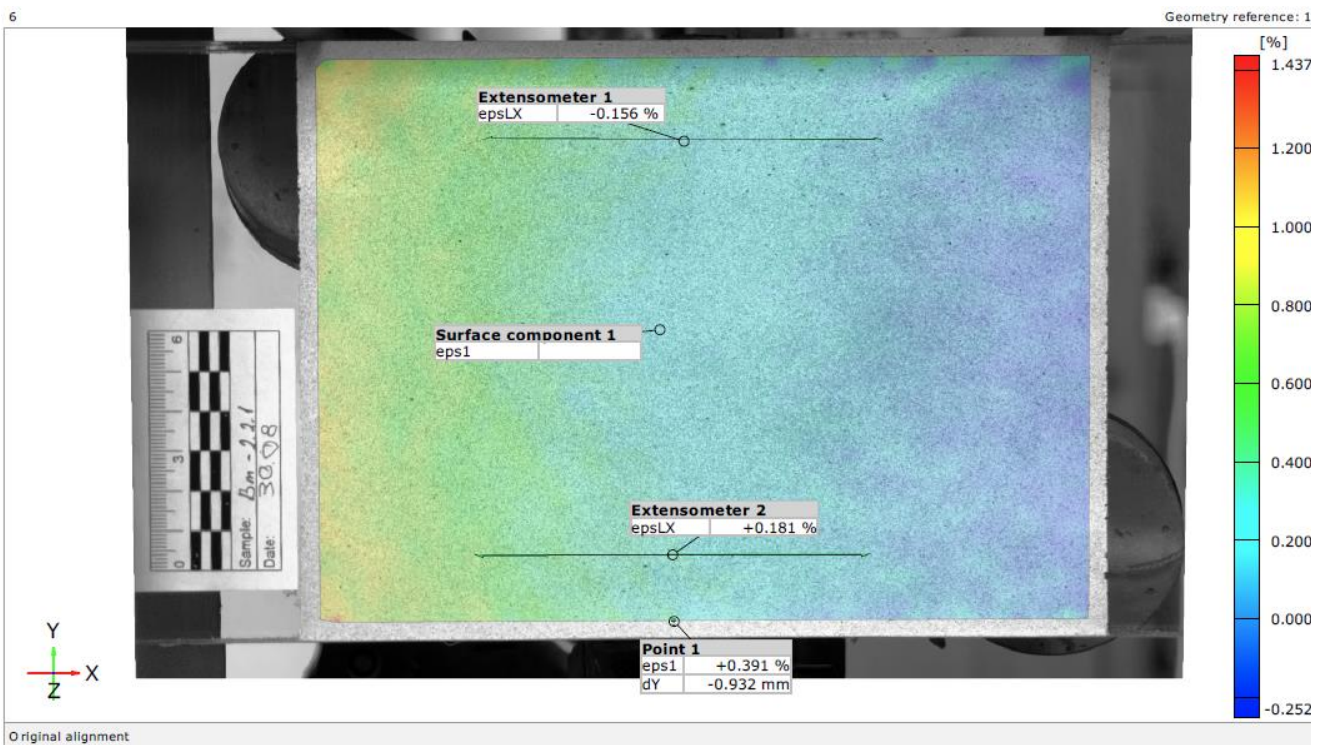


Рис.В.6. Протоколи випробувань скляної балки марки Вm-2.2.1. Етап 6

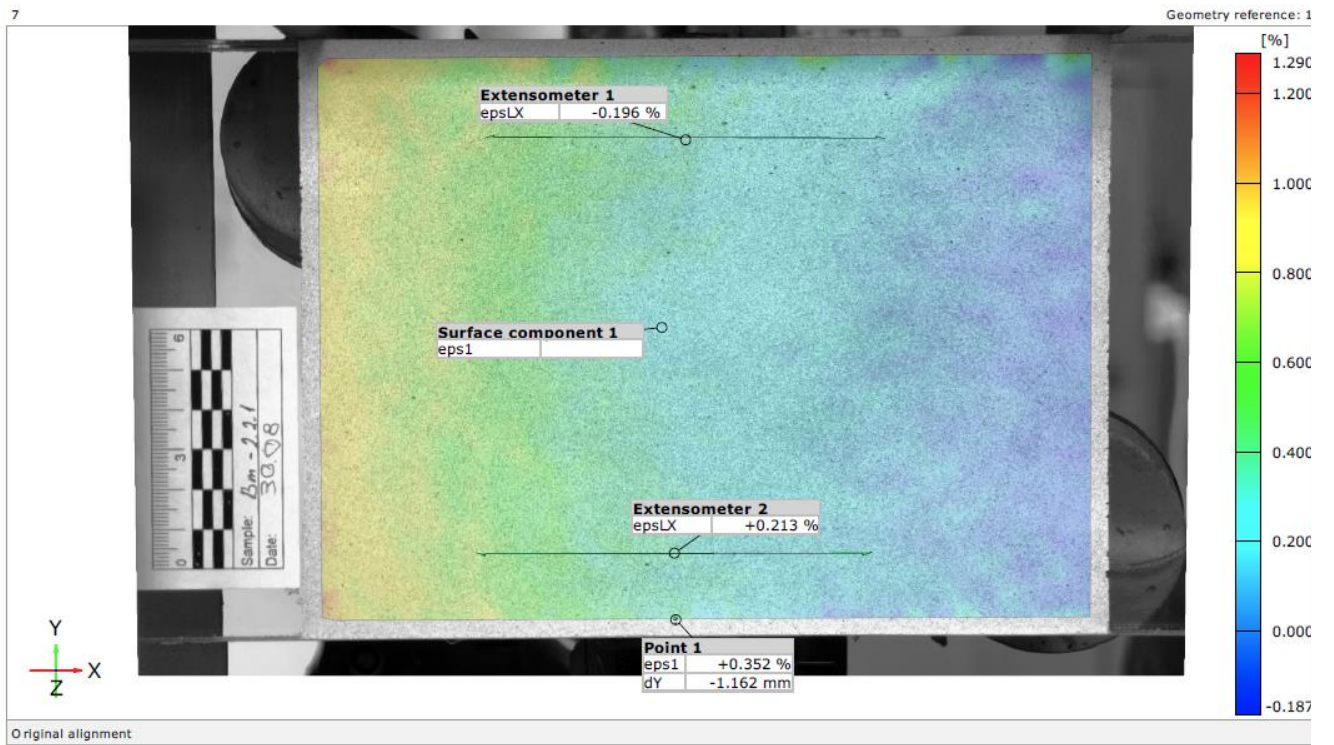


Рис.В.7. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 7

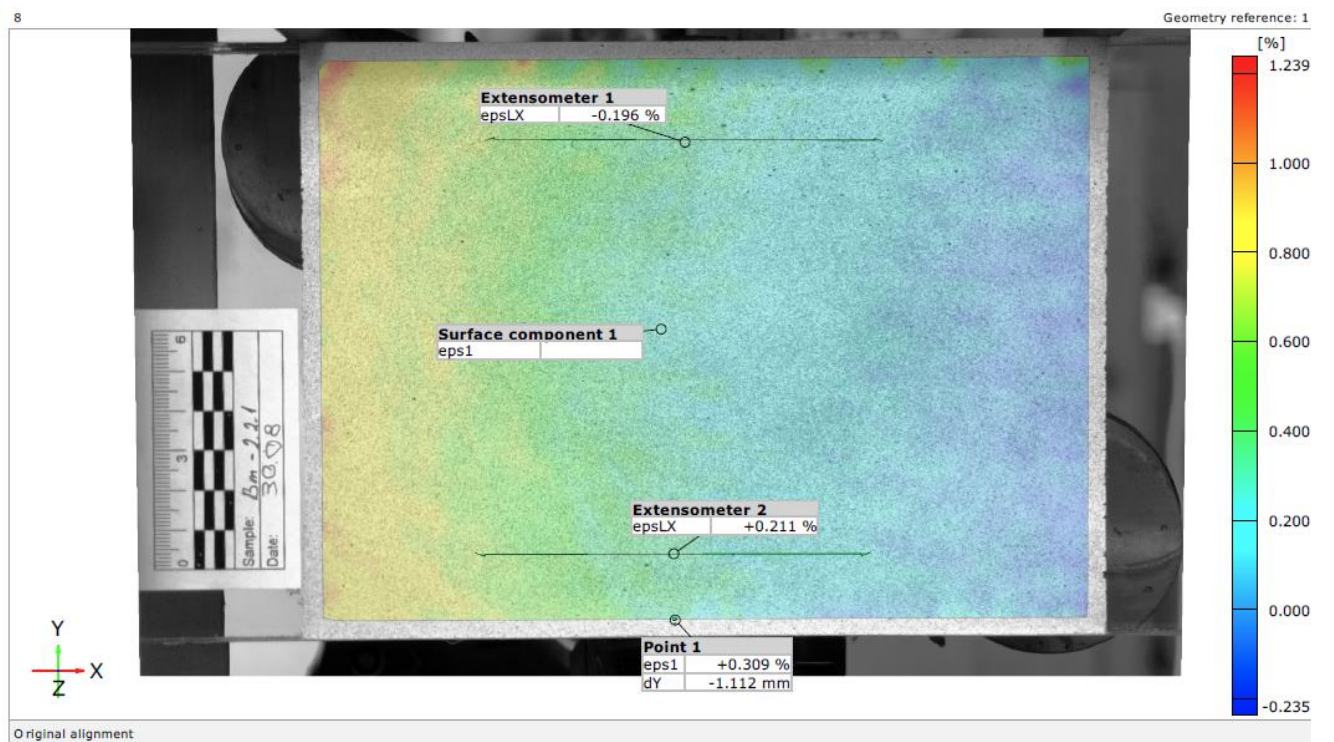


Рис.В.8. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 8

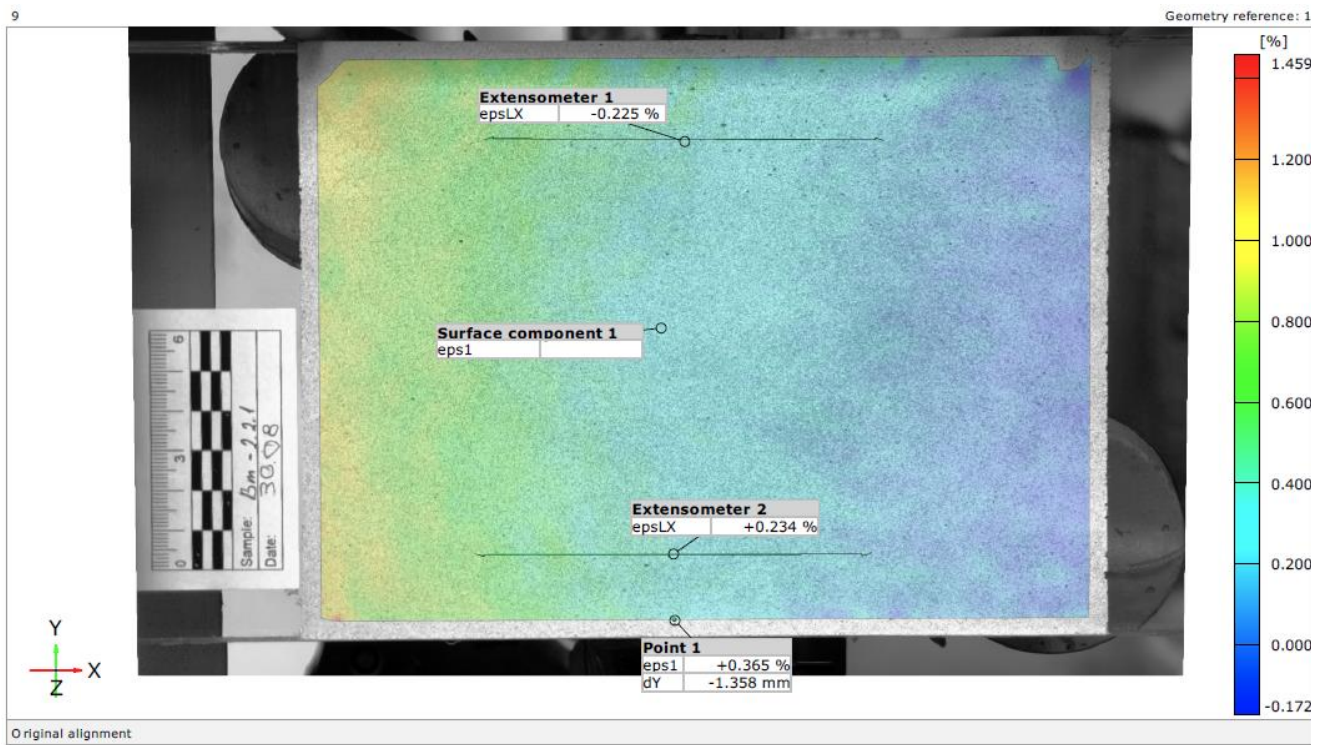


Рис.В.9. Протоколи випробувань скляної балки марки Вm-2.2.1. Етап 9

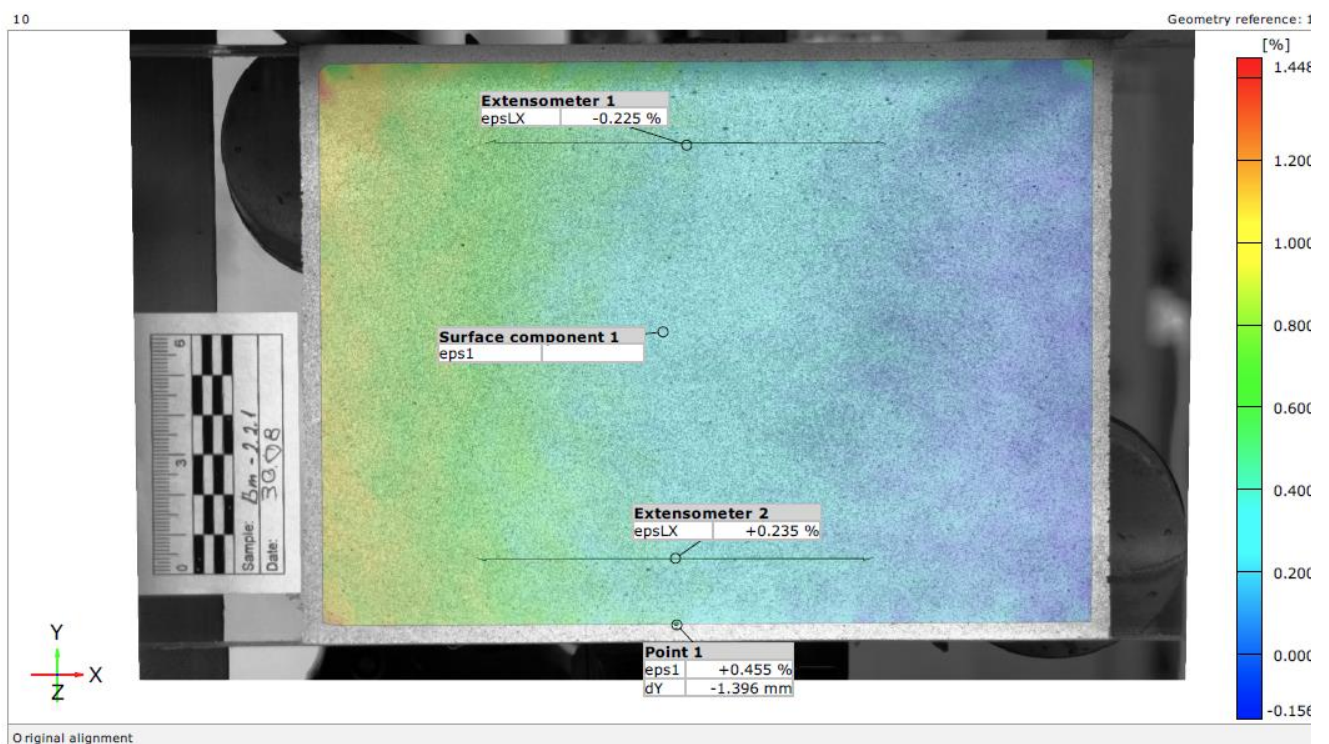


Рис.В.10. Протоколи випробувань скляної балки марки Вm-2.2.1. Етап 10

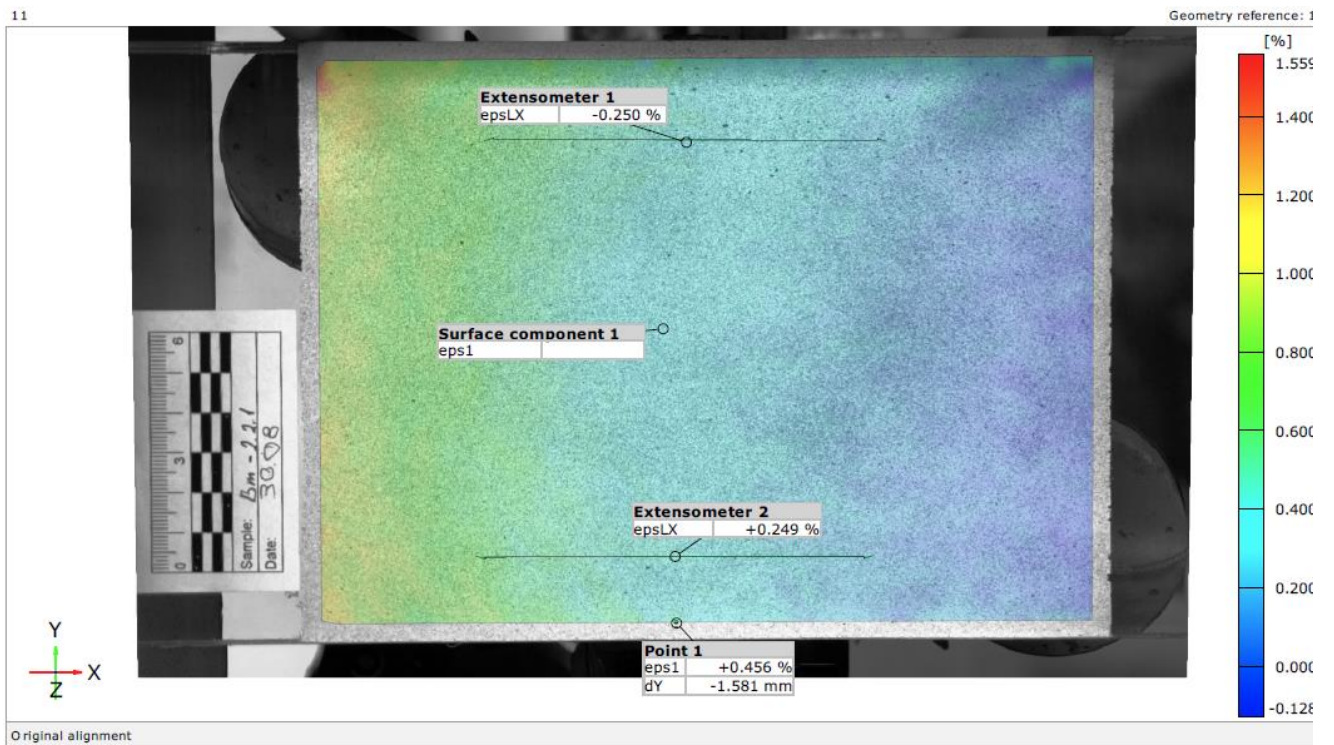


Рис.В.11. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 11

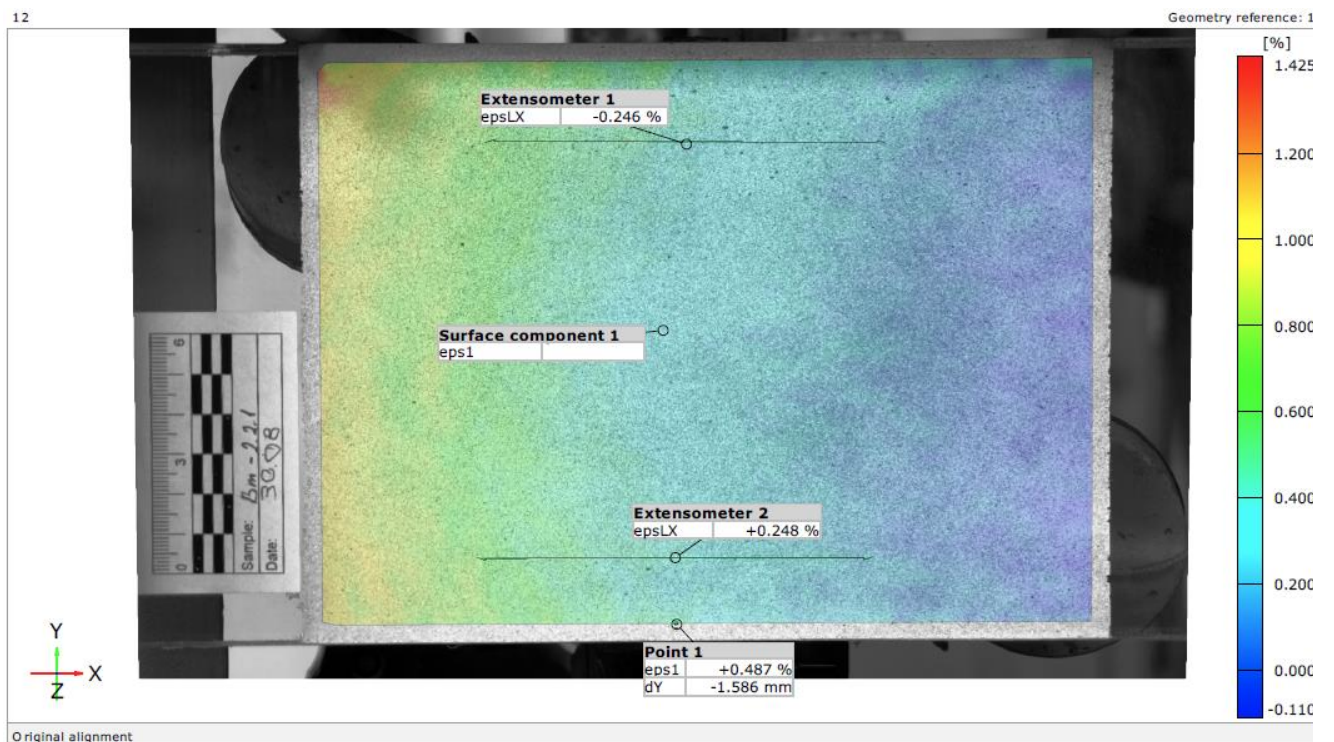


Рис.В.12. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 12

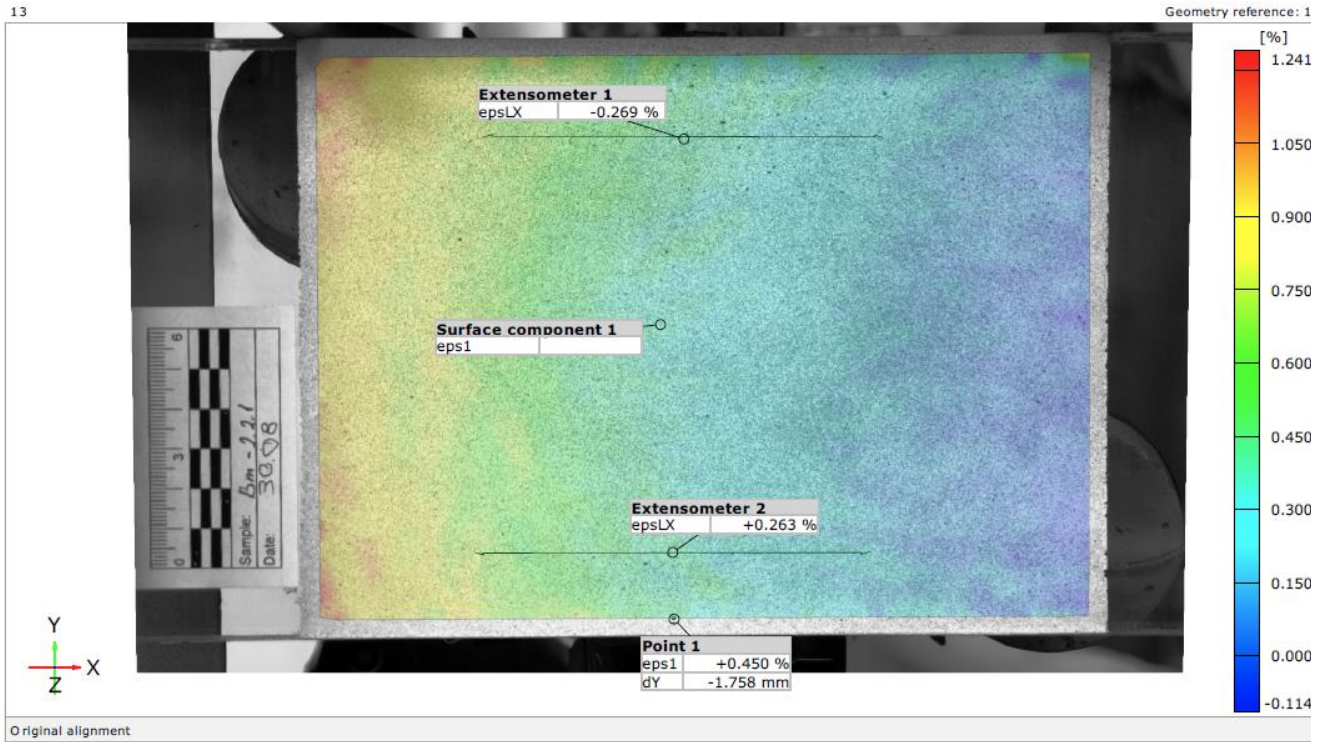


Рис.В.13. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 13

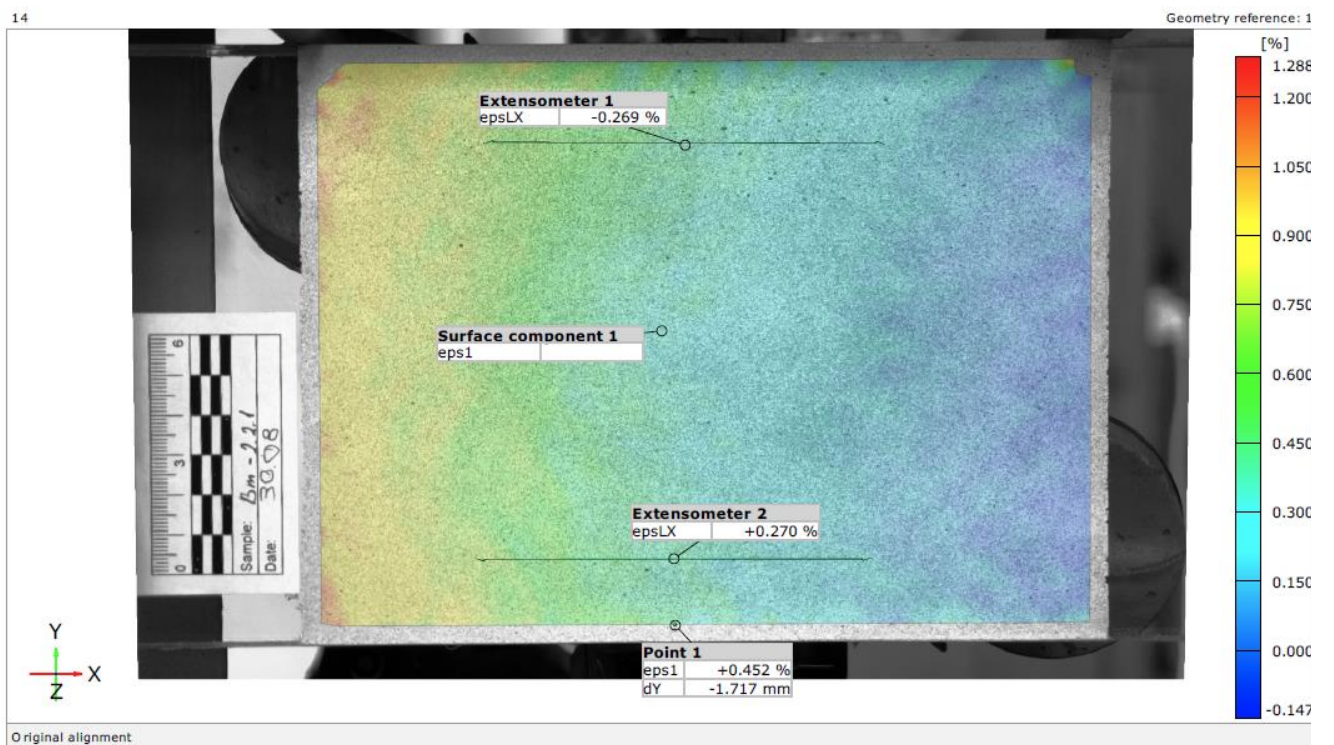


Рис.В.14. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 14

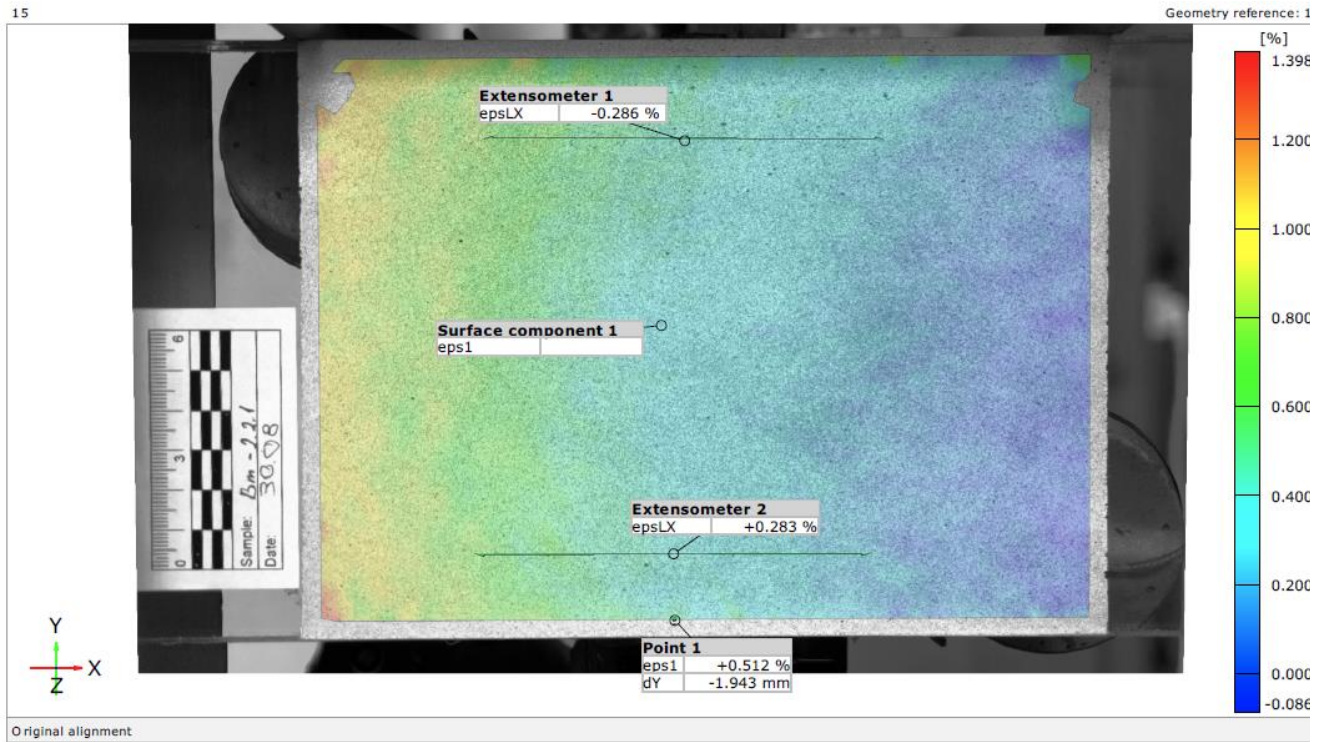


Рис.В.15. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 15

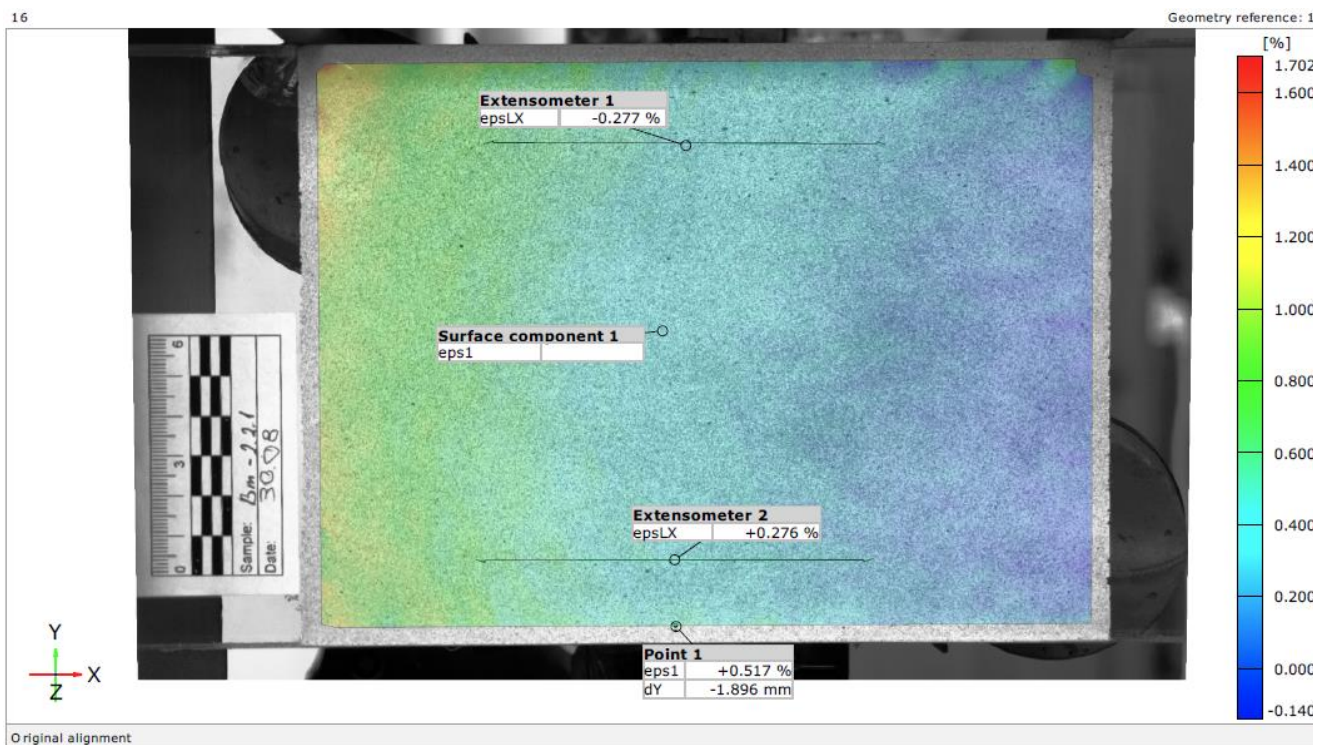


Рис.В.16. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 16

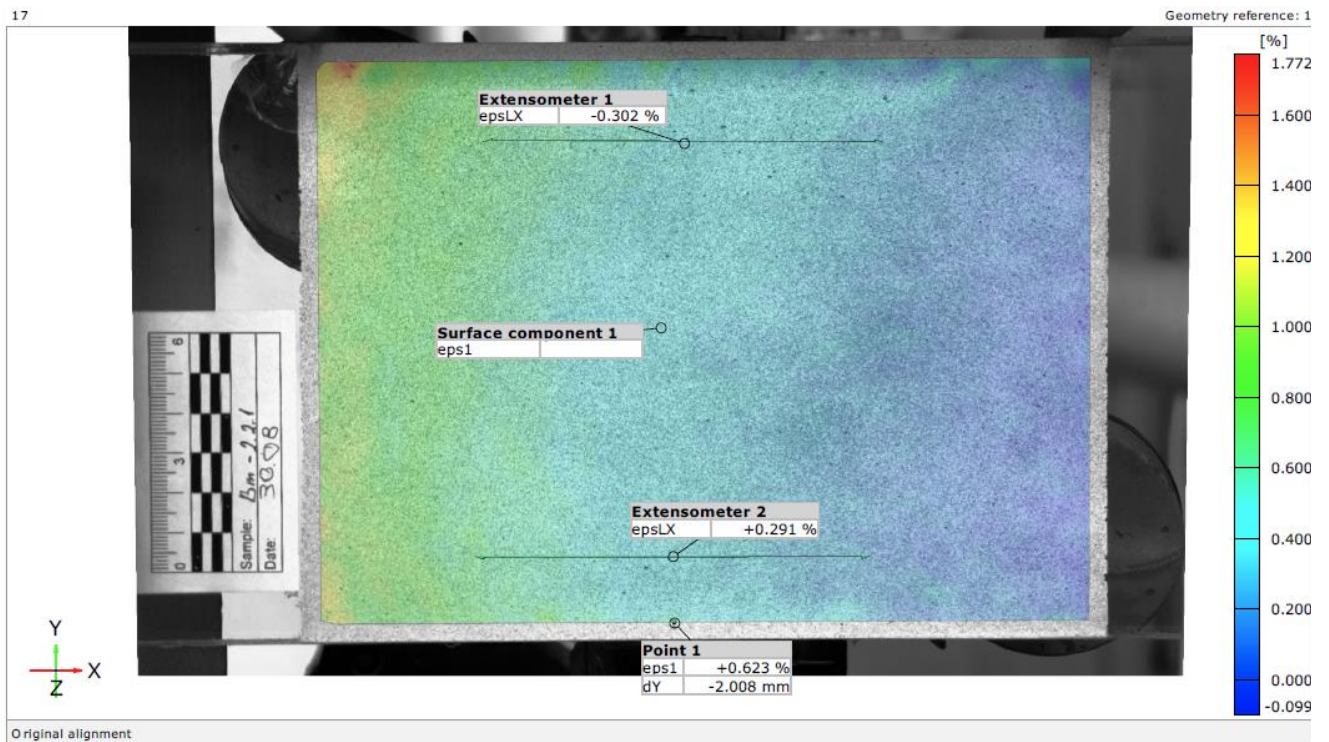


Рис.В.17. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 17

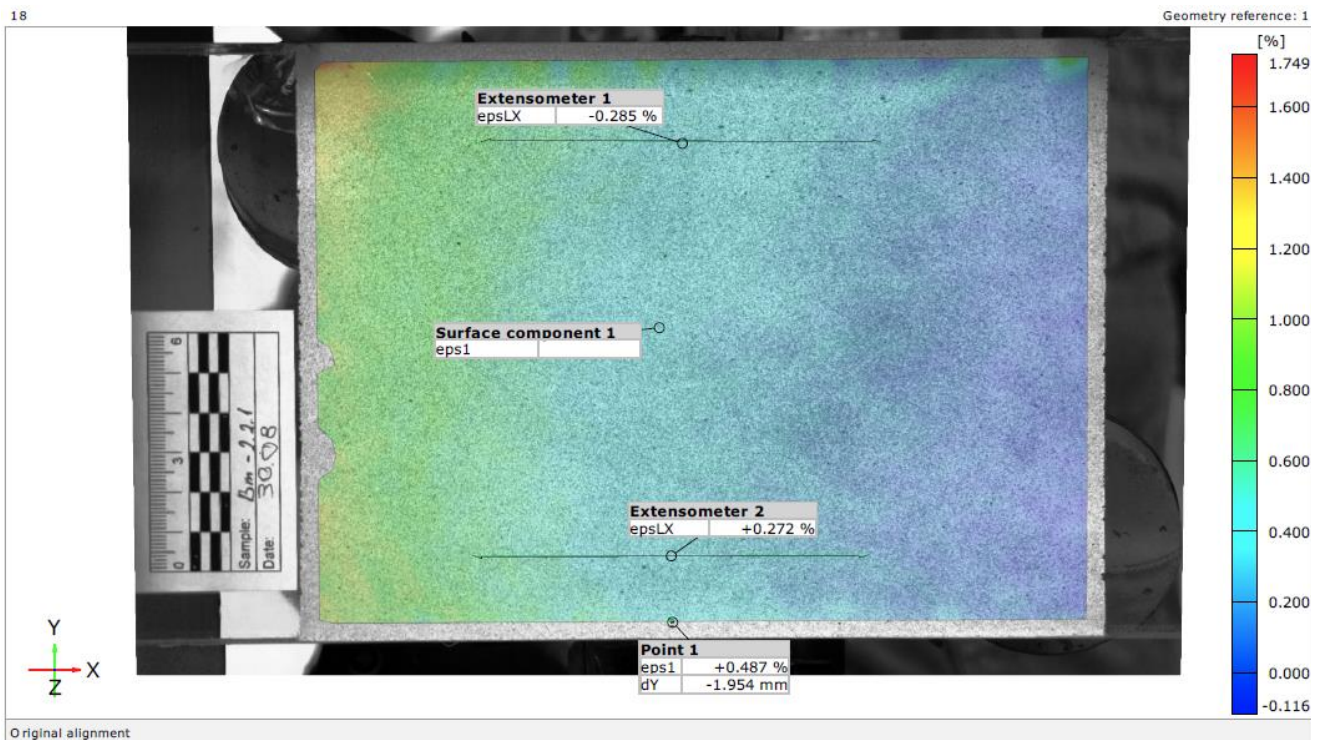


Рис.В.18. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 18

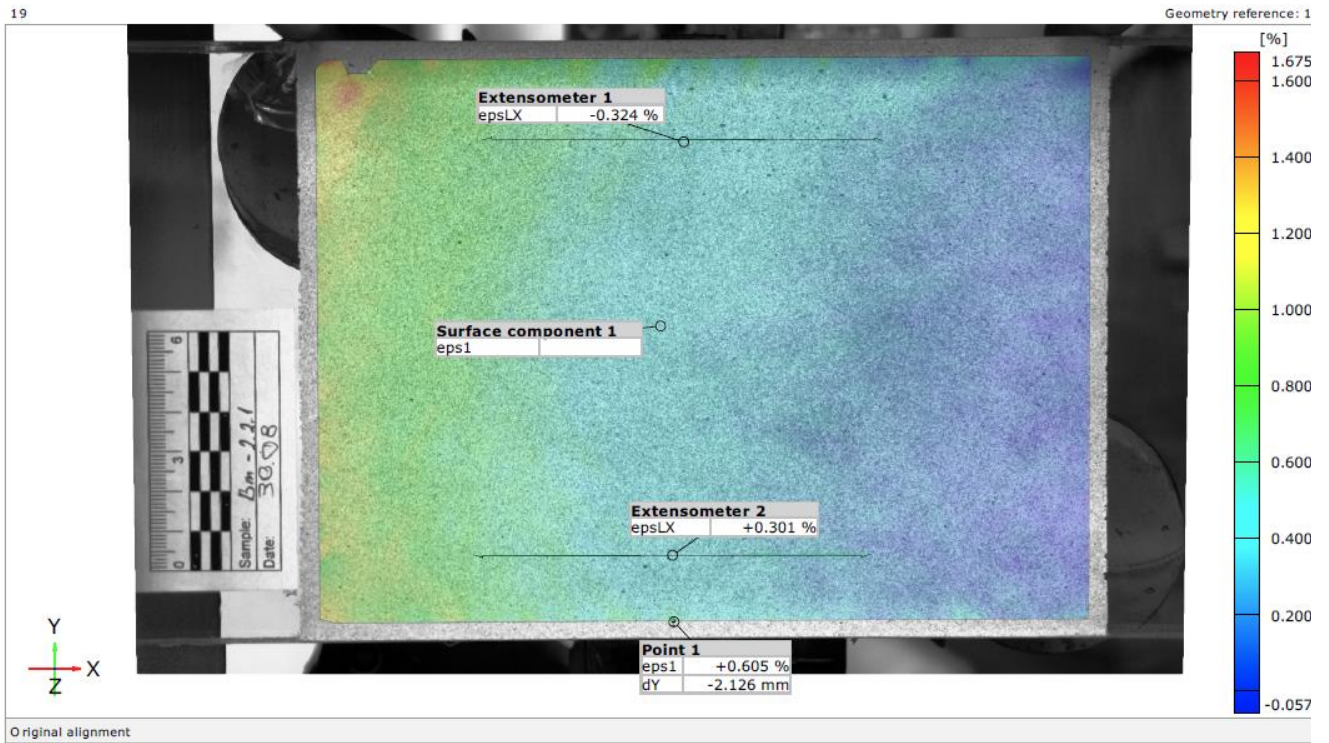


Рис.В.19. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 19

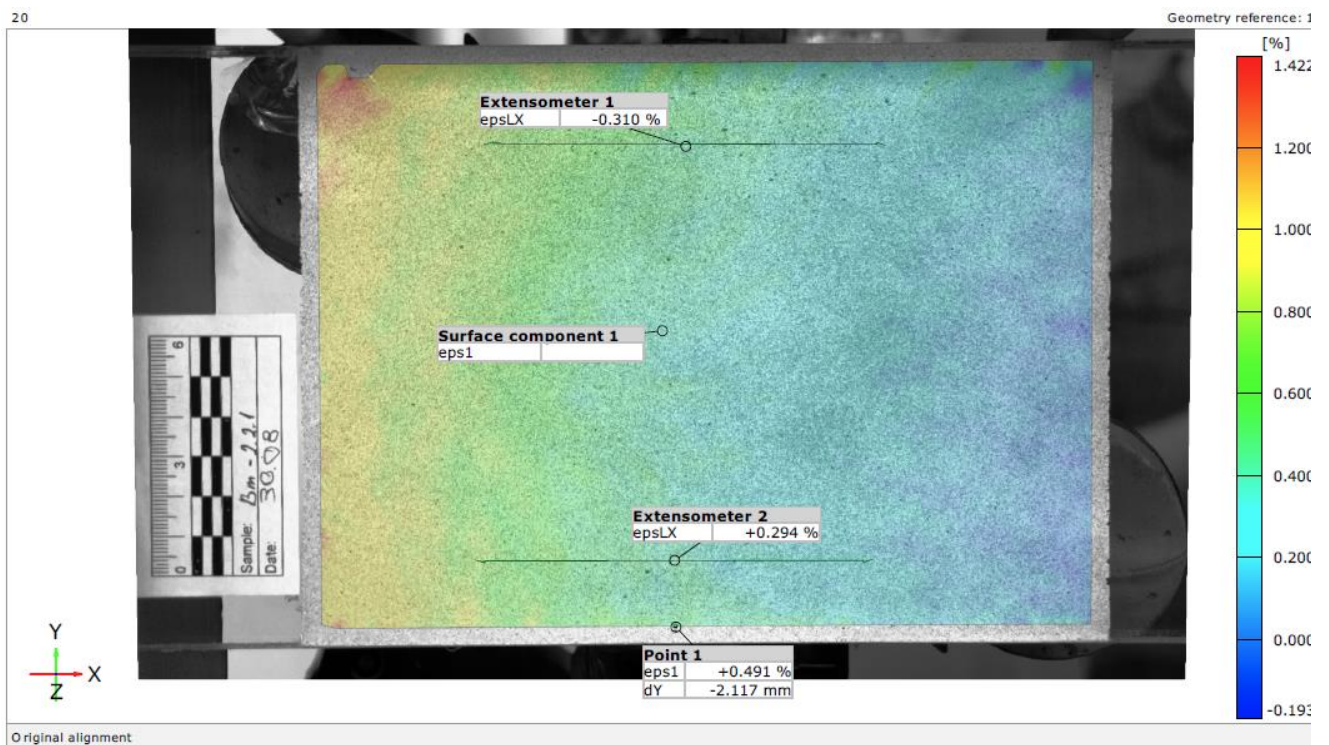


Рис.В.20. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 20

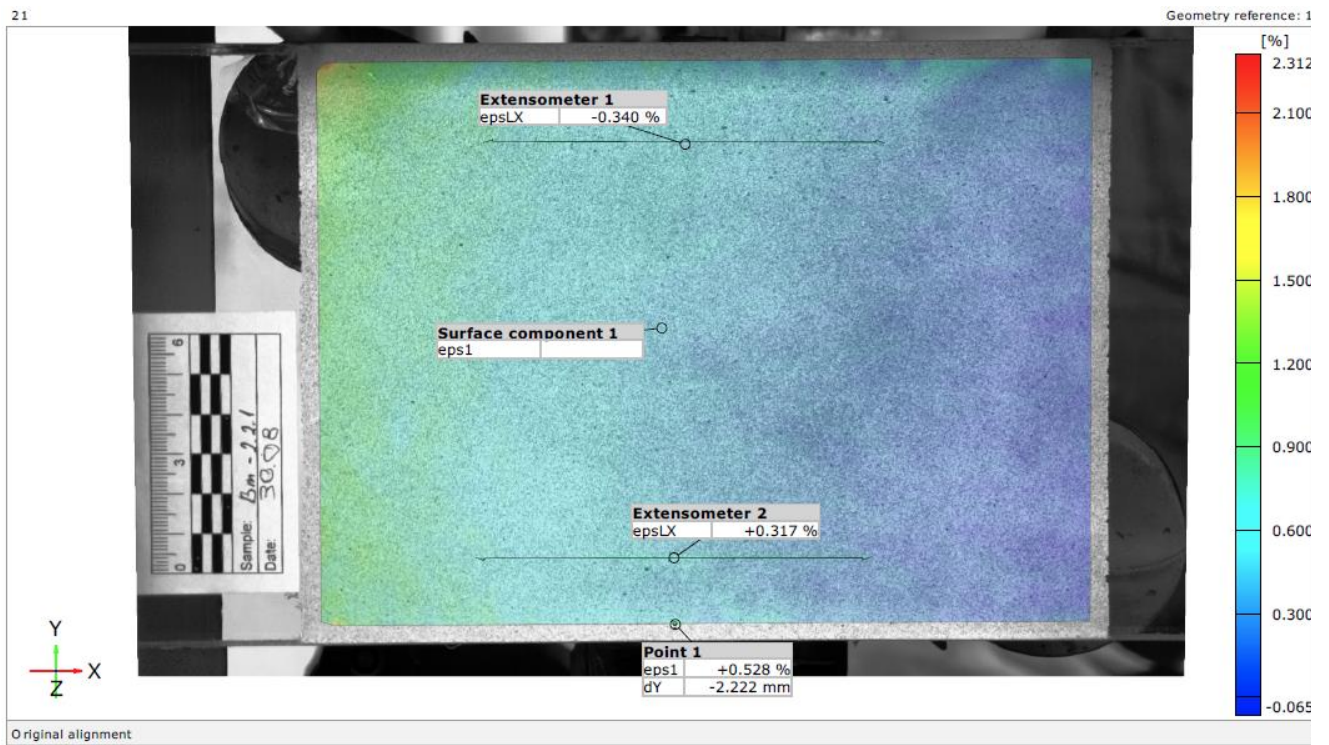


Рис.В.21. Протоколи випробувань скляної балки марки Вm-2.2.1. Етап 21

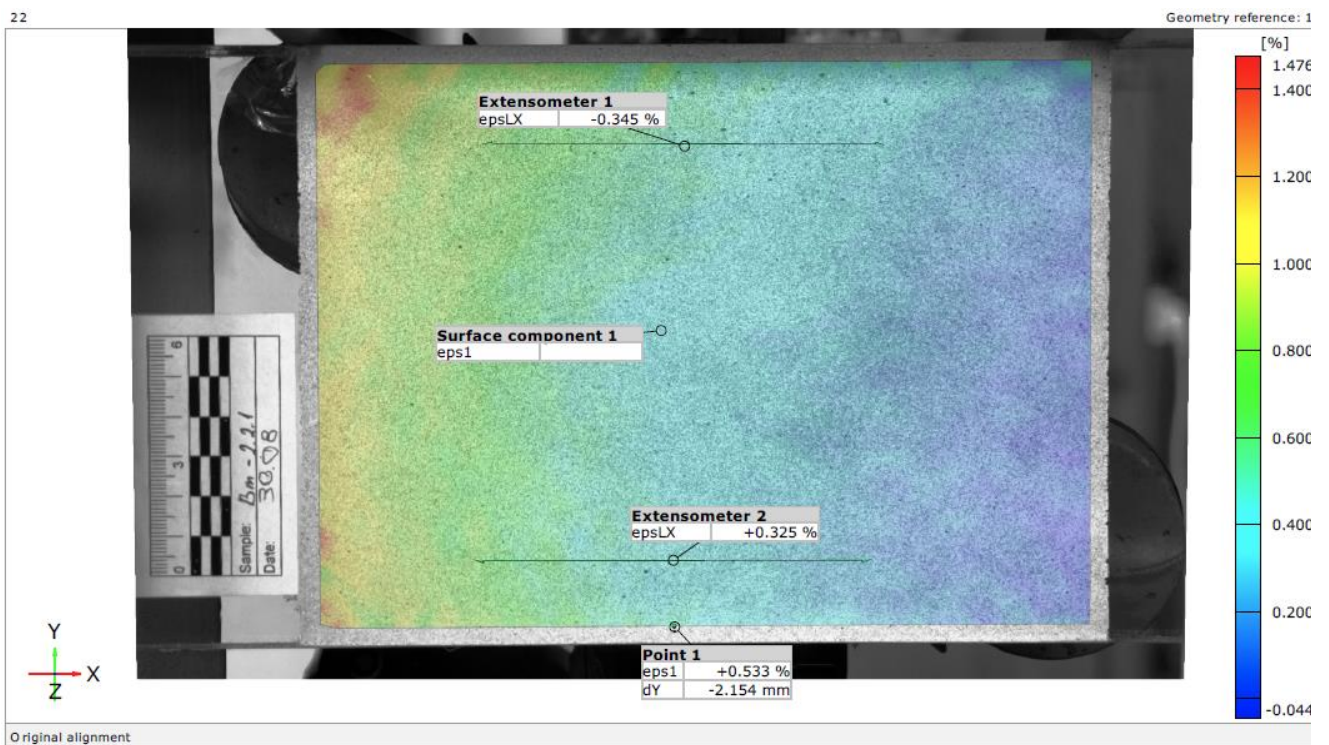


Рис.В.22. Протоколи випробувань скляної балки марки Вm-2.2.1. Етап 22

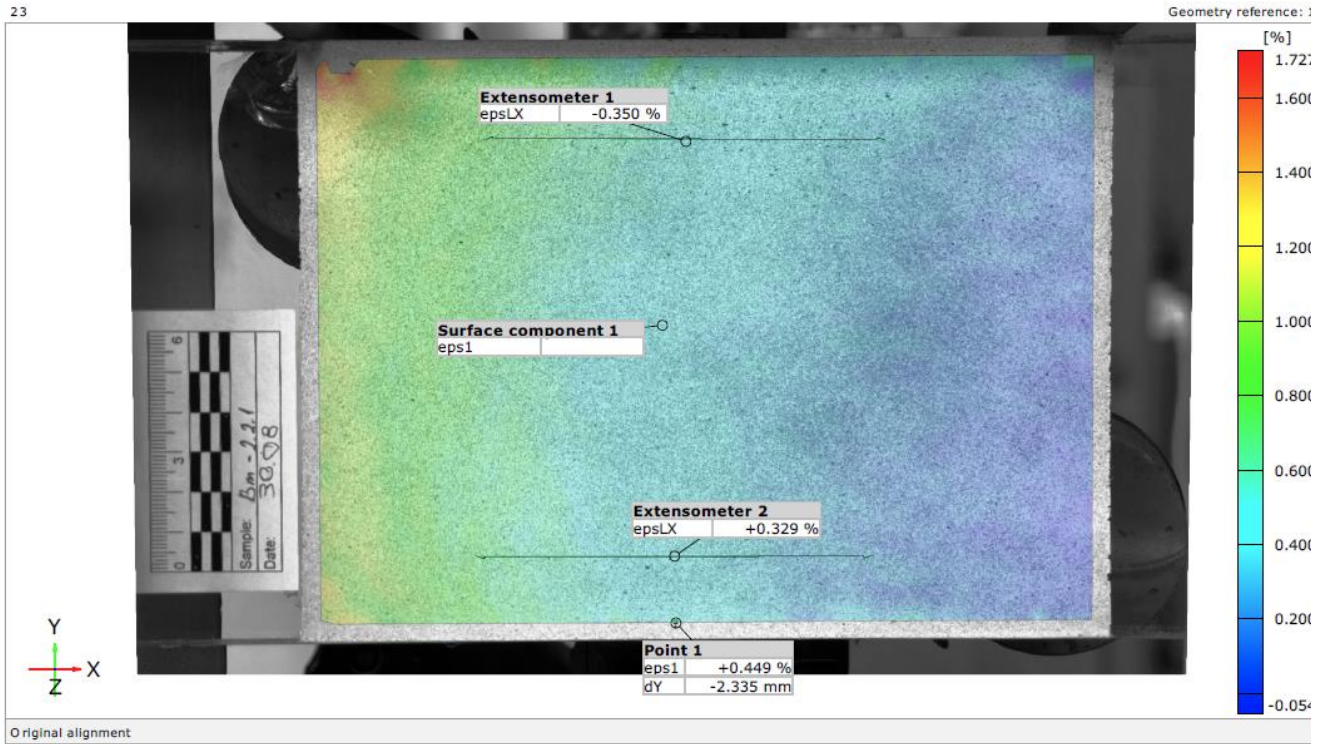


Рис.В.23. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 23

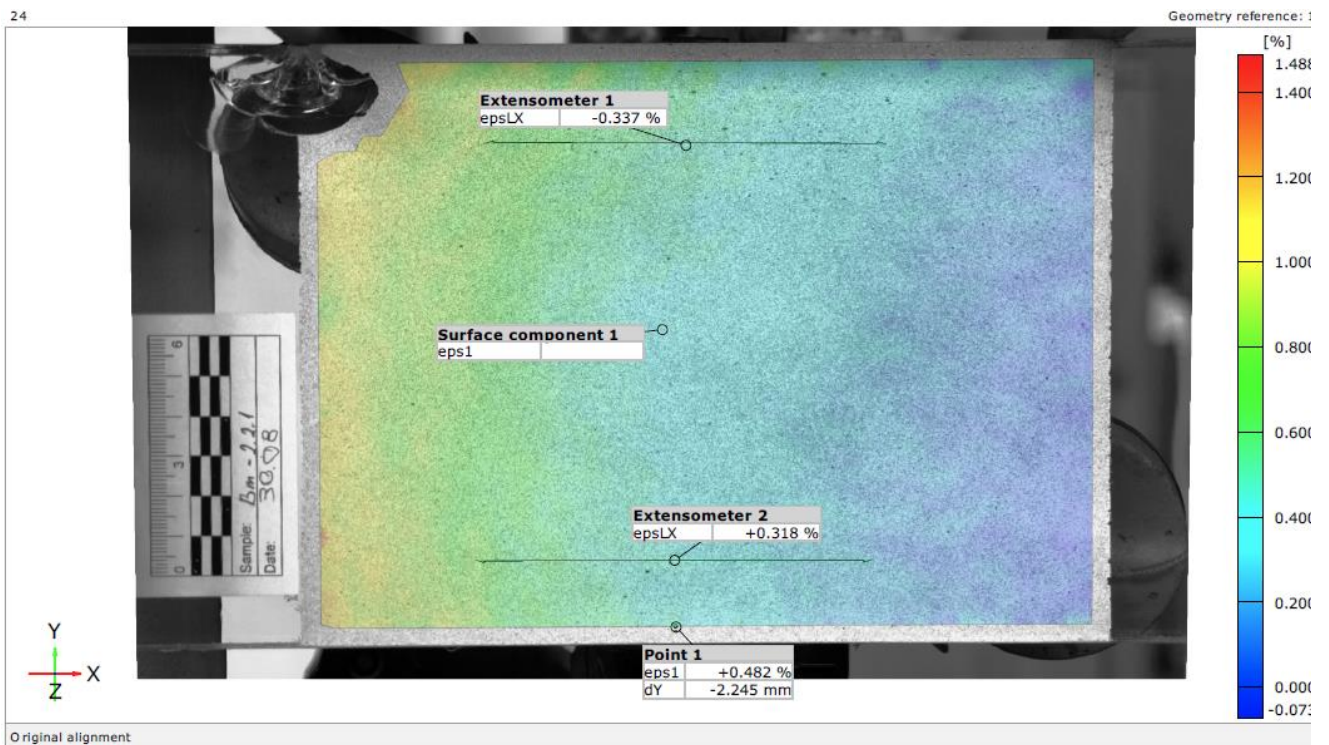


Рис.В.24. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 24

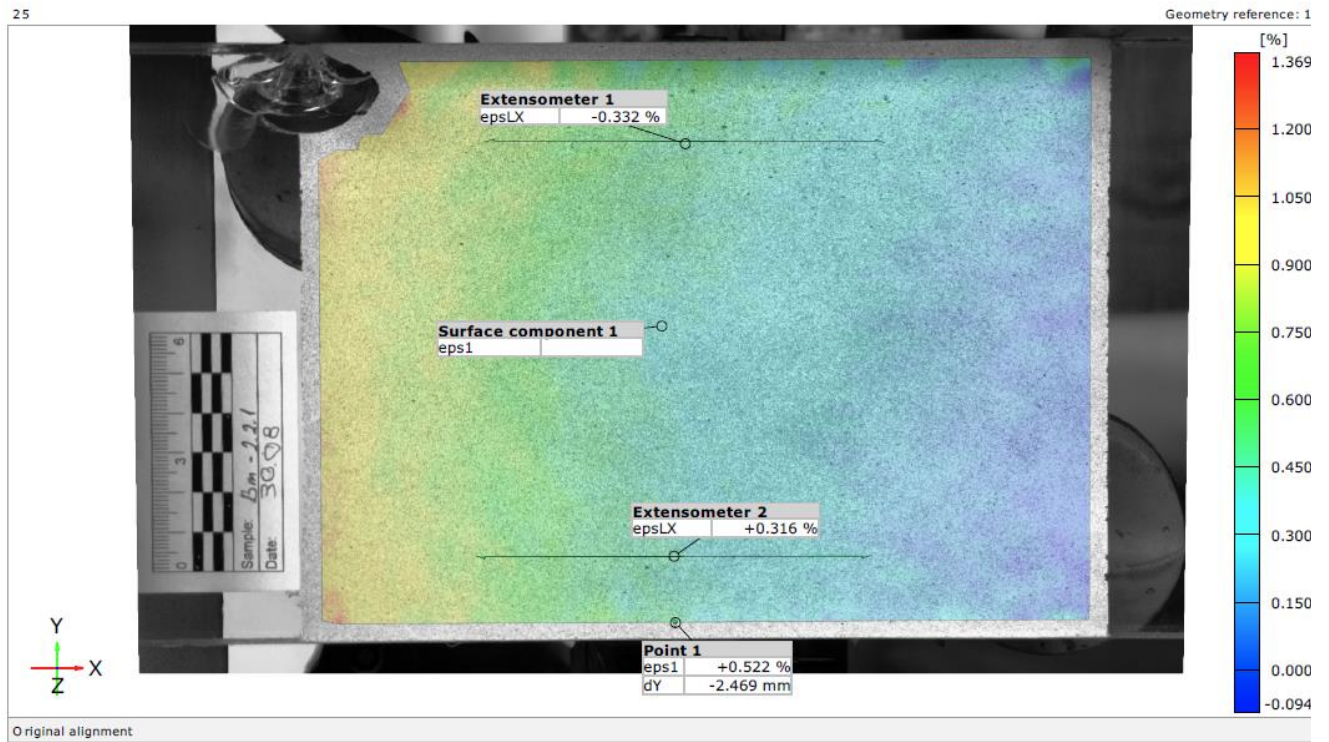


Рис.В.25. Протоколи випробувань скляної балки марки Вm-2.2.1. Етап 25

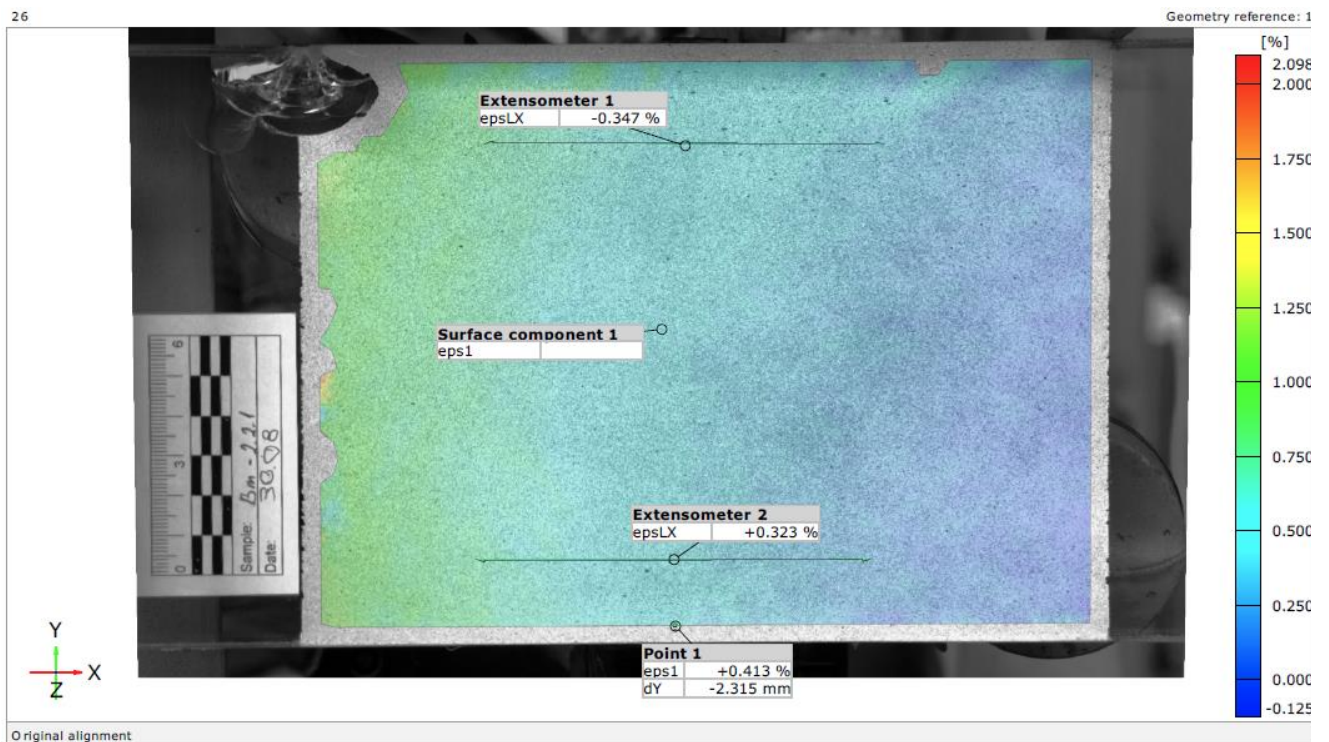


Рис.В.26. Протоколи випробувань скляної балки марки Вm-2.2.1. Етап 26

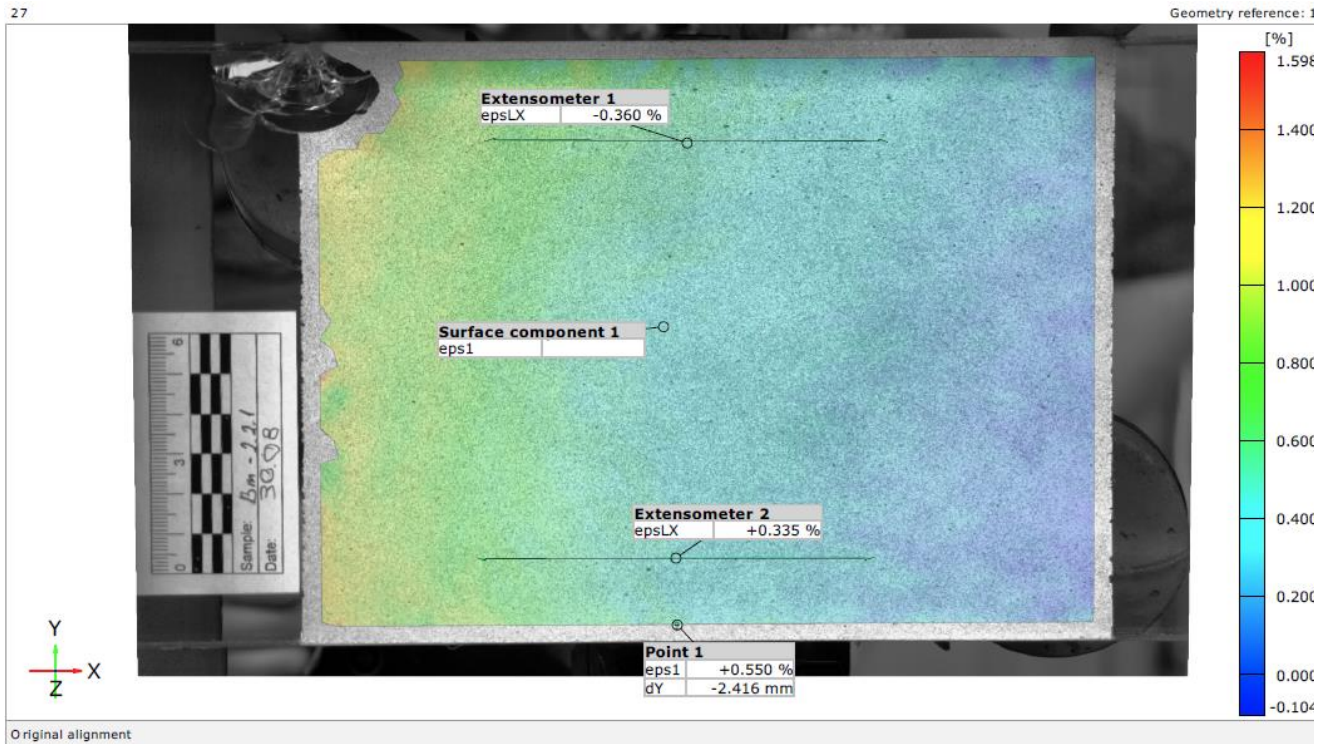


Рис.В.27. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 27

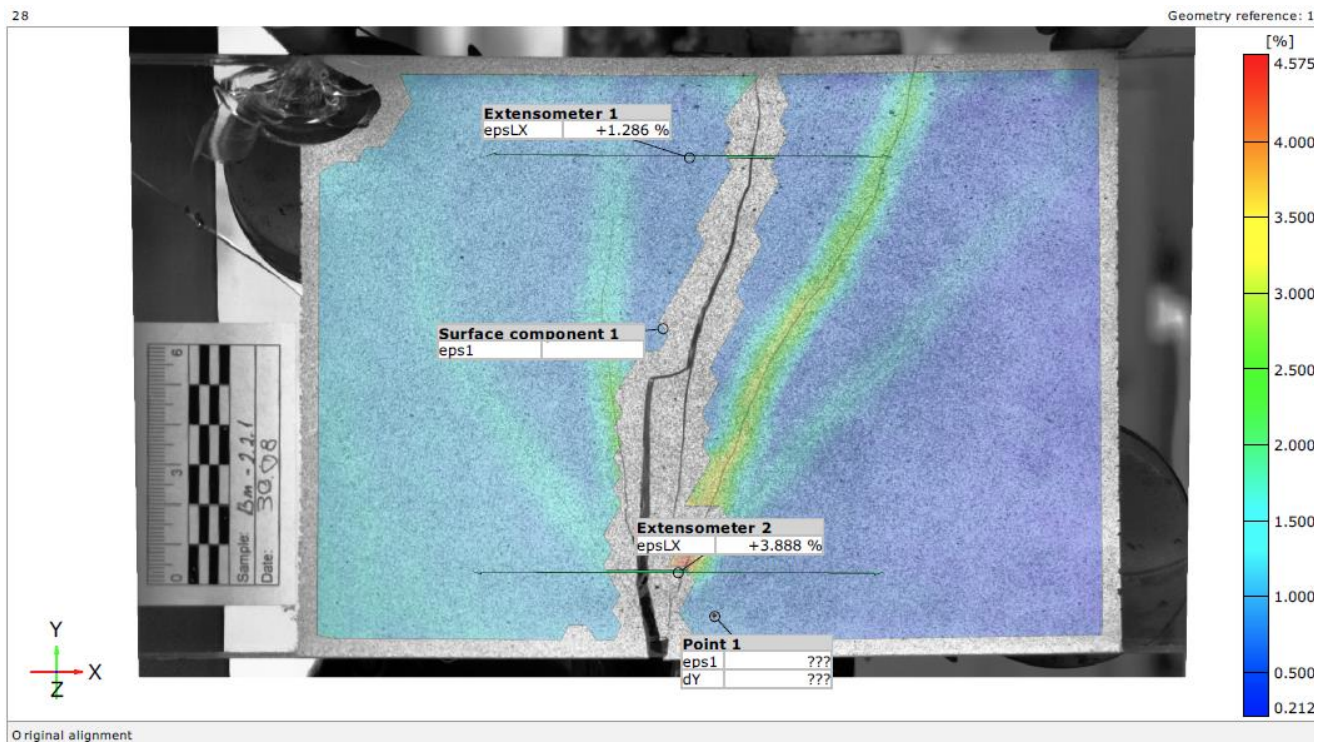


Рис.В.28. Протоколи випробувань скляної балки марки Вм-2.2.1. Етап 28

ДОДАТОК В. Протокол дослідження скляних балок із ступінчастим приростом навантаження

Марка	Наван- та- ження N_i [кН]	Прогин u_z [мм]	Бокові деформації		Відносні деформації			
			$u_{у.низ}$ [мм]	$u_{у.верх}$ [мм]	$\epsilon_{1.i}^{низ}$ [x10 ⁻⁴]	$\epsilon_{1.i}^{верх}$ [x10 ⁻⁴]	$\epsilon_{2.i}^{низ}$ [x10 ⁻⁴]	$\epsilon_{2.i}^{верх}$ [x10 ⁻⁴]
Вм-1.1.3	0.0	0	0.000	0.000	0	0	0	0
	0.2	0.30	0.080	0.100	1.03	-1.39	0.1	-0.1
	0.5	0.62	0.090	0.000	1	-1.39	0.1	-0.21
	0.7	0.72	0.100	0.000	1.01	-1.4	0.67	-0.8
	1.0	0.80	0.110	-0.260	1.97	-1.45	0.34	-0.53
	1.2	0.89	0.110	-1.540	2.11	-1.52	0.38	-0.71
	1.5	0.96	0.080	-1.380	2.2	-1.69	0.89	-1.76
	1.7	1.09	-0.390	-3.820	2.41	-1.95	1.87	-3.55
	2.0	1.16	-0.640	-4.200	2.5	-2.14	2.15	-3.94
Вм-1.1.4	0.0	0	0	0	0	0	0	0
	0.2	0.27	0.00	-0.57	0	0	0.24	-0.4
	0.5	0.36	-0.09	-0.71	0	-0.5	0.43	-0.8
	0.7	0.42	-0.21	-0.11	0.6	-1.2	0.6	-1
	1.0	0.51	-0.38	-0.68	1.1	-2.2	1.07	-2.2
	1.2	0.57	-0.63	-1.45	1.8	-3.3	1.08	-3.43
	1.5	0.67	-0.96	-2.52	2.9	-4.8	2.63	-4.96
	1.7	0.76	-1.44	-4.02	4.8	-6.6	3.36	-6.16
	2.0	0.82	-1.72	-4.98	-	-	4.2	-7.59
Вм-1.2.3	0.00	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.21	0.00	-0.48	-0.27	0.0	-0.1	0.0	0.0
	0.71	0.15	-0.65	-0.55	0.3	-0.7	0.0	-1.0
	1.21	0.22	-0.73	-0.77	1.0	-1.0	0.2	-1.6
	1.71	0.34	-0.82	-0.95	1.3	-1.4	0.7	-1.7
	2.21	0.41	-0.91	-1.19	1.7	-1.7	1.0	-2.1
	2.71	0.51	-0.99	-1.39	1.7	-2.2	1.1	-2.1
	3.21	0.62	-1.06	-1.53	1.7	-2.6	1.3	-1.9
	3.71	0.69	-1.10	-1.67	2.0	-3.0	2.1	-2.7
Вм-1.2.4	0.0	0	0	0	0	0	0.00	0
	0.2	0.02	0.15	0.15	0	0	0.00	0
	0.7	0.16	0.14	0.10	0.5	-0.5	0.13	0
	1.2	0.27	0.14	0.01	0.8	-0.8	0.65	-0.34
	1.7	0.33	0.17	-0.11	1	-1	0.28	-0.36
	2.2	0.47	0.13	-0.33	1.5	-1.5	0.48	-0.6
	2.7	0.57	0.05	-0.58	1.9	-1.9	0.58	-0.73
	3.2	0.66	-0.07	-0.92	2.3	-2.3	0.65	-0.85
	3.7	0.70	-0.17	-1.22	2.6	-2.6	0.98	-1.15
	4.2	0.81	-0.47	-1.81	3.2	-3.2	1.20	-1.6
	4.7	0.92	-0.77	-2.38	4	-4	2.18	-2.4
	5.2	1.02	-1.06	-2.90	4.5	-4.5	2.62	-2.92
	5.7	1.16	-1.39	-3.45	5.2	-5.2	3.82	-3.98

Марка	Наван- та- ження N_i	Прогин u_z	Бокові деформації		Відносні деформації			
			$u_{y.низ}$	$u_{y.верх}$	$\epsilon_{1.i}^{низ}$	$\epsilon_{1.i}^{верх}$	$\epsilon_{2.i}^{низ}$	$\epsilon_{2.i}^{верх}$
	[кН]	[мм]	[мм]	[мм]	[$\times 10^{-4}$]	[$\times 10^{-4}$]	[$\times 10^{-4}$]	[$\times 10^{-4}$]
Вм-1.3.1	0.0	0	0	0	0	0	0	0
	0.2	0.17	0.10	-0.03	0.1	0	0	0
	1.2	0.35	0.57	0.26	0.3	-0.84	1.4	-1.84
	2.2	0.48	1.00	0.73	0.6	-1.26	1.63	-2.42
	3.2	0.64	1.41	1.14	0.9	-2.1	1.74	-2.87
	4.2	0.79	1.68	1.49	1.4	-2.52	1.89	-3.14
	5.2	0.89	1.85	1.66	1.8	-2.94	2.22	-3.18
	6.2	1.04	2.01	1.87	2.7	-3.36	2.31	-3.38
7.2	1.05	2.08	1.98	2.3	-3.36	2.55	-3.45	
Вм-1.3.2	0.0	0	0	0	0	0	0	0
	0.2	0.12	0.34	0.34	0.3	-0.1	0	0
	1.2	0.30	0.40	0.57	0.5	-0.2	0.04	-0.5
	2.2	0.40	0.61	0.85	0.9	-0.3	0.25	-1
	3.2	0.56	0.71	0.96	1.2	-0.6	0.34	-1.705
	4.2	0.72	0.68	0.94	1.6	-0.8	0.48	-1.8
	5.2	0.86	0.69	0.96	1.9	-1	0.67	-2.04
	6.2	1.00	0.75	0.95	2.3	-1.3	0.79	-2.165
7.2	1.15	0.92	1.00	2.6	-1.6	1.34	-2.415	
Вм-2.1.1	0.0	0	0	0	0	0	0	0.00
	0.2	0.06	0.02	0.22	0.5	-0.06	0	0.00
	1.2	0.14	-0.01	0.28	0.5	-0.15	0.4	-0.80
	2.2	0.40	-0.05	0.34	0.76	-0.21	0.62	-1.10
	3.2	0.58	-0.04	0.37	1.97	-0.57	1.1	-1.40
	4.2	0.71	0.03	0.47	1.94	-0.84	1.42	-1.67
	5.2	0.83	0.13	0.55	1.92	-1.26	1.24	-1.93
	6.2	0.98	0.21	0.63	1.93	-1.41	1.12	-2.03
	7.2	1.10	0.38	0.79	1.91	-1.68	1.27	-2.07
8.2	1.30	0.91	1.27	1.89	-2.04	1.45	-2.50	
Вм-2.1.2	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.2	0.02	0.05	0.19	0.6	-0.18	0.01	-0.01
	1.2	0.16	0.07	0.28	0.6	-0.24	1.51	-1.64
	2.2	0.32	0.07	0.35	1.1	-0.66	1.92	-2.15
	3.2	0.45	0.09	0.485	1.5	-1.08	2.35	-2.65
	4.2	0.58	0.09	0.59	1.8	-1.5	2.31	-2.49
	5.2	0.72	0.12	0.64	2.1	-2.04	2.8	-3.07
	6.2	0.86	0.12	0.66	2.3	-2.58	3.06	-3.36
	7.2	0.99	0.13	0.665	2.4	-3.24	3.31	-3.66
8.2	1.18	0.16	0.735	2.5	-3.84	3.2	-3.63	

Марка	Наван- та- ження N_i	Прогин u_z	Бокові деформації		Відносні деформації			
			$u_{у.низ}$	$u_{у.верх}$	$\epsilon_{1.i}^{низ}$	$\epsilon_{1.i}^{верх}$	$\epsilon_{2.i}^{низ}$	$\epsilon_{2.i}^{верх}$
	[кН]	[мм]	[мм]	[мм]	[$\times 10^{-4}$]	[$\times 10^{-4}$]	[$\times 10^{-4}$]	[$\times 10^{-4}$]
Вм-2.2.1	0.0	0	0	0	0	0	0	0
	0.2	0.02	-0.03	-0.16	0.1	-0.1	1.4	-1.07
	1.2	0.14	-0.06	-0.205	0.3	-0.3	1.47	-1.23
	2.2	0.25	-0.12	-0.25	0.3	-0.4	1.86	-1.71
	3.2	0.37	-0.27	-0.49	0.4	-0.7	2.13	-1.96
	4.2	0.47	-0.32	-0.655	0.6	-0.9	2.34	-2.25
	5.2	0.59	-0.38	-0.685	0.8	-1.3	2.49	-2.5
	6.2	0.69	-0.39	-0.75	0.9	-1.7	2.63	-2.69
	7.2	0.78	-0.40	-0.81	1	-2.1	2.83	-2.86
	8.2	0.92	-0.42	-0.86	1.2	-2.2	2.91	-3.02
	9.2	1.08	-0.48	-1.025	1.3	-2.6	3.01	-3.24
	10.2	1.20	-0.54	-1.07	1.5	-2.9	3.17	-3.4
	11.2	1.32	-0.54	-1.16	1.6	-3.3	3.29	-3.5
12.2	1.42	-0.62	-1.27	2	-3.3	3.16	-3.32	
Вм-2.2.2	0.0	0	0	0	0	0	0	0
	0.2	-0.01	0.00	0.01	0	-0.3	0	0
	1.2	0.10	0.01	0.49	0	-0.6	0.28	-0.21
	2.2	0.22	0.12	0.54	0.2	-0.9	0.31	-0.22
	3.2	0.29	0.17	0.60	0.5	-1	0.43	-0.29
	4.2	0.39	0.18	0.70	0.8	-1.2	0.5	-0.39
	5.2	0.49	0.20	0.84	1.1	-1.3	0.53	-0.57
	6.2	0.63	0.31	0.94	1.3	-1.6	0.56	-0.83
	7.2	0.84	0.61	1.18	1.4	-2	0.73	-1.09
	8.2	0.99	0.94	1.51	1.6	-2.5	0.74	-1.4
	9.2	1.13	1.14	1.68	1.6	-2.9	0.8	-1.96
	10.2	1.28	1.35	1.88	1.8	-3.4	0.9	-2.29
	11.2	1.40	1.53	2.07	1.9	-3.7	1.09	-3.02
12.2	1.38	1.54	2.06	1.7	-3.8	1.51	-3.5	
Вм-2.3.1	0.0	0	0	0	0	0	0	0
	0.2	0.05	0.00	0.00	0.1	-0.1	0.35	-0.3
	2.2	0.11	0.00	-0.03	0.4	-0.2	0.37	-0.62
	4.2	0.27	-0.01	-0.08	0.6	-0.4	0.58	-0.76
	6.2	0.31	-0.07	-0.08	0.9	-0.6	0.97	-0.96
	8.2	0.58	-0.09	-0.10	1.3	-0.8	1.09	-1
	10.2	0.89	-0.11	-0.10	1.6	-1.6	1.44	-1.26
	12.2	1.20	-0.13	-0.17	2.3	-2.2	1.48	-2
	14.2	1.49	-0.18	-0.30	2.6	-2.8	2.07	-2.18

Марка	Наван- та- ження N_i [кН]	Прогин u_z [мм]	Бокові деформації		Відносні деформації			
			$u_{у.низ}$ [мм]	$u_{у.верх}$ [мм]	$\epsilon_{1.i}^{низ}$ [x10 ⁻⁴]	$\epsilon_{1.i}^{верх}$ [x10 ⁻⁴]	$\epsilon_{2.i}^{низ}$ [x10 ⁻⁴]	$\epsilon_{2.i}^{верх}$ [x10 ⁻⁴]
Вм-2.3.2	0.0	0	0	0	0	0	0	0
	0.2	0.01	-0.01	-0.01	0.08	-0.05	0.04	-0.05
	2.2	0.10	-0.17	-0.19	0.32	-0.05	0.04	-0.08
	4.2	0.33	-0.42	-0.61	0.64	-0.2	0.08	-0.17
	6.2	0.61	-0.60	-0.88	0.8	-0.35	0.09	-0.19
	8.2	0.96	-0.59	-1.03	0.88	-0.55	0.34	-0.26
	10.2	1.20	-0.46	-1.04	0.96	-0.75	0.56	-0.47
	12.2	1.49	-0.43	-1.09	1.04	-0.9	0.89	-0.87
	14.2	1.79	-0.47	-1.17	1.28	-1.05	1.04	-0.95
	14.6		-0.78	-1.59	1.44	-2.05	1.24	-1.43
15.2		-0.79	-1.60	1.6	-2.1	1.76	-2.11	
Вм-3.1.1	0.0	0	0	0	0	0	0	0
	0.3	0.03	0.06	0.00	0.2	-0.2	0.4	-0.3
	1.3	0.06	0.21	0.45	0.4	-0.5	0.3	-0.3
	2.3	0.20	0.44	0.89	0.6	-0.6	0.6	-0.6
	3.3	0.31	0.57	1.10	0.7	-0.7	0.7	-0.7
	4.3	0.40	0.68	1.36	0.8	-0.7	0.7	-0.8
	5.3	0.52	0.82	1.65	0.9	-0.7	1.0	-1.0
	6.3	0.62	0.97	1.93	1.0	-0.8	1.0	-1.1
	7.3	0.77	1.33	2.46	1.2	-0.8	1.1	-1.3
	8.3	0.94	1.74	3.11	1.4	-1.0	1.4	-1.5
	9.3	1.05	2.17	3.81	1.6	-1.2	1.7	-1.7
	10.3	1.17	2.48	4.48	1.8	-1.5	1.9	-2.0
	11.3	1.26	3.09	5.33	2.1	-1.8	2.2	-2.3
	12.3	1.32	3.57	6.12	2.4	-2.1	2.6	-2.6
13.3	1.33	4.04	6.95	2.7	-2.5	2.8	-2.9	
Вм-3.1.2	0.0	0	0	0	0.0	0	0.0	0.0
	0.3	0.03	0.01	0.41	0.0	-0.2	0.0	0.0
	1.3	0.08	0.08	0.53	0.1	-0.3	0.2	-0.3
	2.3	0.13	0.09	0.85	0.2	-0.6	0.4	-0.7
	3.3	0.23	0.10	1.25	0.3	-0.8	0.5	-1.0
	4.3	0.32	0.21	1.52	0.5	-1.1	0.6	-1.3
	5.3	0.43	0.30	1.73	0.6	-1.3	0.7	-1.5
	6.3	0.52	0.46	1.97	0.7	-1.5	0.8	-1.8
	7.3	0.69	0.78	2.54	0.9	-1.9	0.9	-2.1
	8.3	0.84	1.06	2.92	1.0	-2	1.0	-2.2
	9.3	0.92	1.30	3.27	1.2	-2.2	1.0	-2.4
10.3	1.02	1.57	3.55	1.3	-2.3	1.1	-2.5	

Марка	Наван- та- ження N_i	Прогин u_z	Бокові деформації		Відносні деформації			
			$u_{у.низ}$	$u_{у.верх}$	$\epsilon_{1.i}^{низ}$	$\epsilon_{1.i}^{верх}$	$\epsilon_{2.i}^{низ}$	$\epsilon_{2.i}^{верх}$
	[кН]	[мм]	[мм]	[мм]	[$\times 10^{-4}$]	[$\times 10^{-4}$]	[$\times 10^{-4}$]	[$\times 10^{-4}$]
Вм-3.2.1	0.0	0	0	0	0	0	0	0
	0.3	0.07	0.02	0.01	-0.28	0	0.1	-0.9
	2.3	0.12	0.03	0.06	-0.42	0.3	0.3	-1.8
	4.3	0.26	0.03	0.15	-0.7	0.5	0.4	-2.3
	6.3	0.44	0.04	0.23	-0.91	0.8	0.6	-2.9
	8.3	0.69	0.06	0.49	-1.19	1	0.8	-3.4
	10.3	0.88	0.11	0.76	-1.4	1.3	0.9	-4.1
	12.3	1.08	0.37	1.15	-1.61	1.4	1.2	-4.2
	14.3	1.26	0.88	1.86	-1.96	1.5	1.3	-4.3
	16.3	1.44	1.42	2.42	-2.24	1.5	1.4	-5
	18.3	1.76	2.09	2.99	-2.38	1.9	1.4	-5.1
	20.3	1.97	2.27	3.06	-5.18	1.9	1.6	-5.4
	21.4	2.13	2.25	3.00	-5.32	2.5	1.9	-5.6
22.3	2.11	2.26	3.05	-5.39	-	2.1	-5.9	
Вм-3.2.2	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.3	0.05	0.01	0.01	0.0	-0.3	0.2	0.0
	2.3	0.16	0.03	0.03	0.7	-0.4	0.2	-0.1
	4.3	0.37	0.08	0.07	0.7	-0.9	0.4	-0.1
	6.3	0.57	0.15	0.11	1.4	-0.9	0.7	-0.5
	8.3	0.91	0.17	0.12	2.1	-1.3	1.5	-0.8
	10.3	1.13	0.43	0.37	2.8	-1.7	1.9	-1.1
	12.3	1.31	0.67	0.59	2.8	-2.0	2.6	-2.0
	14.3	1.48	0.92	0.82	3.5	-2.3	3.2	-2.2
	16.3	1.65	1.34	1.22	4.2	-2.8	3.8	-2.6
	18.3	1.80	1.35	1.34	4.2	-3.4	4.1	-3.3
	20.3	1.94	1.49	1.44	4.8	-3.9	4.5	-4.1
	22.3	2.10	1.26	1.39	5.5	-4.3	5.0	-5.1
23.3	2.26	1.16	1.37	5.5	-4.8	5.3	-5.7	
24.3	2.26	1.14	1.35	5.5	-4.9	5.4	-5.9	
Вм-3.3.1	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
	0.3	0.02	0.04	0.05	0.1	-0.2	0.5	-0.4
	4.3	0.30	0.23	0.30	0.36	-0.6	1.4	-1.4
	8.3	0.80	0.44	0.56	0.9	-0.8	1.9	-2.1
	12.3	1.13	0.56	0.70	1.5	-1.5	2.1	-2.5
	16.3	1.36	0.65	0.82	1.98	-2.0	2.3	-2.8
	20.3	1.44	0.71	0.91	2.46	-2.5	2.7	-3.1
	24.3	1.54	0.77	0.99	3.06	-3.3	2.9	-3.5
	28.3	1.67	0.84	1.08	3.66	-4.0	3.2	-3.8
	32.3	1.65	0.89	1.15	4.2	-4.3	3.4	-4.1

Марка	Наван- та- ження N_i	Прогин u_z	Бокові деформації		Відносні деформації			
			$u_{y.низ}$	$u_{y.верх}$	$\epsilon_{1.i}^{низ}$	$\epsilon_{1.i}^{верх}$	$\epsilon_{2.i}^{низ}$	$\epsilon_{2.i}^{верх}$
	[кН]	[мм]	[мм]	[мм]	[$\times 10^{-4}$]	[$\times 10^{-4}$]	[$\times 10^{-4}$]	[$\times 10^{-4}$]
Вм-3.3.2	0.0	0	0	0	0.0	0	0	0
	0.3	0.09	0.02	0.10	0.2	-0.36	0.04	-0.04
	4.3	0.16	0.08	0.29	0.4	-0.54	0.62	-0.73
	8.3	0.46	0.41	0.73	0.9	-1.26	1.26	-1.33
	12.3	0.72	0.72	1.13	1.4	-1.8	1.7	-1.78
	16.3	0.92	0.97	1.46	1.9	-2.52	2.28	-2.34
	20.3	1.04	1.05	1.57	2.4	-2.7	2.64	-2.62
	24.3	1.13	1.14	1.69	2.8	-3.06	2.88	-2.84
	28.3	1.24	1.22	1.79	3.3	-3.42	3.26	-3.12
	32.3	1.32	1.30	1.89	3.8	-3.96	3.54	-3.38
36.3	1.42	1.35	1.94	4.2	-3.96	3.8	-3.53	

ДОДАТОК Г. Апробація результатів дисертаційного дослідження та список публікацій здобувача

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

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. B. Demchyna, R. Kozak, P. Majcher, J. Niemiec. Determination of physical and mechanical characteristics of glass forbending: comparison of strength values under different conditions of the orientation of a test sample // Building constructions. Theory and Practice. 2022. № 10. P. 11–23, (НМБД Index Copernicus (2020), Google Scholar, CrossRef). *Особистий внесок здобувача: представлення результатів дослідження фізико-механічних властивостей скла, аналіз отриманих результатів.*
2. B. Demchyna, R. Kozak, Research of glass beams for four-point bending using the method of digital image correlation // Building construction. Theory and Practice. 2023. № 12. P. 16-26, (НМБД Index Copernicus (2020), Google Scholar, CrossRef). *Особистий внесок здобувача: представлення результатів дослідження скляних балок на чотирьохточковий згин.*

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

3. 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 Journal of Enterprise Technologies, 4/12 (106) 2020, P52-59. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209761. (НМБД: Scopus Q3, CrossRef, Index Copernicus, Scilit та ін.). *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, представлення результатів аналізу застосування методу двовимірної кореляції цифрових зображень.*
4. Justyna Sobczak-Piąstka, Demchyna Bogdan, Roman Kozak, Paula Majcher, Janusz Niemiec; Assessment of the effect of lateral loss of stability for flat glass beams. AIP Conf. Proc. 17 August 2023; 2949 (1): 020016. (НМБД: Scopus) *Особистий внесок здобувача: представлення результатів дослідження скляних балок.*

Тези доповідей за темою дисертаційної роботи на міжнародних конференціях:

5. 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. Особистий внесок здобувача: представлення методики проведення фактографічного аналізу скляних зразків після руйнування.*
6. Bohdan Demchyna , Janusz Niemiec, 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.*
7. 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.*
8. 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.*
9. Sobczak-Piąstka Justyna, Demchyna Bohdan, Roman Kozak, Paula Mejcher, Janusz Niemiec, Assessment of the effect of lateral loss of stability for flat glass beams: *11th International Scientific Session Applied Mechanics. Bydgoszcz, Poland, November 18, 2022, P31. Особистий внесок здобувача: представлення*

результатів дослідження скляних балок на згин із оцінкою втрати стійкості.

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

10. Демчина Б.Г., Козак Р.П., Пелех А.Б., Гула В.О., Кунанець Ю.М. (2023) «Установка для випробування скляних балок на чотирьохточковий згин», Патент України на корисну модель №153096, G01N 3/20, G01M 5/00, E04C 2/54, E04C 3/02, E04C 3/28 заява № u202205097 від 28.12.2022, опубліковано 17.05.2023, бюл. №20. *Особистий внесок здобувача: патентний пошук, розробка конструкції установки для випробування скляних балок на чотирьохточковий згин.*

Відомості, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

Основні результати дисертаційного дослідження були оприлюднені та обговорені на:

8-му Міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus» (м. Львів, 22-24 листопада 2018 р., НУЛП);

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.);

11-тій Міжнародній науковій сесії прикладної механіки (м. Бидгощ Польща 18 листопада 2022 р.)

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