НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ТКАЧ РОМАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 624.012.616.6

ДИСЕРТАЦІЯ

НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ СКЛЯНИХ БАГАТОШАРОВИХ КОЛОН

Спеціальність 192 – будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань 19 – архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Р.О. Ткач

Науковий керівник Демчина Богдан Григорович, доктор технічних наук, професор

Львів 2021

АНОТАЦІЯ

Ткач Р.О. Тема дисертації: «Несуча здатність та деформативність скляних багатошарових колон». 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, 2021.

Дисертація присвячена теоретичним та експериментальним науковим дослідженням роботі скляних багатошарових колон, що працюють на центральний стиск під дією статичного навантаження зі встановленням їхньої несучої здатності та деформативності в лабораторних умовах. Дослідні зразки мали різний поперечний переріз, різну висоту та виготовлені із звичайного, термозміцненого та гартованого скла за допомогою триплексації. Скляні багатошарові колони випробовувались відповідно до розробленої методики експериментальних досліджень на центральний стиск з різним закріпленням на опорах, а саме, шарнірним та пружно-податливим закріпленням опор. Використано сучасний оптичний метод для заміру деформацій колон, а саме: метод двовимірної кореляції цифрових зображень. Також визначено реальні значення фізико-механічних характеристик скла, з яких було виготовлено колони. За результатами проведених теоретичних та експериментальних наукових досліджень розроблено методику розрахунку несучої здатності скляних багатошарових колон, що працюють на центральний стиск та подано рекомендації щодо їх проектування, які були впроваджені на об’єктах у будівництві.

У першому розділі вибрано основні напрямки та стан наукового дослідження несучої здатності та деформативності скляних багатошарових колон. Сформовано основні завдання дисертаційної роботи. Проведено огляд наукової літератури. Представлено сучасний стан дослідження несучої здатності скляних стиснутих елементів. Наведено приклади застосування скляних колон на реальних об’єктах та зроблено огляд існуючих методів їх розрахунку.

Скло, як будівельний матеріал, є інноваційним у будівництві. Ніїссе Р. визначив п’ять категорій скляних стиснутих колон, таких як: профільні, трубчасті, багатошарові, пучкові та литі. Профільні скляні колони складалися з прямокутних плоских панелей, з'єднаних за допомогою прозорого клею. Існують різні можливі конфігурації профільних скляних колон, такі як: хрестоподібний, Н-профіль, Т-профільні або квадратний профіль, такий вид колон є найбільш вивчений, оскільки проводилось багато досліджень по всьому світі і даний вид колон реалізований на практиці. Скляні трубчасті колони складались з однієї зігнутої скляної панелі, яка не має країв, окрім верху і низу циліндра. Багатошарові скляні колони складались із шарів скла у вигляді пластин, які склеєні між собою чи виготовлені за допомогою триплексації. Пучкові скляні колони складалися із цільних стержнів, які мають обмежений діаметр, та склеєні між собою за допомогою різних клеїв, утворюючи складний, але цільний переріз, а литі колони мали повнотіле тіло.

У будівництві, як правило, використовують натрієво-кальцієве силікатне флоат-скло для несучих конструкцій. Дане скло є найбільш широко застосовуваним склом. Його метод виробництва було розроблено британською компанією Pilkington в 1950-ті роки, яка зробила переворот у скляній промисловості.

Отже, для дослідження деформативності та міцності обрано скляну багатошарову колону, оскільки даний вид колон практично не досліджувався, що обумовлює відсутність прикладів реалізації на практиці таких колон. Для їхнього виготовлення обрано флоат-скло, оскільки воно є найпоширенішим склом у будівництві.

Міцність скла залежала від обробки поверхні його краю. Краї, які не оброблялися після різання, наявні мікротріщини (так звані дефекти Гріффіта), що сутево знижували міцність скла. Коли краї шліфувалися та полірувалися, мікротріщини зменшилися до мінімуму і результуюча міцність скла ставала вища. З цієї причини шліфоване та поліроване флоат-скло було використане для виготовлення багатошарових скляних колон.

За результатами огляду наукової літератури, досліджень скляних колон різного поперечного перерізу вченими було виявлено, що скло має велику міцність

на стиск, тому ці скляні стиснуті колони, як правило, виходять з ладу через втрату стійкості. Отже, необхідно перевіряти їхню несучу здатність за цим граничним станом.

На основі проведеного огляду вільно доступної та платної нормативної та наукової літератури, можна стверджувати, що наукові дослідження, які б вивчали та пояснювали роботу скляних колон, досі в Україні не проводились. Відсутні норми та рекомендації щодо проектування таких конструкцій. Існуючі наукові дослідження багатошарових колон мали не системний характер. Тому проведення комплексного фундаментального дослідження скляних багатошарових колон на центральний стиск допоможе вирішити актуальну проблему.

У другому розділі наведено характеристику запроектованих та виготовлених дослідних зразків для проведення експериментальних досліджень, розроблену методику їх випробування.

Для визначення несучої здатності та деформативності виготовлено у виробничих умовах та захищено патентом двадцять одну скляну колону, які мали різний поперечний переріз, різну висоту та виготовлені із звичайного, термозміцненого та гартованого скла за допомогою триплексації – між кожним шаром скла товщиною h=10мм вкладали одну полімерну плівку марки EVASAFE товщиною h_{int}=0.38мм (Bridgestone, Японія). Після цього колони нагрівались до температури 130 ºС і витримувались 20-40 хв у спеціальній камері. Скляні колони були поділені на вісім серій, відповідно до програми експериментальних досліджень.

Розроблена методика випробування скляних колон полягала в проведенні досліджень скляних багатошарових колон на центральний стиск під дією статичного навантаження та була захищена патентом.

У перше для заміру деформацій скляних колон було використано оптичний метод двовимірної кореляції цифрових зображень, який дозволив отримувати повну картину деформування конструкції з початку навантаження до її руйнування, дозволив зменшити трудомісткість. Даний метод полягав в аналізі порівняння переміщень нанесених точок на поверхні колони до та після деформування.

Переміщення точок фіксувалось цифровим зображенням на кожному ступені навантаження.

Для визначення фізико-механічних характеристик скла, з яких були виготовлені колони, проведено випробування відповідно до програми експериментальних досліджень, 20-и кубів та 20-и призм на стиск під дією статичного навантаження, 30-и пластин на трьохточковий згин та 12-ть розроблених та запатентованих зразків на дослідження роботи зчеплення шарів скла, з'єднаних між собою різними методами.

Для аналізу міцності скла на стиск, розтяг при згині та модуля пружності використано ймовірнісно-статистичний метод на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла.

У третьому розділі подано результати проведених експериментальних досліджень та їх аналіз. Для оцінки поведінки скляних колон під час досліджень побудовано графіки залежності відносних деформацій від напружень для кожної з серій дослідних зразків. Наведено характер вичерпання несучої здатності колон, виготовлених із звичайного, термозміцненого та гартованого скла. За результатами аналізу досліджень зроблено висновки, що всі колони зруйнувались за першим граничним станом від втрати стійкості форми.

За результатами вимірювання деформацій стиснутих скляних колон за допомогою двовимірної КЦЗ рекомендовано не використовувати даний метод при дослідженні скляних колон на центральний стиск, оскільки двовимірна КЦЗ не може врахувати переміщення дослідного зразка в просторі по трьох осях, але даний метод чітко показує характер деформування дослідних зразків. Надано рекомендації, що варто спробувати виміряти деформації при дослідженні скляних колон за допомогою тривимірної кореляції цифрових зображень, оскільки колони деформуються в напрямку трьох осей у просторі, а двовимірна КЦЗ заміряє деформації лише в одній площині, тобто деформування по двох осях.

За результатами випробувань скляних кубів та призм та за допомогою статистично-ймовірнісного аналізу даних (двопараметричного розподілу Вейбулла) було встановлено мінімальне значення модуля пружності звичайного

скла та характеристичну призмову, кубикову міцність на стиск. Співвідношення призмової міцності скла і кубикової склала $f_{ck,prism,5\%} = 0{,}72 f_{ck,cube,5\%}$. Також встановлено коефіцієнт Пуассона.

За результатами проведених експериментальних досліджень на трьох точковий згин та за допомогою статистично-ймовірнісного аналізу даних (двопараметричного розподілу Вейбулла) було встановлено реальне значення модуля пружності та характеристичну міцність на розтяг при згині звичайного, термозміцненого і гартованого скла.

Наведено результати експериментальних досліджень роботи різних типів з'єднань скла між собою. Було прийнято у скляних колонах, виготовлених у заводських умовах за допомогою триплексації, використовувати для з'єднання скла полімерну плівку EVASAFE, оскільки вона виявилась кращою.

У четвертому розділі подано два результати розрахунку несучої здатності скляних стиснутих елементів, а саме, аналітичний та метод кінцевих елементів. Наведено порівняльний аналіз різних методів розрахунку з отриманими експериментальними значеннями. Подано розроблені рекомендації щодо проектування скляних багатошарових колон.

Аналітичний метод розрахунку полягав на основі концепції ефективної товщини, формулювання якого сформовано за результатами оригінальної роботи Вольфеля-Беннісона. Також для визначення проектної стійкості скляних багатошарових колон використана оригінальна теорія Айртона – Перрі.

Розрахунок критичної сили методом кінцевих елементів виконаний у програмі RFEM, використавши концепцію ефективної товщини (Вольфеля-Беннісона). Програмний комплекс RFEM призначений для розрахунку несучих конструкцій, динамічного аналізу, машинобудування та розроблений компанією Dlubal. У розрахунку використаний додатковий модуль RF-STABILITY, який дозволяє розраховувати стержневі та пластинчасті конструкції на стійкість, проте дозволяє знаходити значення критичного навантаження тільки у стержневих системах. Тому модель колон – це стержень. У зв'язку із прийнятими умовами роботи зразка, модель роботи матеріалу прийнято ізотропною. Для визначення

методів пошуку векторів втрати стійкості застосований метод Ланцоша. За результатами проведеного розрахунку критичної сили методом кінцевих скляних багатошарових колон на центрально-осьове навантаження із різним закріпленням на опорах встановлено, у якій площині відбудеться втрата стійкості та її форма.

Результати дисертаційного дослідження використані на практиці при розрахунку та проектуванні скляних конструкцій. Підтвердженням цього є акти впровадження дисертаційного дослідження.

Підтвердженням практичної значимості та технічної новизни є три отримані патенти України: «Скляна колона», Патент України на корисну модель №128990, E04C 3/30, E04B 1/18, E04B 1/28, E04H 15/34, E04H 15-60, заява № u201805969 від 29.05.2018, опубліковано 10.10.2018, бюл. №19/2018; «Спосіб випробовування скляної колони», Патент України на корисну модель №134878, G01N 3/10, заява № u201812746 від 21.12.2018, опубліковано 10.06.2019, бюл. №11; «Зразок для випробування зчеплення пластин між собою», Патент України на корисну модель №140007, G01N 3/08, заява № u201905744 від 27.05.2019, опубліковано 10.02.2019, бюл. №3.

Ключові слова: скляні куби, скляні призми, скляна багатошарова колона, закон двопараметричного розподілу Вейбулла, фізико-механічні характеристики скла, кореляція цифрових зображень, несуча здатність скляних колон.

ABSTRACT

Tkach R.O. The theme of the dissertation is "Load bearing capacity and deformability of stacked glass columns". The dissertation is presented to obtain the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 – Construction and Civil Engineering, in the area of expertise 19 – Architecture and Construction, Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021.

The dissertation is devoted to the theoretical and experimental study of the stacked glass columns tested in the central compression under the static loading and determining of their bearing capacity and deformability in laboratory conditions. The test specimens

had different cross-sections, different heights and were made of ordinary, heat-strengthened and tempered glass using triplexing technology. Stacked glass columns were tested in central compression with different fixing on supports, namely hinged and elastic-pliable fixing of supports, in accordance with the developed method of experimental study. A modern optical method is applied to measure the deformations of columns, namely the method of two-dimensional digital image correlation. Furthermore, the real values of physical and mechanical properties of the glass from which the columns were made were determined. Based on the results of theoretical and experimental study, we developed a method of calculating the bearing capacity of the stacked glass columns tested in central compression and recommendations for their design, which were implemented at construction sites.

In the first chapter, the main directions of the scientific study of bearing capacity and deformability of stacked glass columns are determined. The main objectives of the dissertation are stated. An overview of the scientific literature is presented. The current research on bearing capacity of compressed glass elements is described. The examples of application of glass columns in real objects are viewed and the review of existing methods of their calculation is made.

Glass is considered to be an innovative building material in construction. R. Nijsse identified five types of compressed glass columns, namely profile, tubular, stacked, bundled and cast. Profile glass columns consist of rectangular flat panels connected by transparent glue. There are various possible configurations of profile glass columns, such as: cruciform, H-profile, T-profile or square profile, this type of columns is the most studied, as many studies have been conducted around the world and this type of columns is implemented in practice. Tubular glass columns consist of a single curved glass panel that has no edges with the exception of the top and bottom of the cylinder. Stacked glass columns consist of layers of glass plates, which are glued together or made using triplexing technology. Bundled glass columns consist of solid rods, which have a limited diameter, and glued together with different adhesives forming a complex but solid cross section, and cast columns have a solid body.

Sodium calcium silicate float glass is usually used in construction for load bearing structures. This glass is the most widely used. The method of its production was developed by the British company Pilkington in the 1950s, which revolutionized the glass industry.

Thus, the deformability and strength of the stacked glass columns were viewed in this research, because this type of columns has not been studied yet and there are no cases of implementation of such columns in practice. As float glass is the most common glass in construction, it was chosen for production.

The strength of the glass depended on the edge working. The edges that were not processed after cutting have microcracks (so-called Griffith defects), which significantly reduced the strength of the glass. When the edges were ground and polished, the microcracks were reduced to a minimum and the resulting glass strength became higher. For this reason, ground and polished float glass was used to make stacked glass columns.

The scientific literature overview on glass columns of different cross-section showed that scientists have revealed that glass has a high compressive strength, so these compressed glass columns usually fail due to loss of stability. Therefore, it is necessary to check their bearing capacity in this limit condition.

As a result of the review of open access and paid specifications and scientific publications, it can be stated that scientific research explaining the behaviour of glass columns has not yet been conducted in Ukraine. There are no technical specifications and recommendations for the design of such structures. Existing scientific research on stacked columns is not systemic. Therefore, a comprehensive fundamental study of compression of stacked glass columns will help solve a relevant problem.

The second chapter describes the designed and produced prototypes for experimental research. The developed procedure of their testing is presented.

In order to determine the load bearing capacity and deformability, we produced in manufacturing environments and patented glass columns with different cross-sections, different heights and made of ordinary, heat-strengthened and tempered glass by means of triplexing. EVASAFE film with thickness h = 0.38 mm connected layers of the glass h=10mm (Bridgestone, Japan). After that, the columns were heated at a temperature of

130 ºC and kept for 20-40 minutes in a special case. Glass columns were divided into eight series, following the program of experimental studies.

The developed method of testing glass columns consisted of the study of central compression of stacked glass columns under the static load and was protected by a patent.

For the first time, the optical method of two-dimensional correlation of digital images was used to measure the deformations of glass columns, which allowed us to obtain a full picture of the deformation of the structure from the beginning of the load to its destruction and reduce labour intensity. This method consisted in the analysis of the comparison of the displacements of the points on the surface of the column, before and after deformation. The displacement of points was recorded by a digital image at each load stage.

To determine the physical and mechanical properties of the glass from which the columns were made, we performed, according to the program of experimental studies, tests of 20 cubes and 20 compression prisms under static load, 30 plates for three-point bending and 12 developed and patented samples for the study of the adhesion of glass layers joined by different methods.

The probability statistical method based on Weibull's law of two-parameter distribution was used to analyse the compressive and tensile strength of the glass and modulus of elasticity.

The third chapter presents the results of pilot studies and their analysis. To evaluate the behaviour of glass columns during the tests, the graphs of the dependence of relative deformations on stresses were constructed for each of the series of experimental samples. The character of exhaustion of bearing capacity of columns made of ordinary, heat-strengthened and tempered glass is presented. Based on the results of the test analysis, it was concluded that all columns collapsed at the first limit state due to the loss of shape stability.

Based on the results of measuring the deformations of compressed glass columns using two-dimensional digital image correlation, it is recommended not to use this method in the study of central compression of glass columns, because two-dimensional digital image correlation does not take into account the displacement of the test specimen

in space along three axes, but this method clearly shows deformation of test specimen. It is recommended to measure deformations in the study of glass columns using three-dimensional correlation of digital images, because the columns are deformed in the direction of three axes in space, and two-dimensional digital image correlation measures deformations in only one plane, i.e., deformation along two axes.

Based on the results of glass cubes and prisms tests and by means of the statistical probabilistic data analysis (two-parameter Weibull distribution), we established the minimum value of the modulus of elasticity of ordinary glass and the characteristic prism, cubic compressive strength. The ratio of the prism and cubic strength of glass is $f_{ck,prism,5\%} = 0{,}72 f_{ck,cube,5\%}$. In addition, the Poisson's ratio is calculated.

As a result of pilot studies on three-point bending and using statistical probabilistic data analysis (two-parameter Weibull distribution), the real value of the modulus of elasticity and the characteristic tensile strength in bending of ordinary, heat-strengthened and tempered glass were established.

The results of experimental studies of the behaviour of different types of glass joints are presented. It was decided to use EVASAFE polymer film in glass columns made using triplexing in manufacturing environments, as it proved to be the most effective.

The fourth chapter presents two results of the calculation of bearing capacity of compressed glass elements, using the analytical and finite element methods. A comparative analysis of different calculation methods with the obtained experimental values is given. The developed recommendations for the design of stacked glass columns are presented.

The analytical method of calculation was based on the concept of effective thickness, the establishment of which is based on the results of the study of Wolfel-Bennison. In addition, to determine the design stability of stacked glass columns the Ayrton and Perry's theory was used.

The calculation of the critical force by the finite element method is performed using the RFEM software based on the concept of effective thickness (Wolfel-Bennison). The RFEM software package is designed for the calculation of load-bearing structures, dynamic analysis and mechanical engineering. It was developed by Dlubal. Additional

RF-STABILITY module was used in the calculations. This module allows us to calculate the rod and plate structures for stability. However, it allows us to find the value of the critical load only in the rod systems. Therefore, the column model is a rod. Due to the behaviour conditions of the sample, the model of the material behaviour is isotropic. Furthermore, the Lanczos algorithm was used to determine the methods of determining stability loss vectors. As a result of the calculation of the critical force by the method of finite stacked glass columns on the central-axial load with different fixing on the supports, we established in which plane the loss of stability and its shape will occur.

The results of the dissertation were applied in practice in the calculation and design of glass structures. This is confirmed by the acts of dissertation research implementation.

The practical significance and technical novelty are confirmed by three patents of Ukraine: "A glass column", Patent of Ukraine for utility model No.128990, E04C 3/30, E04B 1/18, E04B 1/28, E04H 15/34, E04H 15-60, application No. u201805969 dated 29.05.2018, published on 10.10.2018, bul. No.19 / 2018; "A method of glass column testing", Patent of Ukraine for utility model No.134878, G01N 3/10, application No.u201812746 from 21.12.2018, published 10.06.2019, bul. No.11; "A sample for plates adhesion testing", Patent of Ukraine for utility model No.140007, G01N 3/08, application No.u201905744 from 27.05.2019, published 10.02.2019, bul. No.3.

Keywords: glass cubes, glass prisms, stacked glass column, Weibull's law of two-parameter distribution, physical and mechanical properties of glass, digital image correlation, bearing capacity of glass columns.

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

Статті в наукових фахових виданнях України:

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

2. Surmai M., Tkach R., Analysis of strength and deformativity of glass plate joints under static loading, *Technology audit and production reserves*, № 2/1(52), 2020. P38-41. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.202735.

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

3. Демчина Б. Г., Сурмай М. І., Ткач Р. О., Експериментальне дослідження скляних багатошарових колон на центральний стиск, *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва.* Львів: НУЛП, 2018. №888. С52-58. (НМБД: Index Copernicus).

4. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О., Шидловський Я.М., Експериментальне дослідження багатошарових скляних колон квадратного перерізу, *Наука та будівництво, 4 (18)| 2018*, С74-80. (НМБД: Index Copernicus).

5. 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, CrossRef, Index Copernicus, Scilit та ін.).

6. Demchyna B., Surmai M., Tkach R., The experimental study of glass multilayer columns using digital image correlation, *Archives of Materials Science and Engineering* 96/1 (2019) 32-41. DOI:10.5604/01.3001.0013.1990. (НМБД: Scopus, Directory of Open Access Journals, Index Copernicus, Scirus та ін.).

Тези доповідей за темою дисертаційної роботи на міжнародних конференціях:

1. 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.

2. 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.

3. Surmai M., Tkach R., An analysis of experimental study of glass multilayer columns made of thermally strengthened glass, *Scientific Collection «InterConf»,* (39): with the Proceedings of the 8 th International Scientific and Practical Conference, Science and Practice: Implementation to Modern Society, December 26-28, 2020. Manchester, Great Britain, P1770-1773.

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

1. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О. (2018), «Скляна колона», Патент України на корисну модель №128990, E04C 3/30, E04B 1/18, E04B 1/28, E04H 15/34, E04H 15 -60, заява № u201805969 від 29.05.2018, опубліковано 10.10.2018, бюл. №19/2018.

2. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О. (2019), «Спосіб випробовування скляної колони», Патент України на корисну модель №134878, G01N 3/10, заява № u201812746 від 21.12.2018, опубліковано 10.06.2019, бюл. №11.

3. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О., Осадчук Т.Ю. (2020), «Зразок для випробування зчеплення пластин між собою», Патент України на корисну модель №140007, G01N 3/08, заява № u201905744 від 27.05.2019, опубліковано 10.02.2020, бюл. №3.

Відомості, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

Основні результати дисертаційної роботи були обговорені та оприлюднені на: 8-у міжнародному молодіжному науковому форумі "Litteris et Artibus" (м. Львів, 22-24 листопада 2018 р., НУЛП);

XVII міжнародній науковій конференції «Актуальні проблеми цивільної та екологічної інженерії» (м. Львів, 11-13 вересня 2019 р., НУЛП);

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

VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Science and practice: implementation to modern society» (м. Манчестер, Великобританія, 26-28 грудня 2020р.);

Наукових семінарах Національного університету «Львівська політехніка» кафедри «Будівельні конструкції та мости» (2017 – 2020 рр.).

ЗМІСТ

ВСТУП..... 19

РОЗДІЛ 1. ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СТАН НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ 25

1.1 Історія впровадження скла в будівництво..... 25

1.2 Фізико-механічні характеристики скла 28

1.3 Існуючі види та практичне застосування скляних стиснутих елементів 30

1.4 Сучасний стан дослідження напружено-деформованого стану скляних стиснутих елементів..... 41

1.5 Існуючі методи розрахунку стиснутих скляних елементів. 42

1.6 Висновки до розділу 1 46

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. МАТЕРІАЛИ ТА КОНСТРУКЦІЯ ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ..... 47

2.1 Обсяг експериментальних досліджень. 47

2.1.1 Дослідні зразки скляних багатошарових колон для дослідження на центральний стиск..... 47

2.1.2 Зразки для визначення фізико-механічних характеристик скла на стиск 51

2.1.3 Зразки для визначення фізико-механічних характеристик скла на розтяг при згині 53

2.1.4 Зразки для дослідження зчеплення скляних пластин між собою за дії статичного навантаження 55

2.2 Методики експериментальних досліджень 57

2.2.1 Методика випробовування стиснутих скляних колон..... 58

2.2.2 Методика вимірювання поздовжніх деформацій стиснутих скляних колон за допомогою методу двовимірної кореляції цифрових зображень (КЦЗ)..... 61

2.2.3 Методика випробовування міцності скла на стиск 67

2.2.4 Методика випробовувань міцності скла на розтяг при згині .. 70

2.2.5 Методика випробовування зчеплення скляних пластин між собою за дії статичного навантаження 73

2.2.6 Методика аналізу фізико-механічних характеристик скла, використовуючи ймовірнісно-статистичний метод, на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла 74

2.3 Висновки до розділу 2 76

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ 78

3.1 Несуча здатність та деформативність стиснутих скляних колон 78

3.1.1 Колони I серії 78

3.1.2 Колони II серії 81

3.1.3 Колони III серії 83

3.1.4 Колони IV серії 87

3.1.5 Колони V серії 90

3.1.6 Колони VI серії 93

3.1.7 Колони VII серії 95

3.1.8 Колони VIII серії 98

3.2 Аналіз результатів досліджень стиснутих скляних колон 100

3.3 Результати вимірювання поздовжніх деформацій стиснутих скляних колон за допомогою методу двовимірної кореляції цифрових зображень та їх аналіз 103

3.4 Фізико-механічні характеристики матеріалів стиснутих скляних колон 108

3.4.1 Результати випробовування міцності скла на стиск 108

3.4.2 Результати випробовувань міцності скла на розтяг при згині 112

3.4.3 Результати випробовування зчеплення скляних пластин між собою за дії статичного навантаження 119

3.5 Висновок до розділу 3 121

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ СКЛЯНИХ СТИСНУТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ З ПРОЕКТУВАННЯ 123

4.1 Методика розрахунку несучої здатності стиснутих скляних елементів 123

4.2 Порівняння результатів проведених теоретичних розрахунків з експериментальним дослідженням скляних стиснутих колон 136

4.3 Рекомендації щодо проектування скляних багатошарових колон ... 138

4.4 Висновки до розділу 4 139

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 140

ДОДАТОК А. Акти про впровадження результатів дисертаційних наукових досліджень 156

ДОДАТОК Б. Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1 159

ДОДАТОК В. Апробація результатів дисертаційного дослідження та список публікацій здобувача 208

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Скло, як несучий елемент, є інноваційним матеріалом у будівництві. Його особливістю є прозорість порівняно з іншими традиційними матеріалами, такими як бетон, сталь та деревина. У сучасній архітектурі через збільшення попиту на прозорість або напівпрозорість конструкцій, зросло використання скла у вигляді несучих конструкцій, як балки, плити, мости та колони. Окрім прозорості, скло має інші корисні властивості, такі як: міцність, мале водопоглинання та стабільні розміри при високих і низьких температурах. Дуже важливо знати ці характеристики, щоб використовувати скло у вигляді несучих конструкцій. Хоча скло є достатньо міцним матеріалом, воно дуже схильне до пошкоджень поверхні. Подряпини спричиняють певну втрату міцності, а це означає, що визначення фіксованих значень міцності скла є складним процесом. Більше того, міцність скла на стиск і розтяг суттєво відрізняється. Слабкість матеріалу полягає в його нездатності витримувати великі напруження при розтягуванні. Крихкість скла є основною причиною того, що воно ще не використовується як загальноприйнятий будівельний матеріал для елементів конструкції. Ця характеристика скла робить конструкцію небезпечною, оскільки призводить до миттєвого руйнування, що може спричинити непередбачувані ситуації.

Однак в даний час вчені докладають багато зусиль, щоб побудувати ще більше речей зі скла. Балки, плити та портали вже реалізовані. Скляні сходи в мерії Арнему, Нідерландах є прикладом того, де скло використовувалось як скляна плита. Інший приклад, коли скло використовувалось як несучий елемент, є збудований магазин «Apple» у Нью-Йорку, США. Стеля та стіни, а також балки були виготовлені зі скла, лише з'єднання виготовлялись з іншого матеріалу. Ця будівля показує, що більшість несучих елементів можна виготовити та запроектувати зі скла.

Архітектори та замовники загалом не люблять колони, тому що вони обмежують видимість, забирають простір. Проблему можна вирішити,

спроектувавши більш привабливу колону – скляну. Такі конструкції на сьогодні перебувають на початковій стадії досліджень.

Наукові дослідження, які б вивчали та пояснювали роботу скляних колон, досі в Україні не проводились. Відсутні норми та рекомендації щодо проектування таких конструкцій. Тому проведення комплексного фундаментального дослідження скляних багатошарових колон на центральний стиск допоможе вирішити актуальну проблему.

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

Об'єкт дослідження **–** несуча здатність та деформативність скляних багатошарових колон, що працюють на центральний стиск під дією статичного навантаження.

Предмет дослідження **–** скляні багатошарові колони різного поперечного перерізу, різної висоти та виготовлені із різного скла за допомогою триплексації.

Мета **–** встановити несучу здатність та деформативність скляних багатошарових колон різної гнучкості при центральному стиску.

Для реалізації поставленої мети необхідно:

- Провести експериментальне дослідження скляних багатошарових колон під дією статичного навантаження на центральний стиск з різними розрахунковими схемами відповідно до закріплення опор, а саме шарнірним та пружно-податливим закріпленням опор.
- Виконати аналіз отриманих результатів досліджень, визначити коефіцієнти розрахункової довжини колон в залежності від способів їх обпирання, виконати порівняння експериментальних та теоретичних результатів, отриманих за методикою ефективної товщини перерізу.
- Апробувати методику двовимірної кореляції цифрових зображень для визначення деформативних параметрів скляних багатошарових колон.

- Провести експериментальні дослідження з метою визначення реальних значень фізико-механічних характеристик різного типу скла, а саме звичайного, термозміцненого і гартованого.
- Розробити рекомендації з проектування скляних багатошарових колон, що працюють на центральний стиск та впровадити результати дослідження.

Методи дослідження: передбачено експериментальні випробування дослідних зразків скляних багатошарових колон на центральний стиск під дією статичного навантаження в лабораторних умовах, використовуючи сертифіковане обладнання, механічні та оптичні прилади за розробленою методикою. Статистичний аналіз отриманих даних з експериментальних досліджень та статистично-ймовірнісний аналіз за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла при визначенні значень фізико-механічних характеристик скла.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Отримано нові експериментальні дані несучої здатності та деформативності скляних багатошарових колон, виготовлених з різного скла (звичайне, термозміцнене, гартоване) при різному закріплені на опорах.
- Запропоновано методику та розміри дослідних зразків скла для визначення їх фізико-механічних характеристик, а саме кубової міцності скла та призмової міцності скла на стиск.
- Набула подальшого розвитку методика визначення деформативних характеристик скляних колон за допомогою методу кореляції цифрових зображень, а саме у підборі налаштування апаратного та програмного забезпечення.
- Вдосконалено методику розрахунку несучої здатності скляних багатошарових колон та запропоновано рекомендації щодо їх проектування, які були впроваджені під час проектування об’єктів на практиці.

Особистий внесок здобувача

Усі основні ідеї, розробки дисертаційної роботи та наукові результати одержані автором самостійно. У співавторстві автору належать публікації:

[4] – експериментальне дослідження скляних багатошарових колон на центральний стиск; [8] – визначення фізико-механічних властивостей скла на згин за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла; [10] – експериментальне дослідження багатошарових скляних колон квадратного перерізу; [53] – аналіз використання методу двовимірної кореляції цифрових зображень при дослідженні скляних колон; [54] – експериментальне дослідження скляних багатошарових колон з використанням кореляції цифрових зображень; [134] – аналіз міцності та деформативності з'єднань скляних пластин за дії статичного навантаження.

Апробація матеріалів дисертації

Основні результати дисертаційної роботи були обговорені та оприлюднені на 8-у міжнародному молодіжному науковому форумі "Litteris et Artibus" (м. Львів, 22-24 листопада 2018 р., НУЛП); XVII міжнародній науковій конференції «Актуальні проблеми цивільної та екологічної інженерії» (м. Львів, 11-13 вересня 2019 р., НУЛП); 9-му Міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus» (м. Львів, 21-23 листопада 2019 р., НУЛП); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Science and practice: implementation to modern society» (м. Манчестер, Великобританія, 26-28 грудня 2020р.); наукових семінарах Національного університету «Львівська політехніка» кафедри «Будівельні конструкції та мости» (2017 – 2020 рр.).

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота містить такі основні структурні елементи: титульний аркуш; анотація; зміст; вступ; основна частина, яка складається з чотирьох розділів; загальні висновки; список використаних джерел викладених на 14 аркушах та містить 149 найменувань, додатки викладені на 57 аркушах, анотація викладена на 14 аркушах. Загальна кількість аркушів дисертаційної роботи 212, з них основного тексту 126, рисунків 78, таблиць 20, рівнянь 29.

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

Дисертаційна робота на тему «Несуча здатність та деформативність скляних багатошарових колон» є складовою частиною наукових досліджень у лабораторії НДЛ-23 НУЛП у 2018-2020 роках за госпдоговором №849 від 26.02.2018 року (Замовник – ТОВ «Глас Трьош Львів», м. Львів).

Тема дисертації 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» (номер держреєстрації 0117U007366) дата затвердження на Вченій раді Інституту будівництва та інженерії довкілля - 17.06.2014, протокол № 10.

Практичне значення отриманих результатів полягає у застосуванні отриманих результатів досліджень при проектуванні скляних несучих конструкцій. Результати досліджень можуть бути застосовані в програмах навчальних курсів будівельних конструкцій для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» галузі знань 19 – архітектура та будівництво, а також в галузі будівництва.

Згідно з госпдоговором №849 від 26.02.2018 року були випробувані скляні багатошарові колони різних геометричних розмірів, з різною кількістю шарів скла при центральному стиску, для встановлення їх деформативності та несучої здатності і передані замовнику рекомендації з практичного застосування скляних колон в реальному будівництві.

Отримано акти про впровадження результатів досліджень (див. додаток А) при варіантному проектуванні: вертикальних несучих скляних багатошарових колон фасадного огородження вхідної групи у торгово-розважальному центрі «Форум» у Львові на вул. Під Дубом, 7Б та фасадної системи автосалону «Land Rover, Jaguar» у Києві, який розташовується за адресою: кільцева дорога, 1-А,

03134 від ТОВ «Склоресурс». В обох об’єктах були запроектовані скляні багатошарові колони, на противагу традиційним профільним системам, на які повинні були монтуватися вертикальні склопакети фасаду. Вони виконували огороджувальну функцію, сприймали вітрове навантаження та власну вагу; запроектовано дві скляні багатошарові колони висотою 2.81м та поперечним перерізом 70х30мм на вул. Сонячна, 4, м. Ямпіль Вінницької області, для реалізації концепції вхідної групи в аптеку №1 «Пігулка+» запропоновану архітектором від ПП «Ямпільтеплобудсервіс».

РОЗДІЛ 1. ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СТАН НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ

1.1 Історія впровадження скла в будівництво

Як найдавніший рукотворний матеріал людини, історія скла охопила понад 7 тисячоліть. В Єгипті було знайдено на сьогоднішній день найдавніше скло, у вигляді скляних намистин і посудини, датовані приблизно 5000 р. до н. е. Єгипетське мистецтво виробництва скла передалось через Олександрію в класичну Грецію та Римську імперію. За часів Римської імперії скло було введено в будівлі у вигляді добре відомої мозаїчної підлоги, але скло не було прозорим. Тільки після винаходу ручного видування в 1 столітті до нашої ери стало можливим виробництво прозорого скла [73, 82].

Скляна архітектура, як така, вперше почалася з англійської оранжереї 19 ст. Аж до цього часу віконне скло все ще формувалося ручним видуванням. Найвидатнішим прикладом цієї скляної архітектури був Кришталевий палац (рис. 1.1), розроблений сером Джозефом Пекстоном для виставки в 1851 в Лондоні. Було виготовлено 270 000 склопакетів «Palace of Industry for all Nations», кожен мав довжину 1220 мм, 254 мм ширину та товщину 2 мм, і всі вони були видуті вручну [82].

Рис. 1.1 Ілюстрація виставки в 1851 році м. Лондон [85]

Через глобальну енергетичну кризу 1970-х фахівці скляної галузі намагалися розробляти енергозберігаючі продукти, які б зменшили нагрівальні та охолоджувальні навантаження будівель. Результатом став розвиток нових скляних фасадів, які намагалися досягти поєднання всіх елементів теплоізоляції, затінення, природного освітлення та природної вентиляції [130]. Скляні фасади на парниках «Parc La Vilette» в Парижі (1980) – важливий етап у розвитку структурних скляних фасадів [114, 127].

Одне з перших застосувань скляних стін було в тимчасовій будівлі Бентема Краувеля в 1982 р. Експериментальний скляний будинок був розроблений на конкурс «Unusual Living» та побудований в Алмере. Три скляні стіни і одна сендвіч-панель (фанера та пінополіуретан) несуть сталевий дах. Скляні стіни зміцнені 15-міліметровими ребрами жорсткості, щоб впоратися з вітровими навантаженнями [82].

Після винаходів техніки промислового виробництва скла - Ніколауса де Нехоу (лите скло), Еміля Фурко, Едуард Ліббі та Майкл Оуенс, скло стало доступнішим і почало широко використовуватися в різних галузях [18, 73].

Існує кілька способів виробництва скла, залежно від бажаного кінцевого продукту, але всі методи виготовлення вимагають поєднання різної сировини та нагрівання до високих температур.

У будівництві, як правило, використовують натрієво-кальцієве силікатне флоат-скло для несучих конструкцій [25, 68, 89, 100, 106, 107, 109, 117].

Флоат-скло є найбільш широко застосовуваним склом. Його метод виробництва було розроблено британською компанією Pilkington в 1950-ті роки, яка зробила переворот у скляній промисловості. Даний метод забезпечує високу якість поверхні скла без будь-якої додаткової обробки. Загальний метод виробництва флоат-скла наведений на рис. 1.2. Скло подається при температурі близько 1050 ° С з плавильної ванни у флоат-ванну, де воно розливається тонкою стрічкою на поверхні рідкого олова. Це забезпечує листовому склу паралельність його сторін, плоскі поверхні і повну, без спотворень, прозорість. У флоат-ванні скло остигає до температури близько 600 ° С, при якій воно має достатню міцність

для того, щоб витягти його з олов'яної ванни і передати в піч відпалу і далі скло охолоджується для запобігання утворення залишкових напружень [78].

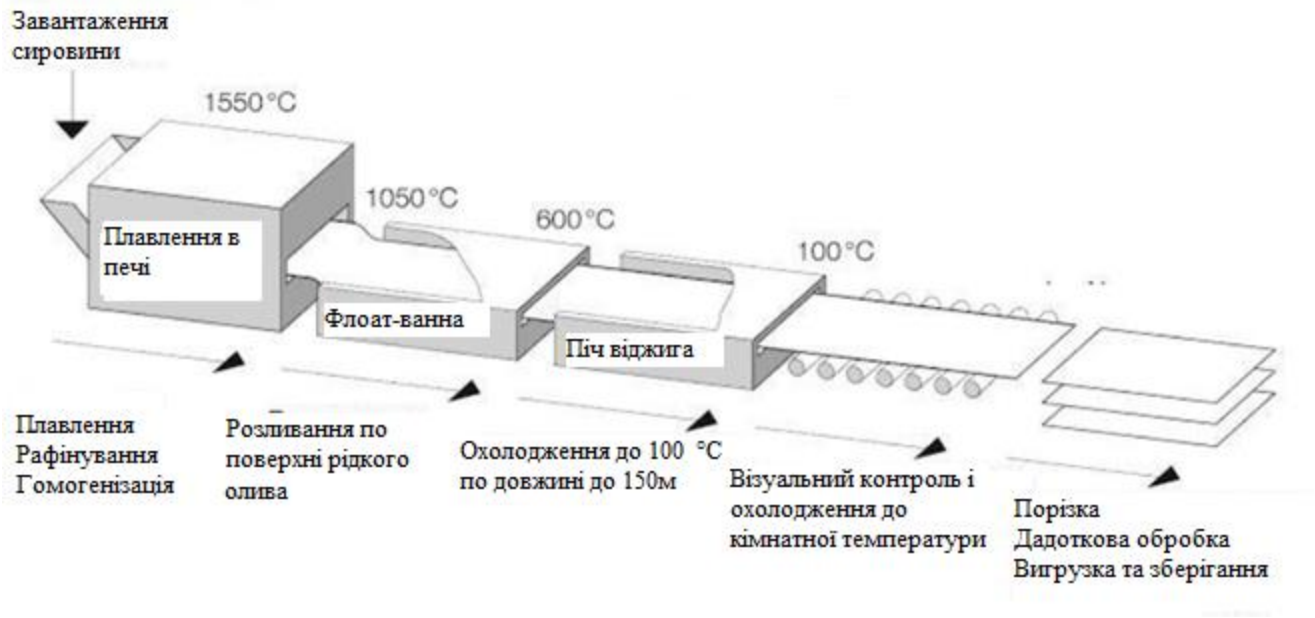


Рис. 1.2 Виробництво флоат-скла [78]

Зазвичай флоат-скло розрізають до стандартних розмірів листами 3,21 х 6,0 м [146]. Ширина та довжина флоат-скла обмежена розмірами виробничої лінії та транспорту. У Китаї виробляються листи довжиною до 25м. Однак це призводить до значно вищих виробничих витрат, крім цього необхідне особливе транспортування, щоб доставити ці великі панелі на об’єкт.

На ринку існують різні методи різання скла. На даний момент порізка струменем води під тиском (гідропорізка) - інноваційна технологія, яка є лише в деяких виробників в Україні. Дана технологія полягає в нагнітанні високого тиску води для утворення тонкого струменю, що розрізає скло. Перевагою цієї технології є низька температура, при якій відбувається порізка скла. Таким чином, процес різання матеріалу не змінює характеристик скла.

Оскільки найпоширенішим склом у будівництві є флоат-скло, його було обрано для виготовлення скляних багатошарових колон. З метою збереження первинних характеристик скла було здійснено гідропорізку при підготовці шарів скла, для виготовленння скляних багатошарових колон, дослідження деформативності та міцності яких наведено в даній роботі.

1.2 Фізико-механічні характеристики скла

Характеристики флоат-скла товщиною 10мм, з якого були виготовлені скляні багатошарові колони (від виробника) наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Характеристики флоат-скла

Назва	Пропуск світла τ_v, %	Відбивання світла		Індекс кольорової передачі R_a, %	Пропускання УФ променів τ_{uv}, %	Коефіцієнт затемнення q_i, %	Коефіцієнт теплопередачі U_g Вт/м^2 ·С
		Ззовні p_v, %	Зсередини p_v, %				
Флоат-скло	87,4	7,9	7,9	97,2	55,7	0,92	5,6
Розрахунки, терміни і умови прийняті на підставі EN 410: 2011 [63] і EN 673: 2011 [67] Значення характеристик, показаних вище, являють собою номінальні значення для центру скління, без урахування дистанційних рамок і / або профільних систем.							

Скло – це аморфний матеріал, який поводиться еластично до моменту руйнування. Цю еластичність можна пояснити його молекулярною структурою. Відсутність кристалічної решітки перешкоджає руху атомів, якщо ковалентний зв’язок між атомами порушений. Це забезпечує пластичність скла до моменту руйнування [144].

Для розрахунку конструкцій зі скла використовують типові загальновідомі фізико-механічні характеристики флоат-скла (листового скла), які наведено в табл. 1.2. та 1.3.

Таблиця 1.2.

Фізико-механічні характеристики звичайного флоат-скла (листового скла) відповідно до EN 572–1 [64]

Властивість	Позн.	Од.вим.	Значення
Густина (при t=18 ° C)	ρ	кг/м^3	2 500
Твердість (за Кнуппом) відповідно До ДСТУ ISO 9385	$HK_{0,1/20}$	ГПа	6
Модуль Юнга (модуль пружності)	E	МПа	70 000
Коефіцієнт Пуассона	μ	–	0,2
Середній температурний коефіцієнт лінійного розширення (в інтервалі температур від 20 ºС до 300 ºС)	α_T	x10^{-6} K^{-1}	9
Стійкість до перепадів температури і різкої зміни температур		К	40
Питома теплоємність	c	Дж/(кг·К)	720
Теплопровідність	λ	Вт/(м·К)	1
Середній коефіцієнт заломлення світла у видимій області спектра (при 589,3 нм)	n	–	1,5
Випромінювальна здатність (поправочний коефіцієнт випромінювальної здатності)	E	–	0,837

Таблиця 1.3.

Характеристична міцність на розтяг при згині відповідно до [121]

Флоат-скло		
Звичайне скло, МПа [64]	Термозміцнене, МПа [62]	Гартоване, МПа [58]
45	70	120

Як видно з табл. 1.2 та 1.3. властивості скла добре відомі, але його міцність дуже непередбачувана. Теоретично, скло – надзвичайно міцний матеріал. Теоретична міцність на розрив ідеального скла на основі молекулярної сили мала діапазон від 6000 Н / мм2 до 10000 Н / мм2, а теоретична міцність стиску ще більша [80]. Але через поверхневі подряпини та різні дефекти міцність скла різко зменшувалась. Тріщини, які не завжди видно оком, внаслідок циклічного навантаження зростали до своєї критичної довжини, і відбувалось руйнування скла. [129].

На рис. 1.3 наведено поведінку деформування скла в порівнянні з різними матеріалами. Як видно з графіка скло має пружну стадію деформування, аж до руйнування.

Рис. 1.3 Графік залежності відносних деформацій від напруження для матеріалів [96]: 1- сталь; 2 – скло; 3 – дерево.

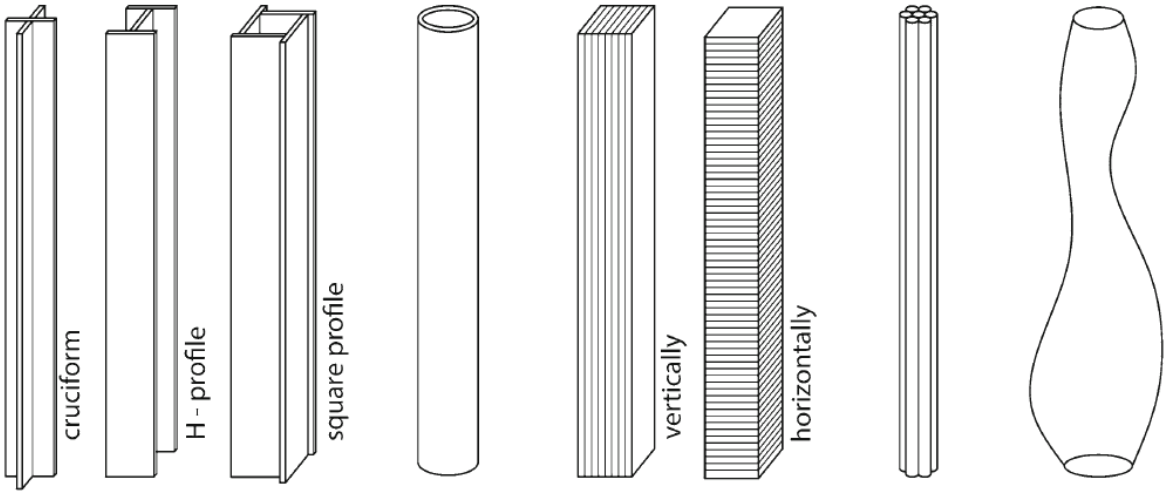
Міцність скла часто залежала від обробки поверхні його країв. Краї, які не оброблялися після різання, заповнені мікротріщинами (так звані дефекти Гріффіта), що серйозно знижували міцність скла [141, 143]. Коли краї шліфувалися та полірувалися, мікротріщини зменшились до мінімуму і результуюча міцність скла ставала вища. З цієї причини шліфоване та поліроване флоат-скло було використане для виготовлення скляних колон.

1.3 Існуючі види та практичне застосування скляних стиснутих елементів

Нійссе Р. та інш. [107] (2014) визначили п’ять категорій скляних стиснутих колон (рис. 1.4).

Профільні скляні колони складалися з прямокутних плоских панелей, з'єднаних за допомогою прозорого клею. Існують різні можливі конфігурації, такі як: хрестоподібний, Н-профіль, Т-профільні або квадратний профіль. Проводилися дослідження багатошарових скляних колон Т- і Х-подібної форми поперечного перерізу. Виявлено, що на поведінку конструкції сильно впливає зчеплення скла між собою, тому важливо приділяти увагу самому процесу виготовлення

конструкцій. Переріз Х-подібної форми є менш гнучким, хоча в обох варіантах руйнування відбувалося в результаті розриву на стику шарів скла [77].



а) б) в) г) д)

Рис. 1.4 П'ять різних типи всіх скляних колон відповідно до [107]:
а) профільні; б) трубчасті; в) багатошарові; г) пучкові; д) литі.

Скляна колона все ще перебуває на початковій стадії проектування порівняно до інших елементів конструкцій зі скла. Відомі кілька прикладів реалізації скляних колон.

Загалом відомі три приклади профільних скляних колон хрестоподібного перерізу, які реалізовані на практиці:

- ратуша в Сен-Жермен-ан-Ле, Франція (1994) (рис. 1.5) [92, 106];
- опори ліхтарів на площі Ринок в Геппінгені, Німеччина (2006) (рис. 1.6 а) [118];
- штаб-квартира «Danfoss» в Нордборзі, Данія (2009) (рис. 1.6 б) [123].

У Сен-Жермен-ан-Ле біля Парижа була побудована перша будівля зі скляними колонами (згідно з проведеним оглядом літератури). Хрестоподібні скляні колони несуть навантаження від скляного даху (рис. 1.5). Архітектори Бруне Дж. та Соньє Е. спроектували для нового Адміністративного центру місцевої ратуші скляний дворик. Адміністративний центр місцевої ратуші складався із скляного даху розміром 24х24м та сталевих балок, які обпираються на вісім скляних колон перерізом 220х220мм та висотою 3,2м [92, 106]. Скляні колони

складались із трьох елементів термозміцненого скла. Кожен елемент був виготовлений за допомогою триплексації із трьох шарів скла, центральний мав товщину 15мм крайні два – 10 мм. Максимальне навантаження, яке може сприйняти скляна колона, розраховано на 69 кН, але повномасштабне випробування довело, що граничне навантаження на колони становить 430 кН [92, 93].

На площі ринок в Геппінгені колона запроектована, щоб нести вагу від сонячної панелі розташованої над нею. Хрестоподібна колона загальною висотою 8,0 м складалась із основи з нержавіючої сталі 2,0 м та скляного елемента 6,0 м (рис. 1.6 а). В свою чергу скляний елемент був розділений на три сегменти, з'єднаних між собою металевими пластинами з нержавіючої сталі [118].

Інженери при будівництві головного штабу компанії «Danfoss» в Данії використовували хрестоподібну форму для скляних колон. Колони висотою 5,5 м і перетином 449х449 мм складалися з 3х-шарового термозміцненого скла (рис. 1.6 б). У ході випробувань було отримане граничне навантаження на колону в 575 кН [123].

Рис. 1.5 Ратуша в Сен-Жермен-ан-Ле, Франція [92]

а) б)

Рис. 1.6 Зображення реалізованих скляних колон: а) опори ліхтарів на площі Ринок в Геппінгені [118]; б) штаб-квартира «Danfoss» в Нордборзі [123].

Елайн Оуверкерк досліджувала скляні профільні колони [57]. Вона складала різні конфігурації перерізу з трьома або чотирма скляними пластинами довжиною 1000 мм, шириною 100 мм і товщиною 8 мм (рис. 1.7). Було виготовлено п'ять різних конфігурацій перерізу профільних скляних колон, які склеювали за допомогою клею з Araldite 2000 Plus 2013, який є двокомпонентним клеєм на основі епоксидної смоли. Ці п’ять конфігурацій випробовували на стиск під дією статичного навантаження [57].

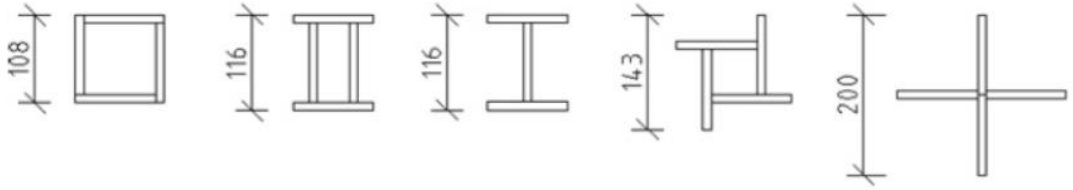


Рис. 1.7 П’ять конфігурацій профільних скляних колон у експериментальних дослідженнях Оуверкерк Е. [57]

Н-профільованої колони показали найбільшу несучу здатність у проведених експериментах, що склали 50,8 МПа.

Скляні трубчасті колони складались з однієї зігнутої скляної панелі, яка не має країв, крім верху і низу циліндра (рис. 1.4 б). У Лондоні Фостер та інші спроектували та реалізували в 2002 році громадський простір між двома новими будівлями (біля Tower of London). У двох будівлях розміщені офіси, ресторани та магазини, і їх з'єднує великий критий склом атріум. Атріум складається із скляного сітчастого фасаду довжиною понад 70 м, який не доходить до землі. Простір атріуму є публічним і доступний у будь-який час. Вітрові навантаження від фасаду передаються через "скляні голки" - боросилікатні трубки довжиною 3,56 м - до сталевих колон, що підтримують конструкцію даху (рис. 1.8).

а) б)

Рис. 1.8 Загальний вигляд «Tower Place»: а) фасаду [139]; б) «скляні голки» [132].

«Скляні голки» складались з несучої внутрішньої трубки та захисної зовнішньої трубки, в середині якої вставлений сталевий натяжний трос для збільшення несучої здатності та з'єднання з іншими елементами будівлі [23, 140]. Цей проект був першим будівельним проектом, для якого були використані стиснуті скляні трубчасті елементи. Однак у 1996 році Штутгарті, Німеччина, скляні трубки використовувались як елементи в скульптурі «tensegrity glass sculpture», яка була розроблена як студентський спільний проект між факультетом архітектури та будівництва в Університеті Штутгарта (рис. 1.9). Метою цієї конструкції було продемонструвати можливе застосування скла як несучого

матеріалу. Скульптура складалась із дванадцяти скляних трубок, які сприймали зусилля стиску та сталевих кабелів.

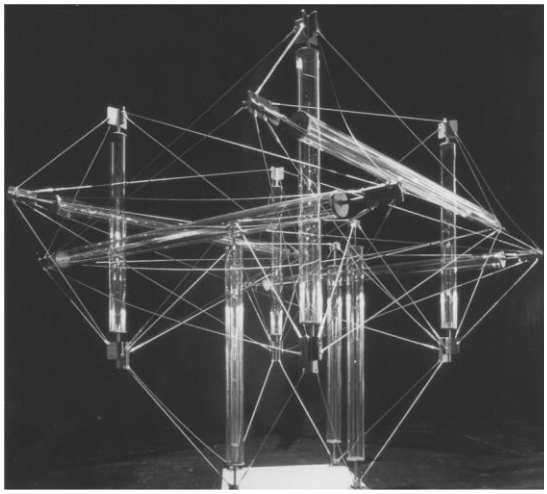
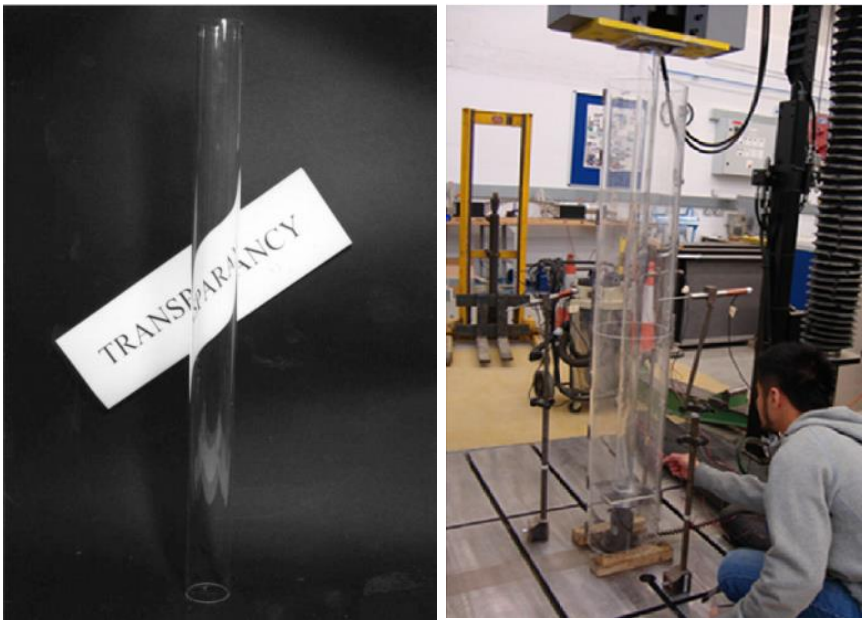


Рис. 1.9 Загальний вигляд «tensegrity glass sculpture» [37]

Крім цих двох прикладів застосування трубчастих елементів які працюють на стиск, провели експериментальні дослідження трубчастих скляних колон (рис. 1.10) ряд авторів [45, 56, 91, 105].



а) б)

Рис. 1.10 Трубчасті скляні колони: а) триплексована [142 с. 278]; б) клеєна [91 с.358]

Багатошарові скляні колони складались із шарів скла у вигляді пластин, які склеєні між собою чи виготовлені за допомогою триплексації. Шари скла різної або

однакової форми можна складати один на одного у вертикальному чи горизонтальному положенні, забезпечуючи високу несучу здатність (рис. 1.4 в). У цьому аспекті скляних колони практично не проводиться жодних досліджень та багато питань залишаються відкритими. Яка несуча здатність таких колон? Чи отримана структура все ще прозора? Який критичний вигин і т.д.

Як видно з рисунка (рис. 1.4 в), дві грані колони прозорі, а дві інші грані напівпрозорі. Однак цей ефект залежить від розмірів колон та типу скла. Якщо розміри скляної колони стають все більшими і більшими, вигляд через «прозору» грань стає зеленішим і зеленішим, а отже втрачається значна частина прозорості. Цей зелений відтінок є результатом домішок заліза, і тому скловиробництво розвинуло спеціально низькозалізне скло, яке безбарвне. Однак прозорість - не єдина причина вибору скла в якості матеріалу колон. Архітектори використовують скло не лише тому, що воно прозоре, а тому, що скло грає зі світлом. Воно завжди буде мерехтіти, сяяти, відбивати світло. Саме це робить скло цікавим матеріалом. Крім того, завдяки даному методу із скла можна виготовити всі типи фігур за рахунок відмінностей в окремих шарах скла або обертанням шарів по відношенню один до одного. Ця концепція веде до нескінченності можливостей, і цей ефект був використаний у різних скульптурах (рис. 1.11) [44, 83, 148].

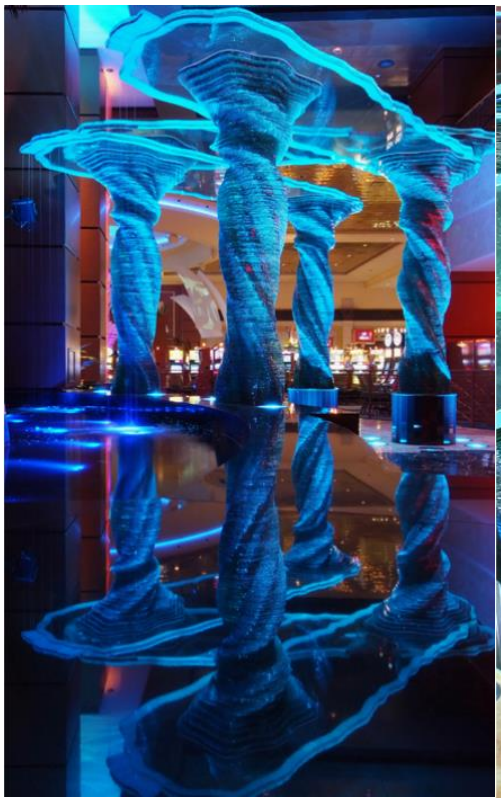
а)

б)

в) г)

Рис. 1.11 Загальний вигляд скульптур зі скла: а) «De Glazen Engel (Archangel Michael)» [131]; б) «The Glass Sphinx» [88]; в) «The National Police Memorial» [104]; г) «The National Police Memorial» [103].

Також у Флориді США архітектором Кері Джонс та інженером Малішев Вільсон було спроектовано та реалізовано у 2003 році в казино «Pompano Park» дев'ять скляних багатошарових колон висотою 3,5м «The Pompano Park water feature» (рис. 1.8) [86].



а) б)

Рис. 1.12 Загальний вигляд «The Pompano Park water feature»: а) [119]; б) [120]

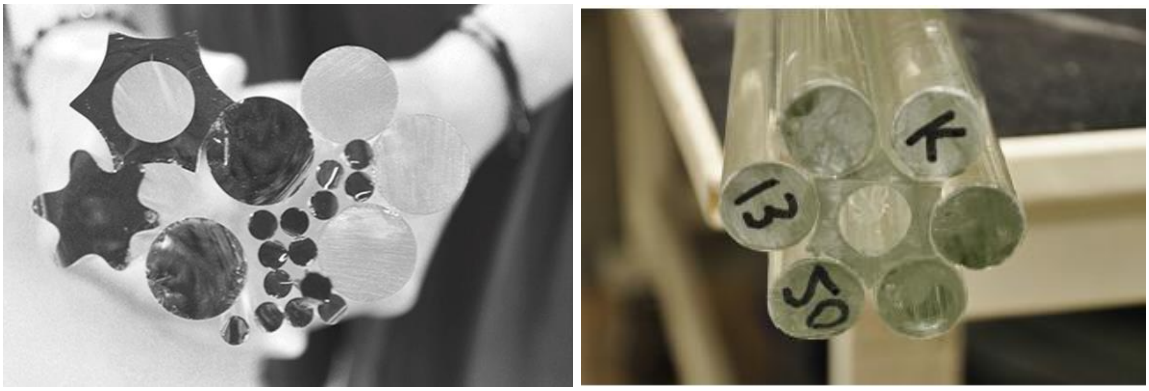
Скляні колони складались із шарів скла товщиною 10мм, які підтримували ряд мостових елементів із багатошарового скла, що несли тонкий шар води. Вода транспортувалась по трубі з нержавіючої сталі в центрі скляних колон (рис. 1.8 б) після чого розливається по вершині до країв, де каскадом опускалася вниз, як водоспад до штучного басейну.

Загалом було використано 3150 елементів шарів скла, в результаті чого вийшла конструкція загальною вагою 55 тон.

Фелеков [71] дослідив скляну колону, яка складалась з литої скляної цегли, скріплених УФ клеєм. Akerboom [22] дослідив колону, що складалася з круглих шарів скла із сухими прошарками між ними. Під час випробування стався збій та зроблений висновок, що збій стався через погані кінцеві з'єднання скляної колони, що ускладнює точне визначення міцності колони.

Пучкові скляні колони складалися із цільних стержнів, які мають обмежений діаметр, та склеєні між собою за допомогою різних клеїв, утворюючи складний, але цільний переріз. Вченими [109, 110] було досліджено пучкові скляні колони, які складались зі семи суцільних стержнів круглого перерізу з серії DURAN® від «Schott» склеєні між собою за допомогою УФ клею (рис. 1.13 та рис. 1.14). Ці стандартизовані профілі з екстрагованого боросилікатного скла, 1500 мм в довжину, з діаметром від 3 (± 0,14) до 30 (± 0,80) мм [128]. Також була запропонована нова конфігурація, що складається з центральної западини зіркоподібний профіль CONTURAX® та шість зовнішніх стержнів DURAN®. Профіль CONTURAX® доступний лише у продажу з 17 (± 2,00) мм внутрішніми та 30 (± 2,00) мм зовнішнім діаметром [128].

Рис. 1.13 Загальний вигляд пучкових скляних колон при проведенні дослідження з різним закріпленням на кінцях [110 с.13]



а) б)

Рис. 1.14 Вигляд перерізу пучкових скляних колон [110 с.5]: а) вигляд профілів CONTURAX® і DURAN®; б) Виконана конфігурація скляної колони з профілів CONTURAX® і DURAN®;

Скляні пучкові елементи використовуються не лише як колони, але як стержні, які працюють на розтяг та на стиск для ферм (рис. 1.15).

а)

б)

Рис. 1.15 Загальний вигляд: а) «Glass Truss Bridge» [79]; б) розпірка мосту виготовлена зі скляної трубки DURAN®. [138].

Литі скляні колони практично не досліджувались, оскільки виробництво таких колон дуже складне, трудомістке та затратне (згідно з проведеним мною оглядом літератури). Виготовлення такої колони вимагало б тривалого і контрольованого процесу охолодження, щоб впровадити цей тип колон у будівництво. Крім того, великі литі елементи буде дорого замінити у разі їх пошкодження. Залишаються відкритими багато питань, таких як: до яких розмірів можна лити скло у форму? Яка несуча здатність литого скла? Хоча академічні дослідження монолітної литої колони не проводились, але з литого скла виготовляють скульптури, ювелірні вироби та твори мистецтва лиття скла.

Отже, відповідно до проведеного аналізу літератури у даній роботі було досліджено несучу здатність та деформативність скляних багатошарових колон з вертикальним розташуванням шарів. Оскільки, була присутня можливість даного типу колон виготовлення у виробничих умовах, що забезпечують велику геометричну точність таких конструкцій, та й сам процес виробництва скляних багатошарових колон доволі простий, у порівнянні з іншими видами колон. Також,

даний вид стиснутих елементів практично не досліджувався, що обумовлює відсутність прикладів реалізації таких колон на практиці.

1.4 Сучасний стан дослідження напружено-деформованого стану скляних стиснутих елементів

Розпочали проводити академічні дослідження та вивчати роботу скляних стиснутих елементів кілька десятиліть назад, оскільки скло є крихким матеріалом і довгий час його ніхто не розглядав як несучий елемент. Зокрема дослідженнями скляних колони займалися наступні автори: Амадіо С. [25, 26, 27], Бедон С. [35, 36], Халдіман М. [81], Луібле А. [98, 99, 100], Форабоші П. [72], Аєлло С. [21], Фельдман М. [69, 70], Ойкономопулу Ф. [108, 109, 110, 111] та багато інших.

Велику увагу приділено дослідженню стиснутих скляних елементів чеськими вченими Каламар Р. та інш. [89], які зробили висновки про суттєві відмінності аналітичних розрахунків та експериментальних досліджень скляних колон. Теоретичні результати виявилися занадто завищені, оскільки в них не можна було врахувати наслідки різних дефектів і вплив клейового з'єднання скла. Також, проводилися випробування колон квадратного перерізу. Конструкція скляної колони була виконана з термозміцненого скла товщиною 6мм, перерізом 150х150 мм і висотою 1,75м. Навантаження колон здійснювалося через поліамідну прокладку та сталеві башмаки. Швидкість навантаження становила 50 Н/с. Перші тріщини з'явилися при 75кН, руйнування наступило при 168кН. У всіх випадках перші тріщини з’являлись біля сталевих опор. Середня залишкова несуча здатність склала 51 кН [90].

У публікації [117] було проведено дослідження стиснуто-зігнутої скляної колони із осьовим та поперечним навантаженням, виготовлених із структурного (багатошарового) скла. У рамках дослідження було випробувано 9 зразків. Усі вони мали однакову геометрію (довжина 2000 мм, ширина 200 мм і товщина 16 мм), але виконані із загартованого скла, термозміцненого, та шари скла були склеєні між собою плівкою PVB або EVASAFE. Максимальне навантаження, досягнуте під час випробувань, було прийнято як згинально-поперечно-крутильну силу вигину.

Також, було запропоновано умову надійності конструкції скляних колон за попередніми експериментальними програмами.

У дослідженнях науковців з Китаю [95] було проведено випробування дванадцяти скляних багатошарових колон висотою 2,7м з різною кількістю шарів скла та різного матеріалу прошарку між ними на осьове статичне навантаження та зміною температури середовища. Представлені результати експериментальних досліджень та проведений чисельний розрахунок скляних колон. Досліджувані параметри включають тип прошарку, кількість шарів скла, коефіцієнт податливості, тривалість навантаження та температуру навколишнього середовища. За допомогою формули Айртона-Перрі [33] запропоновані криві вигину для скляних колон, що несуть різні осьові навантаження та температурні умови. Також на основі чисельного аналізу розроблена крива проектного вигину для колон з гартованого скла, що піддавали навантаженням (10 років) при температурі навколишнього середовища до 50 С.

Отже, результати досліджень скляних колон мали несистемний характер та все ще перебували на початковій стадії проектування порівняно з іншими елементами конструкцій зі скла (балок, плит). Залишились відкриті питання, такі як: реальна несуча здатність стиснутих елементів, яка їх деформативність, які критерії для визначення граничних станів скляних колон, чітка методика розрахунку таких конструкцій. Тому у даній роботі було досліджено скляні багатошарові колони.

1.5 Існуючі методи розрахунку стиснутих скляних елементів.

За результатами дослідження скляних колон різного перерізу різними вченими [25, 26, 27, 35, 38, 84, 115, 116, 117, 125] було виявлено, оскільки скло має велику міцність на стиск, тому ці скляні стиснуті колони, як правило, виходять з ладу через втрату стійкості і тому необхідно перевіряти їхню несучу здатність за цим граничним станом.

Аналітичний аналіз стійкості монолітних скляних колон, як правило, здійснюється за допомогою класичних доступних методів розрахунку для

перевірки конструкцій колон зі сталі, дерева, бетону під осьовими навантаженнями, згідно європейських норм [47, 48, 49] та українських норм [1, 2, 3]. Однак для багатошарових скляних колон вище описані методики не підходять, оскільки в колоні присутні напруження зсуву між шарами, які мають бути ретельно враховані.

Для того, щоб здійснити раціональну перевірку викривлення багатошарових стиснених елементів, згідно з підходом до проектування граничного стану, а саме втрати стійкості, має бути виконано кілька умов, щоб гарантувати відповідні рівні стійкості, справності та довговічності. Для цього можна використати розрахунок на основі концепції ефективної товщини, згідно [32, 50], формулювання якого сформовано за результатами оригінальної роботи Вольфеля-Беннісона [41, 147].

Відповідно до [50] ефективна товщина для розрахунку вигину колони становить:

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{h_1^3 + h_i^3 + 12\Gamma I_s} \tag{1.1}$$

де, h_1, h_i - товщина шарів скла (1.5) [50, с.179], Γ – коефіцієнт зсуву, який розраховується за формулою (1.2), I_s – момент інерції на одиницю довжини, що використовується для розрахунку фактичної товщини з багатошарового скла та визначається за формулою (1.3).

Дане формулювання ґрунтується на оригінальному підході Вольфеля [147], пізніше розроблене Беннісоном та Стельцером [41, 46] також згаданий в американському стандарті ASTM-E1300 [32], спирається на кілька припущень, які обговорюються більш докладно у [74].

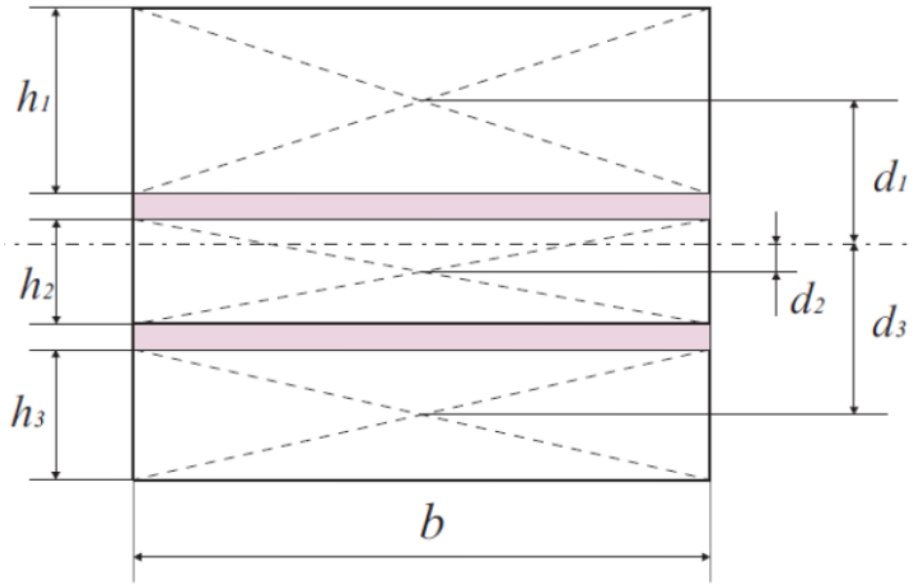


Рис. 1.16 Представлення геометрії багатошарового скляного елемента згідно з [50, с.179]

Згідно з оригінальною моделлю Вольфеля [50, 147], коефіцієнт зсуву «Г», який спочатку запропонований Волфелем у 1987 році для аналізу просто підкріплених сендвіч-балок, яким піддавали поперечного навантаження, визначається як:

$$\Gamma = \frac{1}{1+9.6\dfrac{h_{\text{int}} EI_s}{G_{\text{int}} l^2 d^2}} \tag{1.2}$$

де, h_{int} – товщина полімерної плівки прошарку; $d = d_1 + d_2 + d_i$, де d_i - відстань центру ваги шару скла до геометричного центру ваги багатошарового перерізу, (див. рис. 1.5), l-довжина колони; E- модуль пружності скла (модуль Юнга), G_{int} - модуль зсуву полімерної плівки прошарку в багатошаровому склі.

Момент інерції на одиницю довжини, що використовується для розрахунку фактичної товщини з багатошарового скла визначається:

$$I_s = \frac{h_1 + h_2 + h_i}{h_1 h_2 h_i} d^2 \tag{1.3}$$

Також, Амадіо та Бедон у 2011 році [26] запропонували аналітичне дослідження перевірки максимального розрахункового осьового навантаження та відповідних деформацій, за яким була розроблена оригінальна теорія за відповідними припущеннями:

• безперервність зсувного зв'язку між взаємодіючими елементами по довжині колони;

• пряма пропорційність ковзання, дозволеного зсувним з'єднанням з інтенсивністю переданої сили;

• лінійний розподіл деформацій по всій глибині взаємодіючих шарів;

• рівні прогини взаємопов'язаних шарів по довжині променя.

Кілька авторів запропонували значення параметрів α_{imp} та α_0 - параметри кривих вигину ЕС - Амадіо та Бедон [25, 26, 27] або Халдіман [81], що становлять α_{imp} = 0,71 та α_0 = 0,60 (рис. 1.17) [28, 69, 50], отримані за допомогою калібрування результатів випробувань, доступних в літературі для скляних колон [21, 70, 72, 100] з числовими прогнозами.

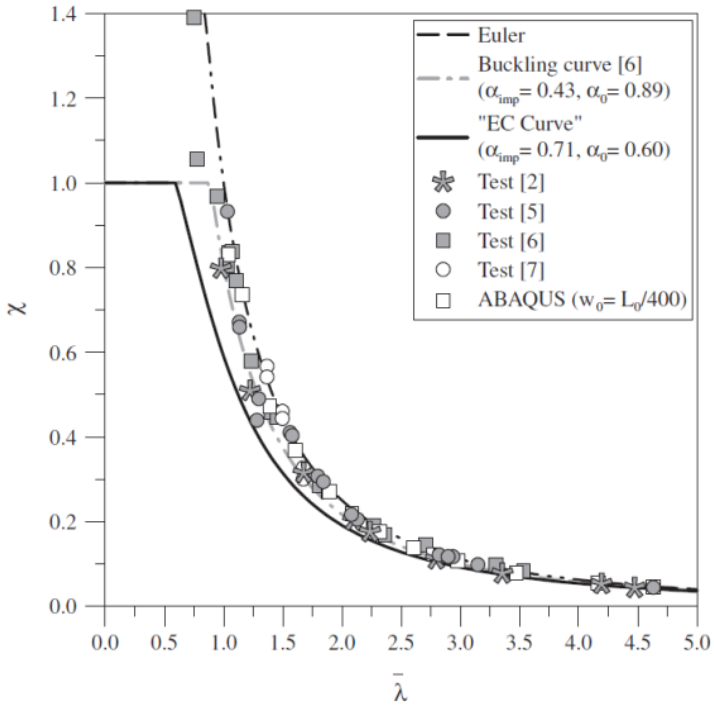


Рис. 1.17 Параметри кривих вигину «крива ЕС» для монолітних та багатошарових скляних колон. Числові та експериментальні порівняння [2,5–7], згідно [27 с. 222]

Побудована «Крива ЕС» рис. 1.17 згідно з [27 с.222]. На ній посилаються на результати випробувань до монолітних [21, 70, 97] або 2-шарових багатошарових скляних колон [97,72], які мають різні фізико-механічні властивості (тип скла, тип і жорсткість прошарків тощо), геометричні параметри. Також, чисельні результати отримані з нелінійного приросту моделювання, яке виконане в ABAQUS / Standard [20] на монолітних скляних колонах.

У дослідженнях С. Дж. Беннісона [39, 40], Т.Ю. Осадчука [18] та у розрахунку різних скляних конструкцій [39, 40, 68, 74, 75] представлені інші моделі «ефективної товщини».

Методика розрахунку напружено-деформованого стану скляних стиснутих елементів виконувалася не лише за допомогою аналітичних розрахунків, але і за допомогою чисельного моделювання напружено-деформованого стану скляних стиснутих елементів. Розрахунки представлені у роботах [18, 24, 34, 39, 40, 126] за допомогою методу кінцевих елементів.

1.6 Висновки до розділу 1

1. Відповідно до проведено аналізу літератури та фізико-механічних характеристик скла для виготовлення багатошарових колон обрано флоат-скло.
2. Згідно з проведеним аналізом вільнодоступної та закритої літератури скляні колони все ще перебувають на початковій стадії досліджень та проектування порівняно з іншими елементами конструкцій зі скла. Проте відомі приклади успішних застосувань скляних колон.
3. Вченими було встановлено, що скло має велику міцність на стиск, проте, як правило, колони виходять з ладу через втрату стійкості і тому необхідно перевіряти їхню несучу здатність за цим можливим граничним станом.
4. На даний час не розроблено норм, правил проектування та розрахунку скляних багатошарових колон. Наявний стан дослідження даної тематики не є достатньо детально опрацьований та не носить системний характер. Виникає потреба у проведенні дороговартісних експериментальних досліджень даних конструкцій.

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

2.1 Обсяг експериментальних досліджень.

Для досягнення поставленої мети та виконання поставлених завдань було проведено натурні експериментальні дослідження стиснутих скляних колон на центральний стиск під дією короткочасного статичного навантаження. Для матеріалів, з яких були виготовлені стиснуті скляні колони, було визначено фізико-механічні характеристики та досліджено роботу різних видів з'єднань шарів скла.

2.1.1 Дослідні зразки скляних багатошарових колон для дослідження на центральний стиск

Для проведення експериментальних досліджень на центральний стиск було запроектовано та виготовлено стиснуті скляні колони у заводських умовах фірмою ТзОВ «Склоресурс» та ТОВ «Глас Трьош Львів» (госпдоговір №849) у кількості двадцять один дослідний зразок.

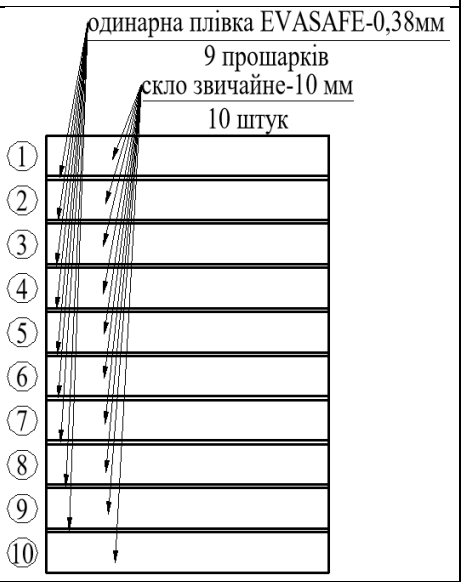
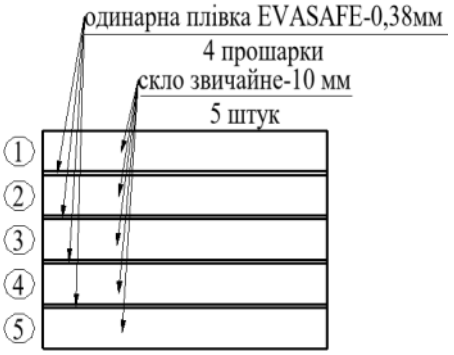
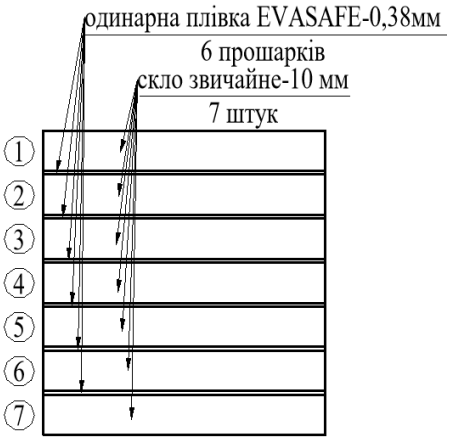
Всі дослідні зразки виготовлені за технологією триплексації. Між кожним шаром скла товщиною h=10мм вкладали одну полімерну плівку марки EVASAFE товщиною h_{int}=0.38мм (Bridgestone, Японія). Після цього колони нагрівались за температури 130 ºС і витримувались 30 хв у спеціальній камері.

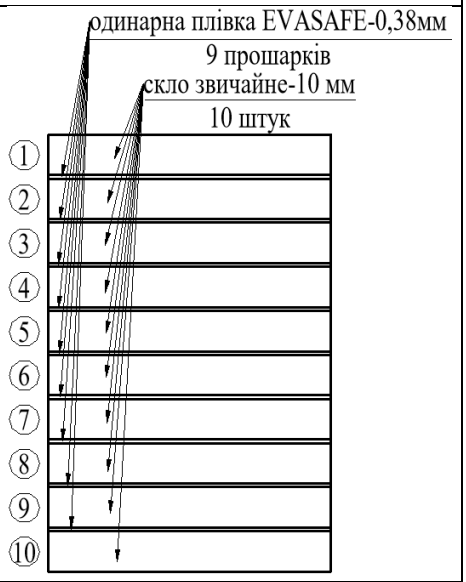
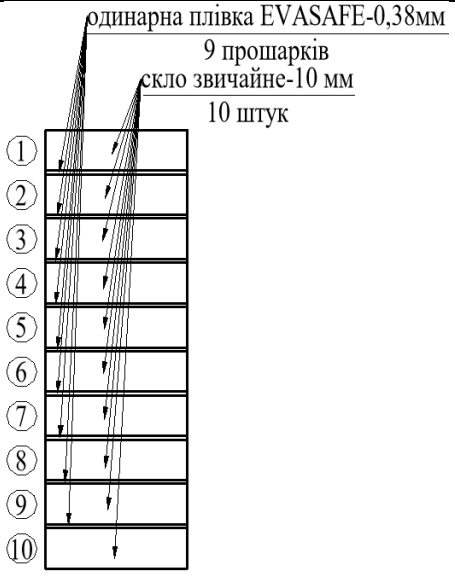
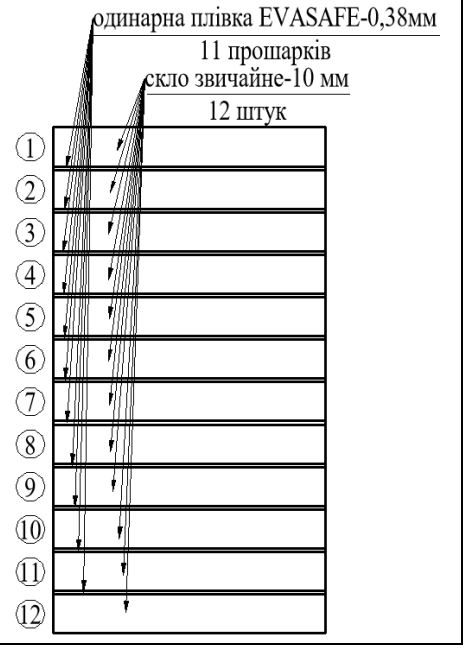
Дослідні зразки були поділені на вісім серій відповідно до програми експериментальних досліджень, наведеної в табл.2. 1, в залежності до типу скла, виготовлених колон та їх гнучкості.

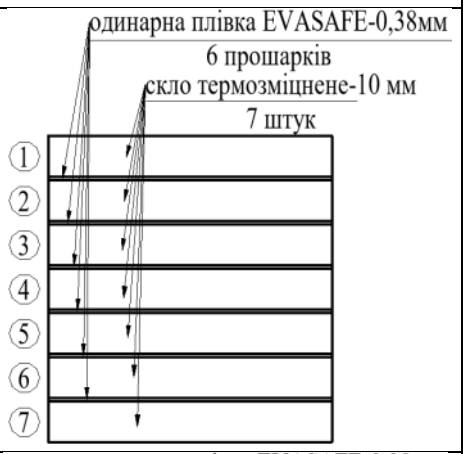
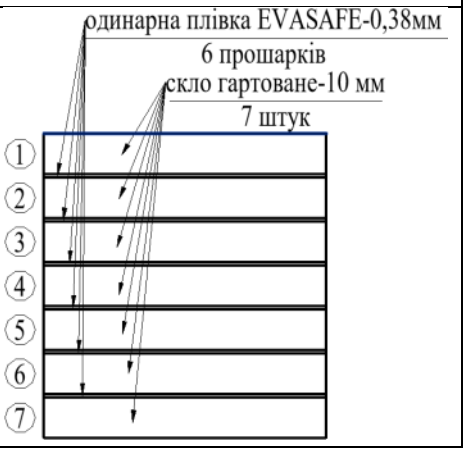
Кожна скляна колона замаркована індивідуальним шифром, який включає в себе буквене та цифрове позначення дослідного зразка. Шифр скляної колони включає в себе наступні позначення: КС-колона скляна; перша цифра- номер серії; друга цифра-номер дослідного зразку; третя цифра – тип закріплення (1-пружно-податливе закріплення опор; 2-шарнірне закріплення опор). Для прикладу марка КС-5.2.2, означає – колона скляна, п'ятої серії, другий дослідний зразок, шарнірно закріплений на опорах.

Табл.2. 1

Програма експериментальних випробувань

№	Серія	Марка колони	Переріз, мм	Висота, мм	Площа поперечного перерізу, см^2	Конструкція скляних колон
1	2	3	4	5	6	7
1	I	КС-1.1.1	100х70	1000	70	
2		КС-1.2.1				
3	II	КС-2.1.1	50х70		35	
4		КС-2.2.1				
5	III	КС-3.1.1	70х70	900	49	
6		КС-3.2.1				
7		КС-3.3.2				
8		КС-3.4.2				

1	2	3	4	5	6	7
9	IV	КС-4.1.2	100х70	900	70	
10		КС-4.2.2				
11		КС-4.3.2				
12		КС-4.4.2				
13	V	КС-5.1.2	100 х35		35	
14		КС-5.2.2				
15	VI	КС-6.1.1	120х70	1000	84	
16		КС-6.2.1				

1	2	3	4	5	6	7
17	VII	КС-7.1.1	70x70	900	49	
18		КС-7.2.1				
19		КС-7.3.1				
20	VIII	КС-8.1.1				
21		КС-8.2.1				

Колони серій I … VI виготовлялись з шарів звичайного листового скла, товщиною по 10 мм кожен, ламінованих між собою одинарною полімерною плівкою товщиною h_{int}-0.38мм.

Колони серій VII виготовлялись із семи шарів термозміцненого листового скла, товщиною по 10 мм кожен, ламінованих між собою одинарною полімерною плівкою товщиною h_{int}-0.38мм.

Колони серій VIII виготовлялись із семи шарів гартованого листового скла, товщиною по 10 мм кожен, ламінованих між собою одинарною полімерною плівкою товщиною h_{int}-0.38мм.

На запропоновану конструкцію скляних багатошарових колон серії I-VIII отримано патент України на корисну модель [6].

Скляні багатошарові колони виготовлялися у м. Дубно, Рівненська обл. ТзОВ «Склоресурс» та у м. Львові ТОВ «Глас Трьош Львів» (госпдоговір №849).

2.1.2 Зразки для визначення фізико-механічних характеристик скла на стиск

Для визначення реальних значень міцності скла на стиск при статичному навантаженні з постійною швидкістю зростання було виготовлено 20 контрольних скляних кубів номінальним розміром 30х30х30мм та 20 скляних призм розміром 30х30х60мм (рис. 2.1).

Рис. 2.1. Загальний вигляд дослідних зразків, які випробовуються на стиск

Для виготовлення кубів та призм було виготовлено металеві форми (рис. 2.2), в які у виробничих умовах було налите звичайне листове скло.

Рис. 2.2. Металеві форми для виготовлення кубів та призм

Після остигання дослідних зразків було виміряно їх геометричні розміри з точністю до 0,01мм.(табл.2. 2).

Табл.2. 2

Геометричні характеристики дослідних зразків

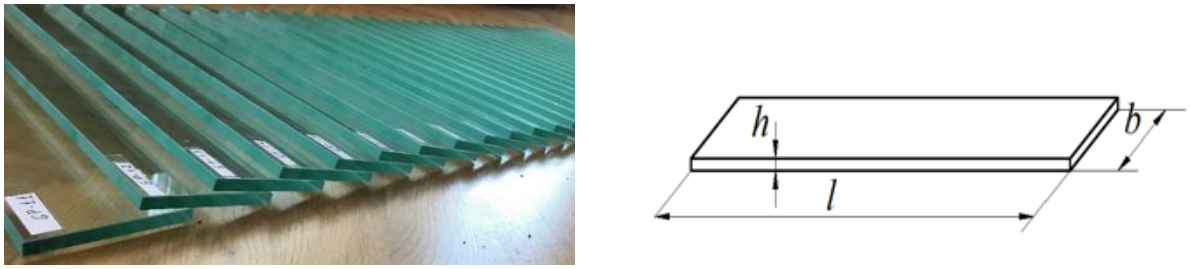
Серія	Марка	Довжина (l), мм	Ширина (b), мм Висота (h), мм	Висота (h), мм
1	2	3	4	5
I	К-1	31.72	29.73	29.51

1	2	3	4	5
I	К-2	31.82	29.85	29,53
	К-3	30.44	29.72	29.62
	К-4	29.52	29.63	31.84
	К-5	29.63	29.89	30.2
	К-6	29.69	29.39	29.58
	К-7	29.69	29.79	31.91
	К-8	29.59	29.89	29.53
	К-9	29.49	29.88	29.39
	К-10	29.62	29.68	29.59
	К-11	29.51	29.51	29.51
	К-12	29.25	29.25	29.25
	К-13	29.5	29.5	29.5
	К-14	30.5	30.5	30.5
	К-15	29.5	29.5	29.5
	К-16	32.25	32.25	32.25
	К-17	29.1	29.1	29.1
	К-18	29.5	29.5	29.5
	К-19	29.51	29.51	29.51
	К-20	31.12	31.18	31.17
II	П-1	29.58	29.59	60.85
	П-2	29.49	29.49	59.35
	П-3	29.49	29.68	60.91
	П-4	29.49	29.58	59.89
	П-5	29.59	29.48	59.57
	П-6	29.52	29.63	61.44
	П-7	29.48	29.51	60.52
	П-8	29.44	29.58	60.54
	П-9	29.44	29.44	59.78
	П-10	29.42	29.67	60.91
	П-11	29.54	30.01	60.02
	П-12	29.56	29.68	59.35
	П-13	29.99	29.58	60.91
	П-14	29.58	29.48	60.54
	П-15	29.57	29.5	59.78
	П-16	29.69	30.5	60.3
	П-17	29.69	29.5	59.52
	П-18	29.18	29.39	59.46
	П-19	29.27	29.79	59.21
	П-20	29.59	29.89	59.86

Всі дослідні зразки були поміщені за 24 години до випробування в умови проведення експерименту.

2.1.3 Зразки для визначення фізико-механічних характеристик скла на розтяг при згині

Для проведення дослідження було спроектовано та виготовлено три серії дослідних зразків, кожна з яких складалася з десяти однакових зразків (рис. 2.3).



а) б)

Рис. 2.3. Дослідні зразки

а) загальний вигляд дослідних зразків; б) геометрія дослідних зразків.

Характеристика усіх зразків скла представлені в табл. 2.4. Ширину, довжину та висоту вимірювали відповідно до розділу 7.1 стандарту EN 1288-3: 2000 [23]. Ці параметри визначались як середнє арифметичне принаймні з трьох індивідуальних вимірювань. Ширину, довжину та висоту визначали як середнє арифметичне, принаймні з чотирьох індивідуальних вимірювань з точністю до 0,05 мм.

Табл.2. 3

Характеристики дослідних зразків

Серія	Марка	Довжина (l), мм	Висота (h), мм	Ширина (b), мм	Вид скла
1	2	3	4	5	6
I	GP-1.1	500,05	10	99,85	Звичайне листове скло
	GP-1.2	500,15		99,90	
	GP-1.3	500,10		99,90	
	GP-1.4	500,05		99,95	

1	2	3	4	5	6
I	GP-1.5	500,20	10	100	Звичайне листове скло
	GP-1.6	500,10		99,90	
	GP-1.7	500,05		100,05	
	GP-1.8	500,10		100,05	
	GP-1.9	500,05		101,05	
	GP-1.10	500,15		100,05	
II	GP-2.1	500,05		99,85	Термозміцнене листове скло
	GP-2.2	500,10		99,90	
	GP-2.3	500,05		99,90	
	GP-2.4	501,05		100,05	
	GP-2.5	500,15		100,05	
	GP-2.6	500,25		99,90	
	GP-2.7	500,05		100,05	
	GP-2.8	500,05		100,10	
	GP-2.9	500,05		99,95	
	GP-2.10	500,10		100,05	
III	GP-3.1	500,05		99,90	Гартоване листове скло
	GP-3.2	501,05		100,10	
	GP-3.3	500,10		100,05	
	GP-3.4	500,05		100,15	
	GP-3.5	501,05		100,05	
	GP-3.6	500,10		99,85	
	GP-3.7	500,10		100,05	
	GP-3.8	500,15		99,90	
	GP-3.9	500,10		100,10	
	GP-3.10	500,10		100,10	

Експериментальні зразки серії I були виготовлені із звичайного листового скла, серії II - з термозміцненого листового скла, а дослідні зразки серії III - з гартованого листового скла.

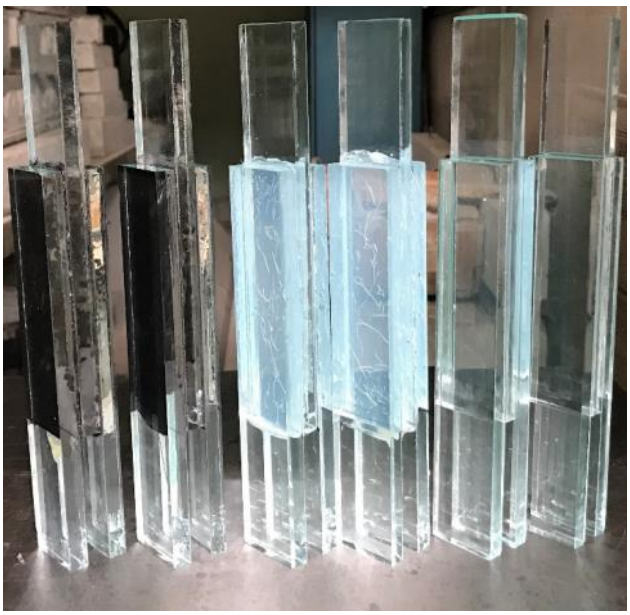
Дослідні зразки витримувались в лабораторії більше ніж 24 год перед випробуванням на міцність на згин. Зразки поміщали в умови проведення експерименту за 4 години до випробування.

2.1.4 Зразки для дослідження зчеплення скляних пластин між собою за дії статичного навантаження

Для дослідження роботи шарів скла між собою за дії статичного навантаження було виготовлено 14 дослідних зразків із звичайного листового скла [134] сумісно з Т.Ю. Осадчуком [18].

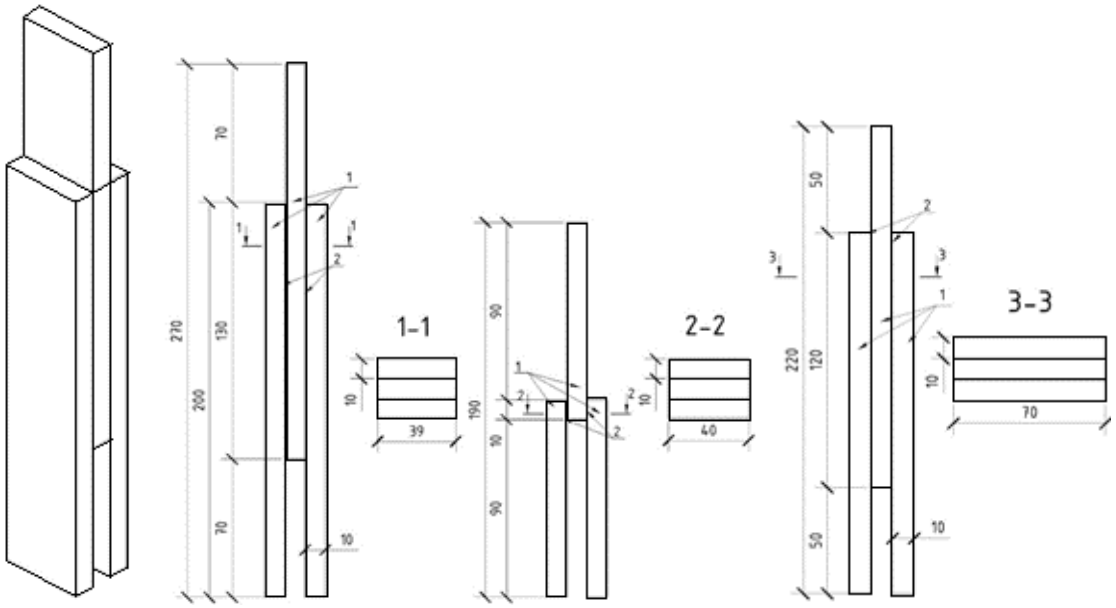
Дослідні зразки складалися з трьох скляних пластин, з'єднаних між собою за допомогою технології триплексування та різних клейних матеріалів. Загальний вид дослідних зразків представлено на рис. 2.4, а геометричні розміри в табл. 2.3.

Перед склеюванням скляні пластини дослідних зразків I-V серії було очищено від бруду та знежирено. Клей наносився на всю поверхню однієї пластини. Далі скляні пластини міцно з'єднувались між собою за допомогою лещат та витримувались протягом 5-10хв. Тривалість тужавіння залежала від клейових матеріалів. Тужавіння клею зразків четвертої та п'ятої серії здійснювалось під променями ультрафіолетової лампи. Пластини дослідних зразків шостої серії з'єднували між собою за технологією триплексації, де між пластинами вкладалась одинарна полімерна плівка товщиною 0,38мм EVASAFE (Bridgestone, Японія), а дослідні зразки нагрівались до температури 130 ºС і витримувались 30 хв.



а)

б)



в) г) д)

1 – скляна пластина; 2 – шов зчеплення скляних пластин.

Рис. 2.4. Загальний вид дослідних зразків.

а) – загальний вид дослідних зразків I-IV серії; б) – загальний вид дослідних зразків V серії; в) – конструктивна схема дослідних зразків I-IV серії; г) конструктивна схема дослідних зразків V серії; д) конструктивна схема дослідних зразків VI серії.

Табл.2.4

Характеристики дослідних зразків

№ поз.	Серія	Марка дослідного зразка	Площа склеювання, $см^2$	Матеріал для з'єднання пластин	Товщина одної пластини, мм
1	2	3	4	5	6
1	I	СЗ-1.1	50,7	Den Braven Montagefix-AQ (колір чорний)	10
2		СЗ-1.2			
3	II	СЗ-2.1		Den Braven Zwaluw Aqua-Silicone(колір прозорий)	
4		СЗ-2.2			
5	III	СЗ-3.1		Термоклей Topex 42E113	
6		СЗ-3.2			
7	IV	СЗ-4.1		Ультрафіолетовий клей Loxeal Engineering Adhesives UV 30-23	
8		СЗ-4.2			
9	V	СЗ-5.1	4		
10		СЗ-5.2			
11	VI	СЗ-6.1	84	Полімерна плівка EVASAFE (Bridgestone, Японія)	10
12		СЗ-6.2			

На запропоновану конструкцію дослідних зразків 6-ої серії (див. рис. 2.4 і табл.2.4) отримано патент України на корисну модель №140007, зареєстровано в державному реєстрі 10 лютого 2020 року [9].

2.2 Методики експериментальних досліджень

Для виконання поставленої мети дослідження було розроблено методику випробування стиснутих скляних колон на центральний стиск під дією короткочасного статичного навантаження. Для матеріалів, з яких були виготовлені стиснуті скляні колони, обрано методику випробування для визначення фізико-механічних характеристик.

2.2.1 Методика випробовування стиснутих скляних колон

У ході експериментальних досліджень було проведено випробування скляних колон на центральний стиск під дією статичного навантаженням до повного руйнування, відповідно до програми експериментальних досліджень (див. табл. 2.1). Дослідження проводили на гідравлічному пресі ПГ-250 (рис. 2.5).

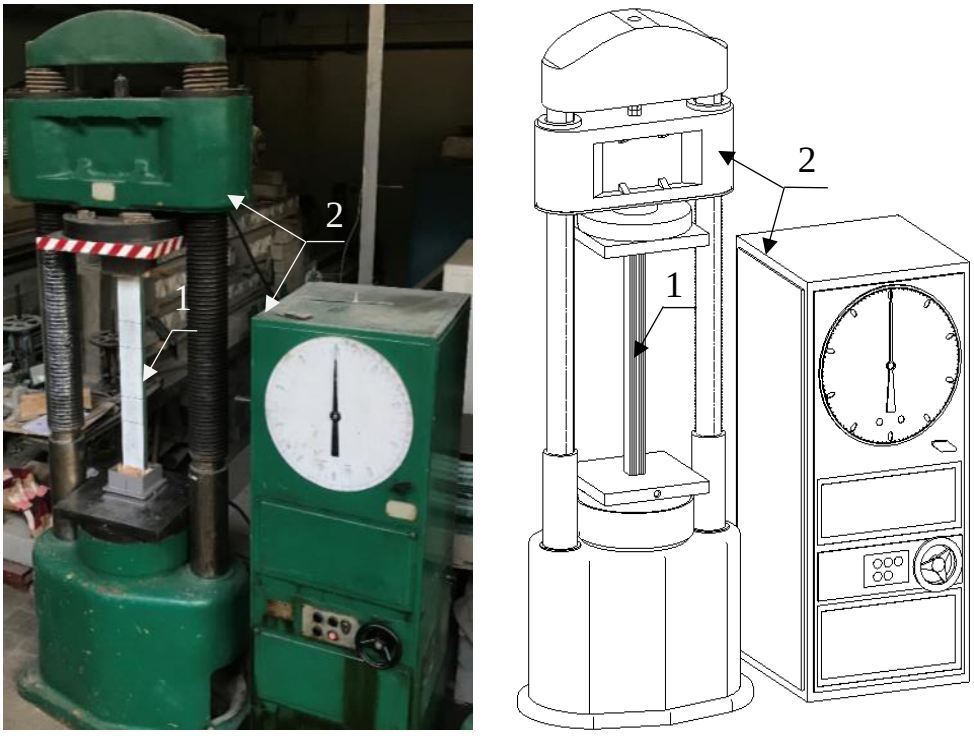


Рис. 2.5. Загальний вигляд і схема дослідної установки
1 – дослідний зразок; 2 – гідравлічний прес ПГ-250

Експериментальні зразки серії I, II, VI, VII, VIII та марок КС-3.1.1., КС-3.2.1. досліджувались як центрально стиснуті стержні із пружно-податливим закріпленням опор, а серій IV, V та марок КС-3.3.2., КС-3.4.2 з шарнірним закріпленням опор.

Шарнірне закріплення обох кінців дослідного зразка було забезпечено за допомогою рухомого та нерухомого шарніру розміщеного перпендикулярно до клейових швів. Для уникнення місцевого сколювання та руйнування скла в місцях обпирання, скляну колону було встановлено в металеві опори у вигляді «чобітків» із фанерною прокладкою товщиною 6 мм (рис. 2.6). На запропонований метод закріплення скляних колон отримано патент України на корисну модель №134878, зареєстровано в державному реєстрі 10 червня 2019 року [7].

Навантаження N прикладалось на дослідний зразок ступенями по 25 кН до моменту руйнування. Витримка на кожній ступені навантаження становила 10 хв, після чого виконували зчитування показів приладів.

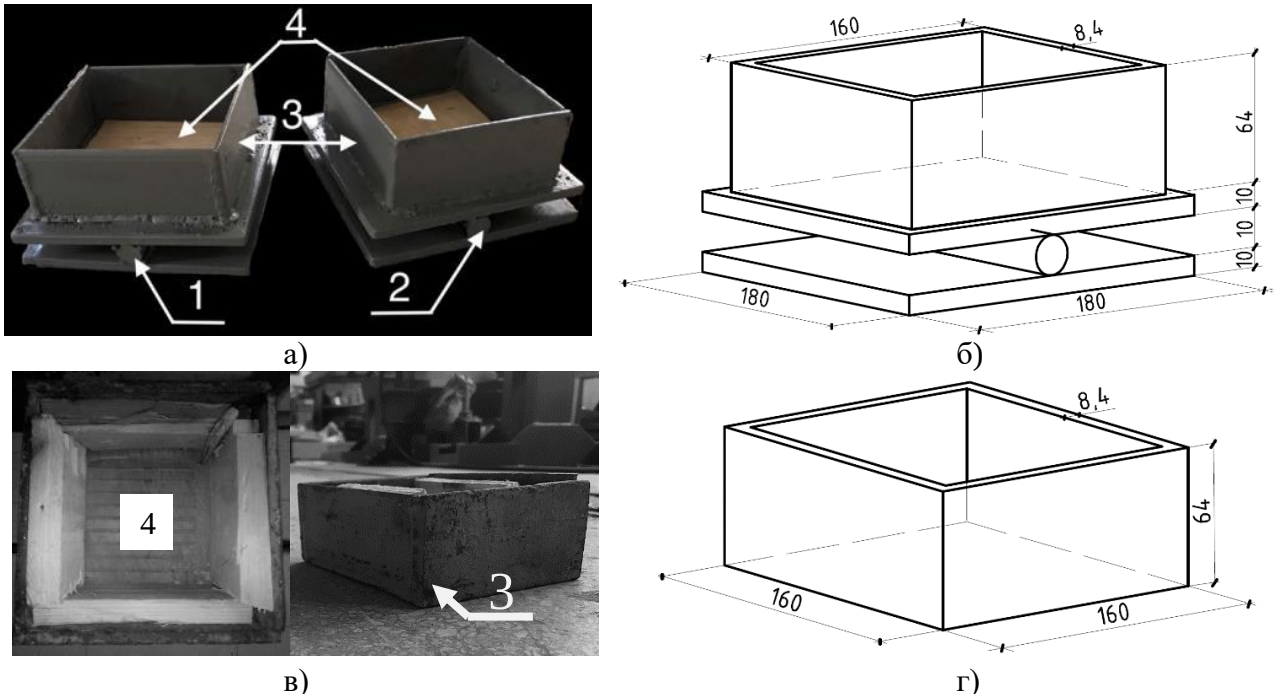


Рис. 2.6. Загальний вид опор у вигляді металевих «чобітків»

а) – вигляд опор для шарнірного закріплення скляної колони; б) – схема опор для шарнірного закріплення скляної колони; в) – вигляд пружно-податливих опор для закріплення скляної колони; г) – схема пружно-податливих опор для закріплення скляної колони

1-рухома шарнірна опора; 2-нерухома шарнірна опора; 3-опори у вигляді металевого чобітка»; 4-фанерна прокладка товщиною 6 мм.

Для заміру вигину та визначення кривизни колони використовували шість прогиномірів Аістова 6-ПАО (ПАО-1, ПАО-2, ПАО-3, ПАО-4, ПАО-5, ПАО-6), з ціною поділки 0,01мм, клас точності – 1. Прогиноміри були розміщені в трьох точках по висоті (нижня опора, центр колони, верхня опора) на двох взаємно перпендикулярних сторонах колон.

Для заміру поздовжніх деформацій на поверхнях колони було використано сім механічних екстензометрів[1] (МЕ-1, МЕ-2, МЕ-3, МЕ-4, МЕ-5, МЕ-6, МЕ-7). Вони складалися із індикаторів годинникового типу (ИЧ-01-0.001 з ціною поділки

0,001мм, класом точності – 1) та двох фішок, розміщених одна від одної на відстані 200 мм, що були з'єднані між собою стержнем з нержавіючої сталі (рис. 2.7).

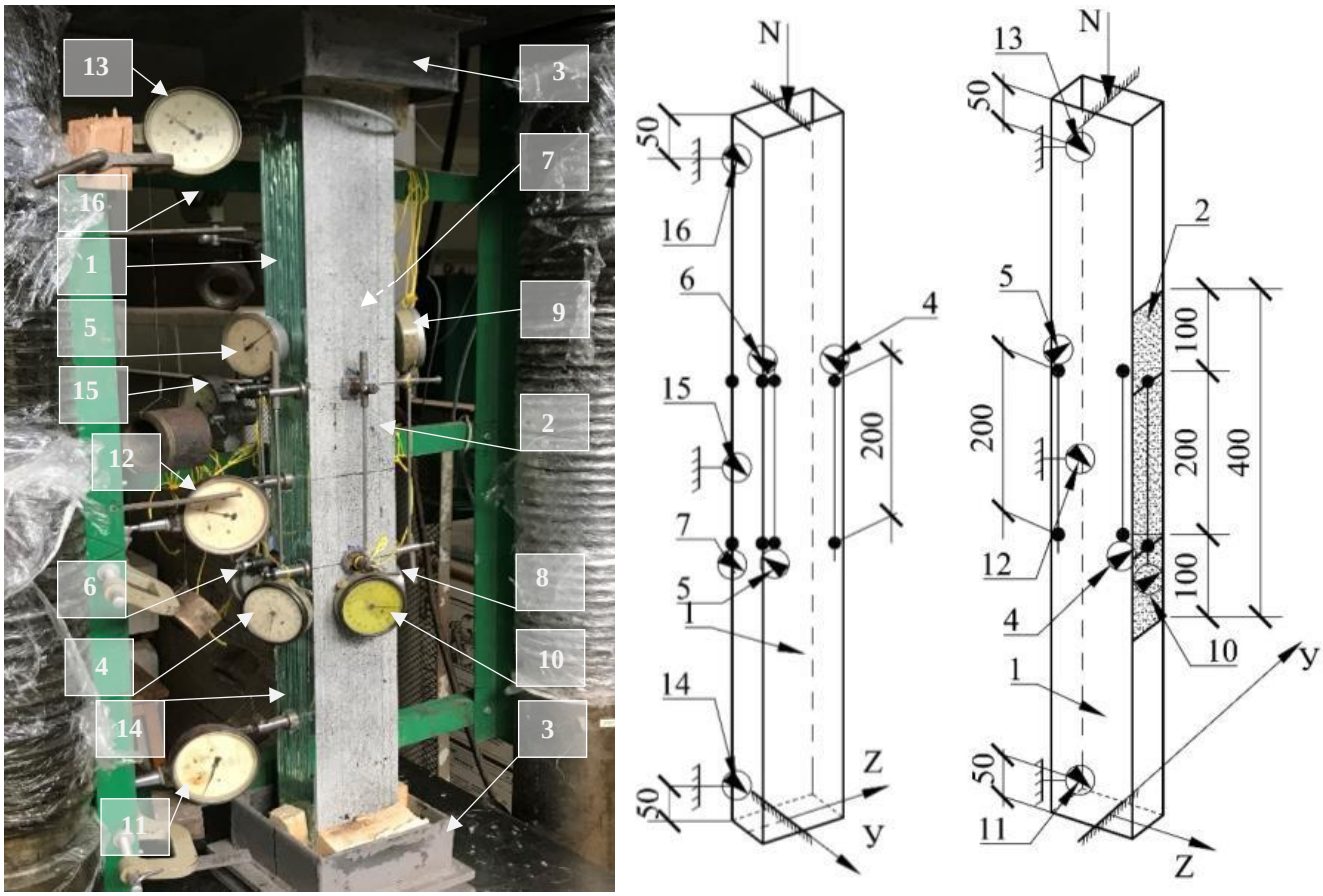


Рис. 2.7. Загальний вигляд випробувальної установки та схеми розміщення приладів

1-дослідна колона; 2 – спекл-поверхня; 3 – опори; 4 – механічний екстензометр МЕ-1; 5 – механічний екстензометр МЕ-2; 6 – механічний екстензометр МЕ-3; 7 – механічний екстензометр МЕ-4; 8 – механічний екстензометр МЕ-5; 9 – механічний екстензометр МЕ-6; 10 – механічний екстензометр МЕ-7; 11 – прогиномір Аістова ПАО-1; 12 – прогиномір Аістова ПАО-2; 13 – прогиномір Аістова ПАО-3; 14 – прогиномір Аістова ПАО-4; 15 – прогиномір Аістова ПАО-5; 16 – прогиномір Аістова ПАО-6.

[1] У колонах серії V поздовжні деформацій заміряли МЕ-1, МЕ-3, МЕ-4, МЕ-5, серії II – екстензометри МЕ-1, МЕ-2, МЕ-3, МЕ-5, МЕ-6, у колонах серії III, VII, VIII та марок КС-4.1.2, КС-4.2.2 – екстензометри МЕ-1, МЕ-2, МЕ-3, МЕ-4, МЕ-5, МЕ-6, у колонах марки КС-1.1.1 – екстензометри МЕ-1, МЕ-3, МЕ-5, МЕ-7, марки КС-1.2.1, КС-4.3.2, КС-4.4.2, КС-6.2.1 – екстензометри МЕ-1, МЕ-2, МЕ-3, МЕ-4, МЕ-5, МЕ-6, МЕ-7, марки КС-6.1.1 – екстензометри МЕ-1, МЕ-3, МЕ-5.

Після прикладання 80 % від передбачуваного руйнівного навантаження знімались усі прилади.

Експериментальні дослідження проводили при температурі повітря 23 ± 5 °С в науково-дослідній лабораторії НДЛ-23 Національного університету «Львівська політехніка» кафедри «Будівельні конструкції та мости». Умови середовища для проведення випробувань скляних колон були аналогічні до вимог дослідження фізико-механічних характеристик скла (див. п. 2.2.3 та п.2.2.5.).

2.2.2 Методика вимірювання поздовжніх деформацій стиснутих скляних колон за допомогою методу двовимірної кореляції цифрових зображень (КЦЗ)

У зв’язку з тим, що для заміру поздовжніх деформацій скляних колон під час випробування було використано механічні прилади, які не дозволяли виміряти деформації дослідного зразка до моменту руйнування, оскільки прилади знімалися після прикладання 80 % від передбачуваного руйнівного навантаження було використано метод двовимірної кореляції цифрових зображень. Крім цього, виникла проблема у дослідженнях самого скла, оскільки для такого матеріалу характерною є дві характеристики. Перша характеристика – статистична теорія міцності ускладнює прогнозування критичного навантаження. Друга – крихке руйнування, у свою чергу, унеможливлює використання традиційних методів дослідження конструкцій, через можливі пошкодження розміщених на дослідному зразку приладів. Тому для отримання повної картини деформування колон було використано у даній роботі оптичний метод заміру деформацій.

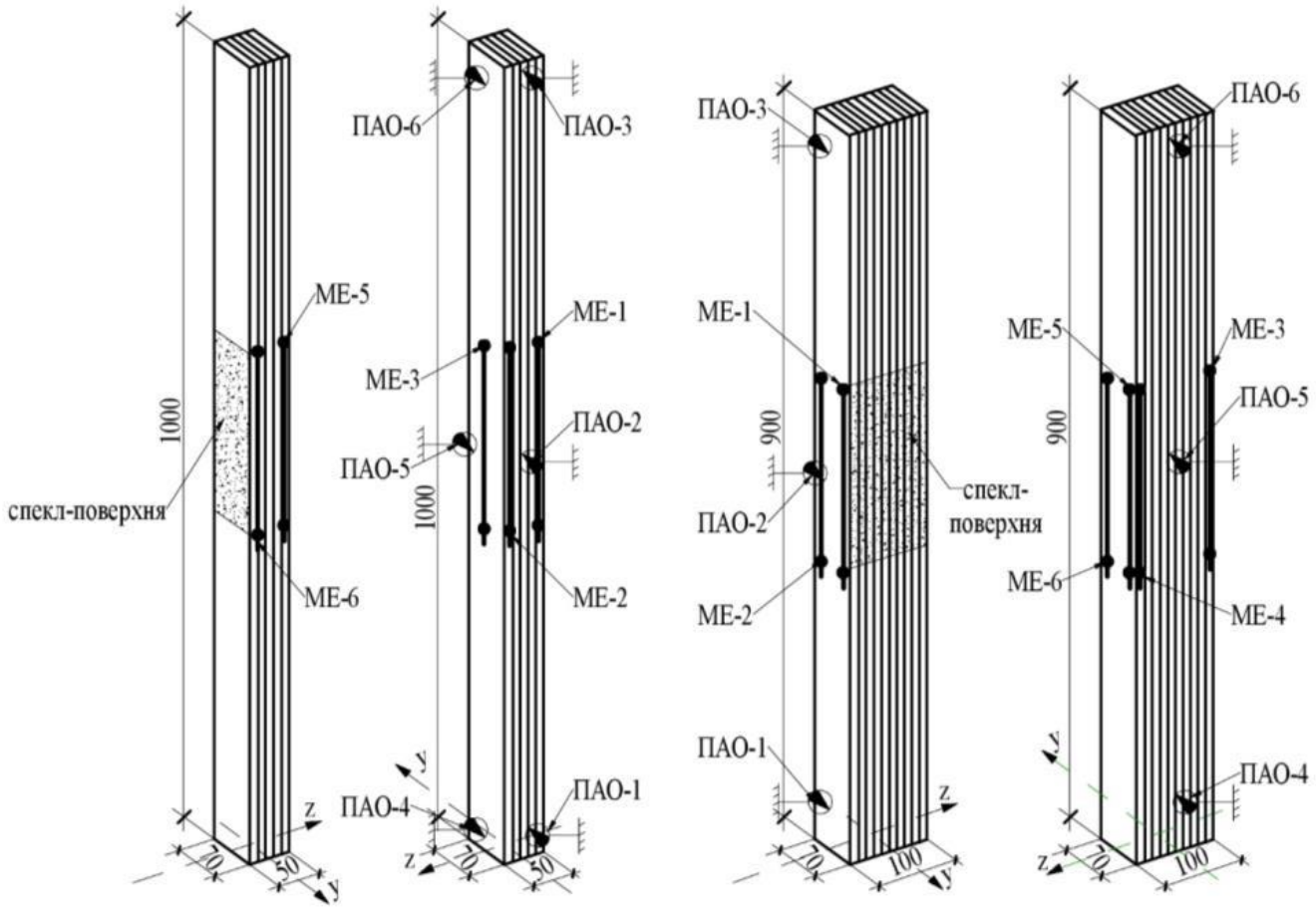
Найпоширеніший метод оптичного дослідження конструкцій є метод кореляції цифрових зображень (далі КЦЗ), який дозволяє отримувати повну картину деформування конструкції з початку навантаження до її руйнування, дозволяє зменшити трудомісткість. У зв’язку з цим даний метод вимірювання деформацій був використаний при дослідженні скляних колон.

Даний метод вперше застосований та розроблений групою американських вчених у 80-тих роках в Університеті Південної Кароліни. На той час цифрова фотографія лише розвивалась та метод КЦЗ не давав достатньо точних результатів

[16]. З того часу розвинувся метод кореляції цифрових зображень, оскільки цифрова фотографія значно розвинулася.

Метод КЦЗ був використаний в Україні для дослідження скляних плит [5, 18] та балок [11], також для залізобетонних та металевих конструкцій [16, 17, 14]. За кордоном даним методом досліджують конструкції, як на динамічні впливи [102], так і виконують аналіз фізичних показників у спортсменів [42].

Для використання методу КЦЗ[1] було нанесено на поверхню перпендикулярну до клейових швів колон марки КС-2.1.1, КС-2.2.2 та КС-6.1.1 спекл-поверхню. Для решта колон було нанесено спекл-поверхню на кожен шар скла (рис. 2.8).



а) б)

Рис. 2.8. Схема розміщення приладів та спекл-поверхні на колонах.

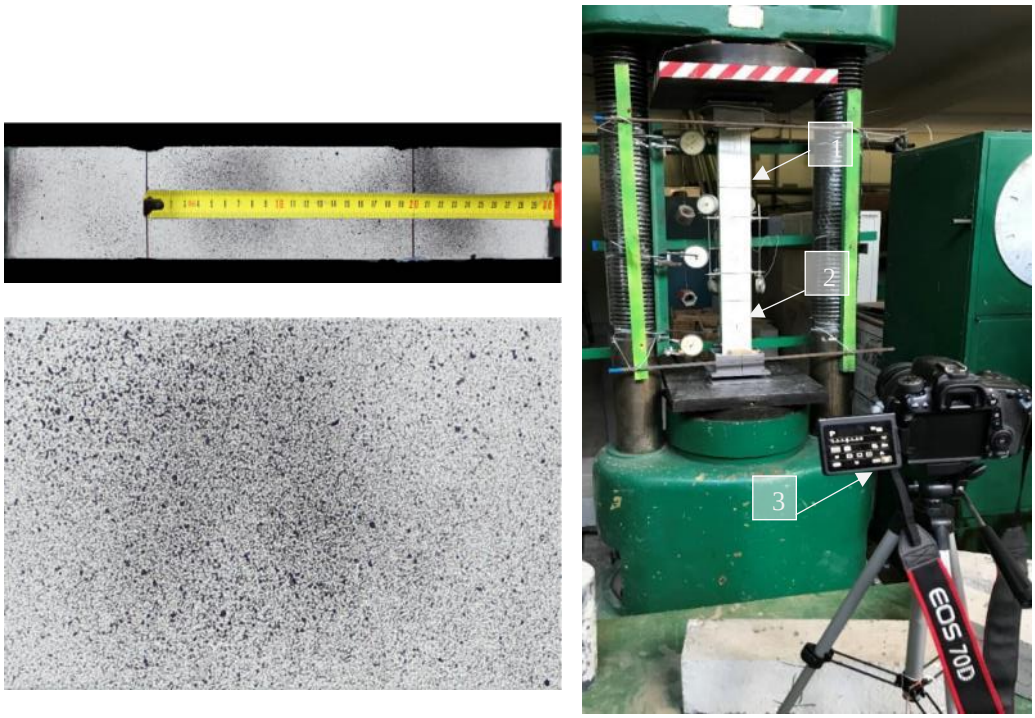
а) колони II серії; б) колона марки КС-4.1.2 та КС-4.2.2.

[1]Для колони марки КС-1.1.1 деформації за допомогою методу КЦЗ не замірялись.

Відомо кілька способів утворення спекл–поверхні. У нашому випадку на одній із граней колон була нанесена спекл–поверхня розпиленням чорної фарби на підготовлений білий фон (рис. 2.9).

Для фотофіксації використовувався дзеркальний цифровий фотоапарат Canon 60d[1], який був закріплений на штативі біля гідравлічного пресу (рис. 2.9, б). На кожному етапі дослідження виконувався фотознімок спекл-поверхні та фіксувались покази механічних приладів. Процес фотографування спекл-поверхні тривав до кінця досліду.

Згідно рекомендацій [86] при підготовці досліджуваного зразка до заміру деформацій методом КЦЗ, потрібно звертати увагу на наступні речі: освітлення, якість нанесення спекл-поверхні, характеристики фото камери (розмір матриці, наявність захисних фільтрів), характеристики оптики (фокусна відстань).



а) б)

Рис. 2.9. Установка для вимірювання деформацій за допомогою метода двовимірної КЦЗ: а) збільшений вигляд спекл-поверхні; б) загальний вигляд вимірювання деформацій за допомогою метода двовимірної КЦЗ.
1 – дослідний зразок; 2 – спекл-поверхня; 3 - фотоапарат Canon 60d.

[1]Характеристики Canon 60d – розмір пікселя – 4,3 мкм; розмір матриці 22,3×14,9 мм; об’єктив – Canon Zoom Lens EF-S 18–55mm f/3.5–5.6 IS STM.

Якщо взяти до уваги вище перелічені параметри, можна стверджувати, що метод КЦЗ для заміру деформацій є дуже чутливим до впливу зовнішніх факторів, які визначають якість зображення та чіткість спекл-поверхні, особливо на шуми.

В експериментальних дослідженнях параметрів КЦЗ [43] здійснено спробу впливу саме на фактори якості зображення за допомогою шаблонів, автори використовують принцип шахматної дошки для отримання максимальної інформації із зображення для методу КЦЗ. У даному експерименті такої оптимізації не використано, та і в попередніх дослідах зі скляними зразками [11, 5] такого роду покращення не проводились. У вище описаних дослідженнях виявлено, що програмне забезпечення працює краще при застосуванні відтінків сірого, за рахунок чого, було отримано максимальну інформацію із зображенням для методу КЦЗ у даній роботі.

Метод кореляції цифрових зображень – це оптичний метод дослідження, в основу якого закладено порівняння цифрових зображень поверхні тіла до та після деформування. У результаті отримують значення абсолютних деформацій. Вимірювання відбувається через відслідковування переміщень точок на видимій поверхні тіла (спекл-поверхні) [137, 149, 87, 124, 97].

Зображення, що виконані під час експерименту велись за певними правилами для того, щоб у подальшому спростити їх обробку. Перш за все було виконано ручне налаштування фокусу та фокусної віддалі для того, щоб забезпечити чіткість та плоскість зображення, було вибрано оптимальну фокусну віддаль еквівалентну 50 мм. За допомогою внутрішнього експозаміру фотокамери виконувалось калібрування параметрів світлочутливості, витримки та розміру вічка діафрагми. Баланс білого кольору виставлявся за замовчуванням, оскільки цей параметр можна було виправити в подальшій обробці.

Далі за допомогою програми GOM Correlate проводився аналіз відносних деформацій. До початку загального аналізу було важливим привести дані зображення до масштабу 1:1 та вибрати параметри для кореляції. Для цього було використано вказівки та рекомендації [5, 19, 18]. Далі створювались елементи для дослідження двох типів, згідно з рекомендаціями. Перший – це площинний

елемент, який розглядав деформації по заданій площині (був створений для того, щоб відображати характер деформації на площині). Другий – це точковий елемент, фасет із фіксованими розмірами та фіксованою прив'язкою до пікселів. Між двома такими точковими елементами було розміщено комп'ютерний екстензометр КЦЗ, який фактично дублював описані вище механічні екстензометри, що були розміщені на крайніх поверхнях колони. Вигляд та розміщення даних елементів показано на рис. 2.10.

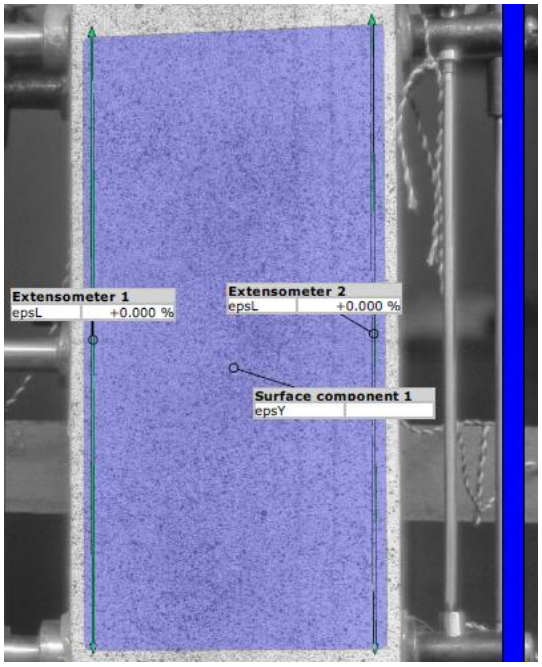


Рис. 2.10. Розміщення площинного елементу та комп'ютерного екстензометра (ЕКЦЗ-1, ЕКЦЗ-2) у програмі GOM Correlate

Отримані результати відносних деформацій за допомогою методу двовимірної КЦЗ порівнювали із відносними деформаціями, визначеними за показами механічних екстензометрів через їх відношення між собою. Як еталонні значення деформацій були прийняті абсолютні величини, заміряні механічним способом. Алгорифм вимірювання відносних деформацій за допомогою методу двовимірної КЦЗ під час експериментальних досліджень скляних багатошарових колон під дією центрального навантаження представлено блок-схемою на рис. 2.11.

Рис. 2.11. Блок-схема вимірювання поздовжніх деформацій стиснутих скляних колон за допомогою методу двовимірної кореляції цифрових зображень

2.2.3 Методика випробовування міцності скла на стиск

Для випробувань дослідних зразків I та II був використаний прес Lab.Test 6.100.1.20 серійний номер якого ZA/2019/4 та сертифікат № 7051-KL-H0159-19 з системою тестування «Test & Motion ®». Новий інтегрований інтерфейс безпеки відповідав EN ISO 13850. Клас точності відповідав EN ISO 7500-1. Швидкість збору даних до 10 кГц (рис. 2.12).

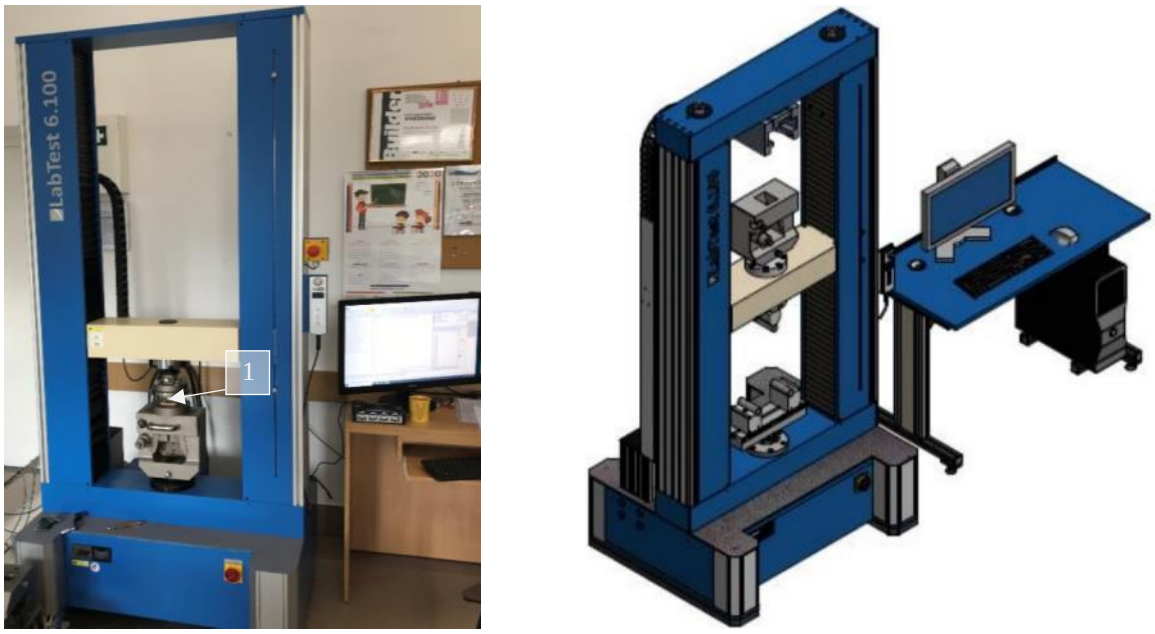


Рис. 2.12. Загальний вигляд та схема пресу Lab.Test 6.100.1.2
1- дослідний зразок

Інтерактивне програмне забезпечення консолі управління виконувало моніторинг та відображення всіх даних тесту та параметрів у графічному та числовому форматі та варіацію налаштувань в режимі реального часу (навантаження, переміщення або деформації).

Для уникнення місцевого сколювання в місцях обпирання дослідних зразків було встановлено фанерну прокладку товщиною 3мм (рис. 2.13). Міцність на стиск була визначена за аналізом результатів отриманих після випробування зразків серії I за допомогою формули [12]:

$$f_{ck,cube} = \frac{N_u}{A} \qquad (2.1)$$

де, N_u- руйнівне навантаження, A- площа поперечного перерізу.

а) б)

Рис. 2.13. Вигляд влаштування дослідного зразка в перс прес Lab.Test 6.100.1.20: а) серії І; б) серії ІІ.
1 – дослідний зразок; 2 – фанера товщиною 3мм.

На одну із вертикальних граней дослідних зразків призм марок П-6…П-10 вертикально наклеювались тензодатчики HBM-1-LY41-10 / 120 та на суміжну по ребру грань - горизонтально за допомогою клею z70 schnellklebstoff, для заміру поздовжніх та поперечних абсолютних деформацій (рис. 2.14).

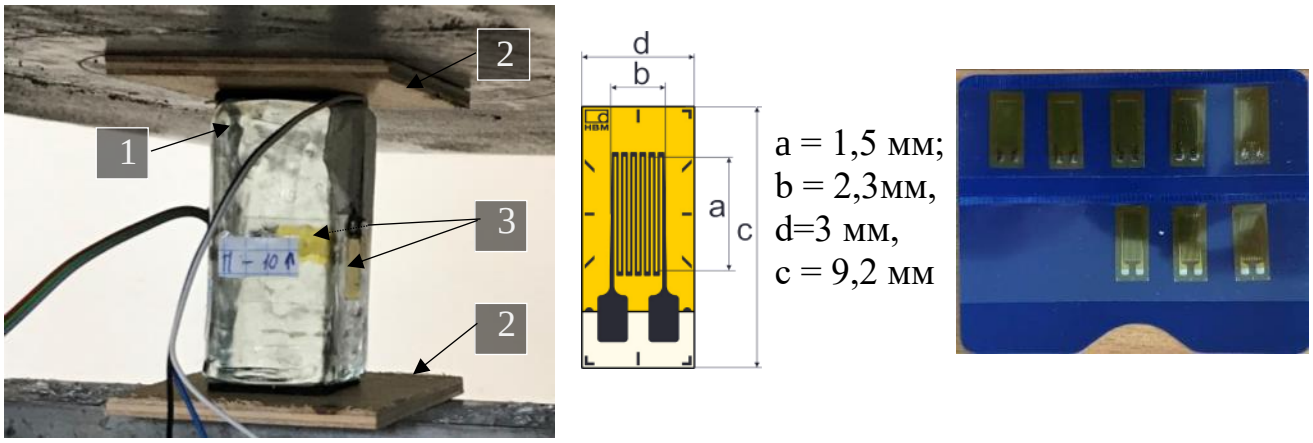


Рис. 2.14. Загальний вигляд тензодатчиків
1 – дослідний зразок; 2 – фанера товщиною 3мм; 3 – тензодатчики HBM-1-LY41-10 / 120

Для обробки та зчитування даних з тензодатчиків використовувалось програмне забезпечення Catman Easy-AP та обладнання 1-MX1615B-TENSOMETRYCZNY 16-и канальний вимірювальний підсилювач серії QuantumX, та 1-CX22B-W реєстрація серії QuantumX (рис. 2.15).

Рис. 2.15. Загальний вигляд обладнання для зчитування даних з тензодатчиків

4 – реєстратор 1-CX22B-W серії QuantumX; 5 – 16-и канальний вимірювальний підсилювач 1-MX1615B-TENSOMETRYCZNY серії QuantumX

Модуль пружності скла визначався за загоном Гука згідно з [12] за рівнянням:

$$E = tg(\alpha) = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_{1el}} \qquad (2.2)$$

де, $\sigma_1 = N_1/A$ - збільшення напружень від умовного нуля до кінця прямої лінії на графіку залежності напружень від відносних деформацій; N_1 – відповідне збільшення навантаження; A- площа поперечного перерізу дослідного зразка; ε_{1el} – збільшення пружно-миттєвої відносної поздовжньої деформації зразка, і відповідає рівню навантаження N_1.

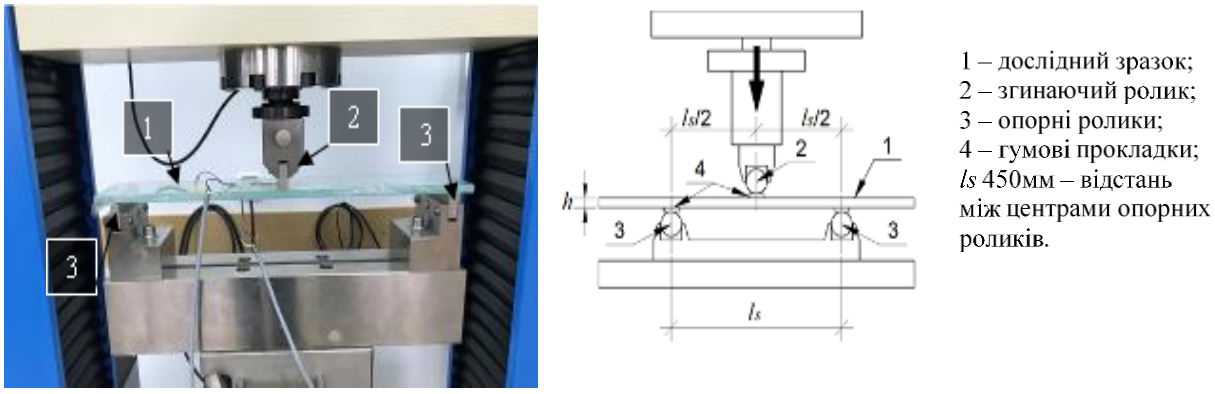
Також, у даній роботі було визначено реальне значення коефіцієнта Пуассона за формулою згідно [12]:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_{2el}}{\varepsilon_{1el}} \qquad (2.3)$$

де, ε_{2el} – збільшення пружно-миттєвої відносної поперечної деформації зразка, який відповідає рівню навантаження N_1.

2.2.4 Методика випробовувань міцності скла на розтяг при згині

Дослідні зразки встановлювали згідно з рис. 2.16. Відповідно до розділу 7.2 стандарту EN 1288-3: 2000 між зразком і навантажувальним та опорними валиками були розміщені гумові смужки товщиною 3 мм і твердістю 40 ± 10 IRHD (ISO 48) . Випробування на згин проводили при (23 ± 5) ° С та відносній вологості між 40% та 70%. Під час випробування температура залишалася постійною до 1 ° С, щоб уникнути розвитку теплових напружень. Зразки згиналися рівномірно зростаючим згинаючим навантаженням доти, доки не відбувалось руйнування. Після чого знаходилося максимальне руйнуюче навантаження та фіксувався час, необхідний для досягнення цього навантаження.



а) б)

Рис. 2.16. Загальний вигляд влаштування дослідного зразку на стенд а) вигляд ; б) схема.

Відповідно до 13.2 в ASTM C158 [31] швидкість навантаження відповідала швидкості збільшення максимального напруження не більше (1,1 ± 0,2) МПа/хв.

Для випробувань дослідних зразків був використаний прес Lab.Test 6.100.1.20 (див. розд. 2.2.3).

На дослідні зразки марок GP-1.1, GP-1.2, GP-1.7, GP-2.1, GP-2.2, GP-2.7, GP-3.1, GP-3.2, GP-3.8 наклеювались по центру зразка на нижній і верхній грані за допомогою клею z70 schnellklebstoff тензодатчики HBM-1-LY41-10 / 120, для заміру абсолютних деформацій. Інформація про тензодатчики та обладнання для зчитування даних з них наведені в розділі 2.2.3.

Рис. 2.17. Загальний вигляд випробувальної установки

1 – дослідний зразок; 2 – прес Lab.Test 6.100.1.20; 3 – програмне забезпечення Catman Easy-AP; 4 – реєстратор 1-CX22B-W серії QuantumX; 5 – 16-и канальний вимірювальний підсилювач 1-MX1615B-TENSOMETRYCZNY серії QuantumX

Початкове навантаження на зразок не повинно було допускати максимальні напруження волокна, що перевищували 25% середнього модуля розриву (ASTM C158, section 13.2 [31]).

Міцність на згин всіх дослідних зразків обчислювалася у відповідності з класичною формулою міцності балки яка працює на трьохточковий згин (в 9.2 ASTM C1161 [30]) наступним чином:

$$\sigma_{flex} = MOR = \sigma_{bB} = S = \frac{3}{2}\frac{F \cdot l_s}{b \cdot h^2} \quad (2.4)$$

де:

σ_{flex} – міцність на згин або модуль розриву (MOR) при згині (σ_{bB} - позначення, використане в EN 1288-3: 2000 [60], а S – використане в ASTM C158 [31] та ASTM C1161 [30]); F – руйнуюча сила; l_s – відстань між опорами; b – ширина зразка; h – товщина зразка.

Швидкість наростання максимального напруження визначалась відповідно до 8.1.3 ASTM C158 [31]:

$$R = \frac{\Delta\sigma}{\Delta t} = \frac{3}{2}\frac{l_s}{b \cdot h^2}\frac{\Delta F}{\Delta t} \quad (2.5)$$

де R – швидкість збільшення максимального напруження волокна (МПа / с); b - ширина зразка (мм); h – товщина зразка (мм); t – час від початку безперервного навантаження до руйнування (с); $\frac{\Delta F}{\Delta t}$ – швидкість збільшення навантаження (Н / с).

У даній роботу модуль пружності скла був розрахований двома методами.

Перший метод полягав в аналізі даних показу тензодатчиків, та розраховувався за законом Гука, як:

$$E = tg(\alpha) = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.6)$$

де σ- напруження; ε- відносні деформації.

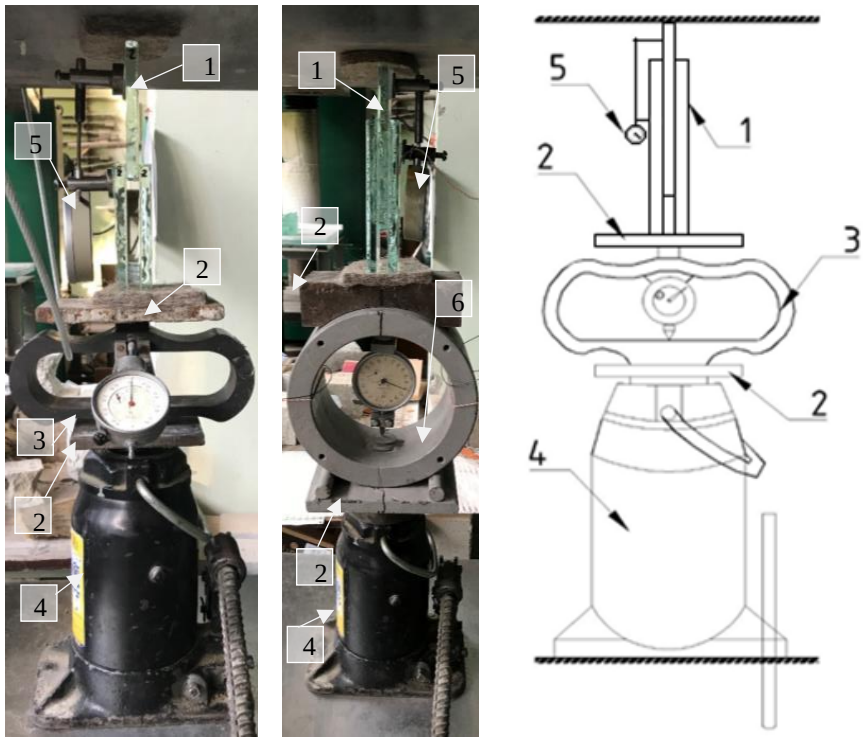
Другий метод полягав у розрахунку модуля пружності аналітичним способом. Оскільки для дослідних зразків, які випробовувались на трьохточковий згин, методика розрахунку відповідала класичній теорії балки Ейлера-Бернуллі, що є спрощеною лінійною теорією пружності, була виведена формула з рівняння для обчислення прогину [101]:

$$E = \frac{F \cdot l_s^3}{48 \cdot I \cdot f} \quad (2.7)$$

де F – руйнуюча сила; l_s – відстань між опорами; I – момент інерції; f – прогин.

2.2.5 Методика випробовування зчеплення скляних пластин між собою за дії статичного навантаження

Установка для випробування складалася із стенду, для статичних випробувань конструкції на міцність (рис. 2.18). Зовнішнє навантаження N прикладалось покроково за допомогою гідравлічного домкрата. Величина одного ступеня навантаження становила 1,0 кН та контролювалась за допомогою показів динамометра ДОСМ-3-50У для зразків I-V серії та кільцевим динамометром для зразків VI серії аж до повного руйнування дослідного зразка. На кожній ступені навантаження відбувалась витримка 10 хв, після чого виконували зчитування показів приладів.



а) б) в)

Рис. 2.18. Випробувальна установка для дослідних зразків марок СЗ: а) - серії VI; б) серії I…V; в) схема випробувальної установки для дослідних зразків I-V. 1 – дослідний зразок, що випробовувався; 2 – металева пластина; 3 – динамометр ДОСМ-3-50У; 4 – гідравлічний домкрат; 5 – індикатор годинникового типу; 6 – кільцевий динамометр.

Дослідний зразок 1 розташовувався вертикально. Для уникнення місцевого сколювання та руйнування скла в місцях обпирання дослідного зразка на метал

було вистелено повсть. Для виміру абсолютних деформацій Δl було використано індикатори годинникового типу 5, з ціною поділки 0,001 мм для дослідних зразків серії IV- VI та індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм для серій I-III. Клас точності індикаторів годинникового типу – 1. Заміри зсуву між шарами проводились аж до повного руйнування дослідних зразків серій I- V. Для VI серії дослідних зразків прилади знімались при навантажені 80% від руйнівного.

Дотичні напруження зсуву τ по клейовому шву розраховувались рівнянням:

$$\tau = \frac{Nu}{\mathrm{A}}; \tag{2.8}$$

де N_u – руйнівне навантаження; A – площа склеювання.

2.2.6 Методика аналізу фізико-механічних характеристик скла, використовуючи ймовірнісно-статистичний метод, на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла

Найбільш широко використовуваний метод для аналізу даних фізико-механічних характеристик скла, таких як модуля пружності, міцності, час до руйнування, критичні напруження, цикли навантажень, тощо є двопараметричний розподіл Вейбулла. Оскільки, при дослідженні фізико-механічних характеристик скла присутній широкий розкид отриманих значень.

Статистичний підхід Вейбулла використовується для опису варіації механічних властивостей матеріалів, таких як, сучасні кераміка та скло [51]. В Україні було розглянуто основні методи випробування міцності скла та представлені результати вимірювання міцності звичайного листового скла, та описано покрокову інструкцію для аналізу даних міцності за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла [52].

У даній роботі для оцінки даних зразків за допомогою двопараметричної функції розподілу Вейбулла використовували стандарт EN 61649: 2008 [66] та стандарт EN 12603: 2002 [59].

Відповідно до EN 61649:2008 (розділ 5.1) [66], EN 12603:2002 (розділ «Вступ») [59], параметрична функція кумулятивного розподілу Вейбулла (CDF) має рівняння:

$$\text{CDF} = F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{2.9}$$

де *F(t)* - ймовірність відмови; β − модуль Вейбулла; η − характеристична тривалість роботи або параметр масштабу.

Параметр масштабу η – це значення змінної t, від загальної кількості зразків зруйнується при 63,2%. Та обчислюється з формули:

$$b = -\beta \cdot \ln(\eta) \tag{2.10}$$

Для аналізу даних фізико-механічних характеристик скла було використано методику, показану в п. 7 EN 12603:2002 [59] та п. 7.1, п. 7.2, додатках I, E EN 61649:2008 [66], яка поєднує в собі графічний аналіз на основі ймовірнісного графіка та аналітичний аналіз на основі LSM / RRM / LRM.

Для побудови діаграми ймовірнісним (вірогіднісним) графіком Вейбулла, по обидві сторони кумулятивної функції розподілу Вейбулла (2.9) був знайдений подвійний натуральний логарифм, у результаті чого отримали лінійне рівняння розподілу Вейбулла:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) = \beta \cdot \ln(t) - \beta \cdot \ln(\eta) \tag{2.11}$$

що приводить до лінійного рівняння регресії у вигляді прямої лінії:

$$y_i = \beta \cdot x_i + b \tag{2.12}$$

де, $y_i = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F_i(t)}\right)\right)$ - ордината графіка Вейбулла; яка залежить від параметра $F_i(t)$; $x_i = \ln(t_i)$ - залежить від i – го значення даних t_i.

Параметр β обчислювали як тангенс кута між віссю X та лінією графіка (відношення Y- компоненти лінії до її X-компоненти).

Для оцінки відповідності даних розподілу Вейбулла згідно з п. 7.2.5 EN 61649:2008 [66], було прийнято квадрат коефіцієнта кореляції R або коефіцієнт детермінації R_2 у якості статистичного критерію згоди.

Коефіцієнт варіації був визначений за формулою:

$$c_v = \frac{\sigma(x)}{\mu(x)} = \left(\frac{\Gamma\left(1+2\beta^{-1}\right)}{\left(\Gamma\left(1+\beta^{-1}\right)\right)^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.13)$$

де Γ – гамма функція, яка залежить від x.

Було використано формулу квантильної функції розподілу Вейбулла відповідно до п. 10.4 EN 61649:2008 [66], для визначення характеристичного значення властивостей скла, яка називається інверсною CDF.

$$t_\alpha = F^{-1}(t_\alpha) = CDF^{-1} = \eta\left[-\ln(1-\alpha)\right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.14)$$

де – значення ймовірності руйнування $F_{(t)}$.

Були визначені характеристичні значення властивостей скла з нижньою межею довірчого інтервалу на рівні 95% при 5%-ій ймовірності руйнування з нижньою межею довірчого інтервалу на рівні 95%, згідно з п. 11.4 EN 14179-1:2016 [61].

2.3 Висновки до розділу 2

1. Запроектовані та виготовлені скляні колони з різними поперечними перерізами та різною висотою за технологією триплексації.
2. Для вивчення особливостей роботи стиснутих скляних елементів було розроблено експериментальну програму, яка полягала у випробуванні дослідних зразків, як центрально стиснутих стержнів із пружно-податливим закріпленням на опорах та шарнірним закріпленням опор.
3. Наведено метод вимірювання деформацій стиснутих скляних колон за допомогою методу двовимірної кореляції цифрових зображень (КЦЗ). Даний

метод було адаптовано для вимірювання відносних деформацій багатошарових скляних колон.

4. Розроблено методику дослідження роботи зчеплення шарів скла під дією статичного навантаження.
5. Запроектовано і виготовлено дослідні зразки для визначення фізико-механічних характеристик скла на стиск, розтяг при згині та наведено методику випробовування таких досліджень.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Несуча здатність та деформативність стиснутих скляних колон

3.1.1 Колони I серії

Згідно з програмою експериментальних досліджень (див. п.2.2.1) було проведено випробування колон I серії.

Для оцінки поведінки скляних колон під час досліджень побудовано графіки залежності відносних деформацій від напружень σ=N/A, згідно усереднених показів механічних екстензометрів (рис. 3.1).

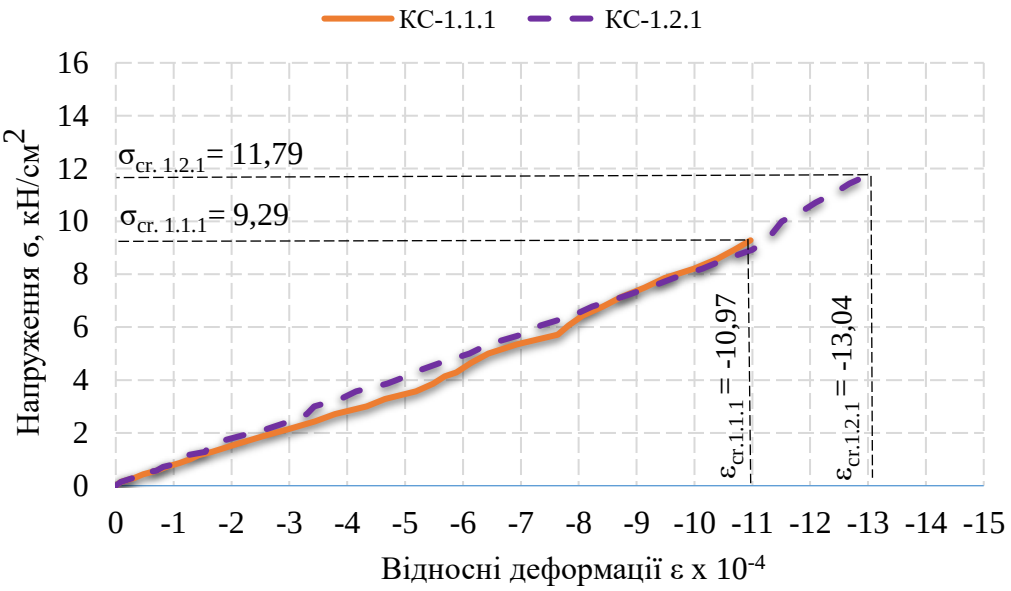


Рис. 3.1. Графіки залежності відносних деформацій від напружень σ=N/A.

Фізичне руйнування скляних колон I серії відбулось раптово по середині висоти колони від появи горизонтальних тріщин із видимим вигином в площині перпендикулярній до клейових швів «XZ» (рис. 3.2). У колонах кожен шар руйнувався почергово із зміною концентрату напружень, яке мало діагональне розповсюдження по всіх скляних шарах колони. Хоча для спостерігача, момент руйнування відбувся у надзвичайно малий проміжок часу.

Перше сколювання шару скла колони марки КС-1.1.1 відбулось при навантажені N_w = 650 кН, а колони марки КС-1.2.1 при N_w = 825 кН у верхній приопорній ділянці. У нижній приопорній ділянці тріщина відкрилась при навантажені 675 кН для колони марки КС-1.1.1 та 850 кН для КС-1.2.1.

а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 3.2. Характер руйнування дослідних зразків І серії

а) вигляд з боку колони марки КС – 1.1.1 після випробування;

б) фронтальний вид колони марки КС – 1.1.1 після випробування; в) вигляд горизонтальних тріщин колони марки КС – 1.1.1 при N=780 кН; г) вигляд горизонтальних тріщин колони марки КС – 1.2.1 при N = 880 кН.

Тріщини у приопорних ділянках розкривались із збільшенням навантаження до моменту руйнування дослідного зразка. По всій висоті колони тріщини почали утворюватися безпосередньо в момент руйнування дослідного зразка.

Руйнування дослідного зразка колони марки КС–1.1.1 відбулось при $N_{u,1.1.1}$ = 790 кН, а колони марки КС–1.2.1 відбулось при N_u = 1030 кН. Розбіжність між результатами випробування дослідних зразків становила 30,04%. Така велика розбіжність несучої здатності між колонами пояснюється тим, що скляна колона марки КС-1.1.1 мала дефект в приопорній ділянці (надщерблений один зовнішній шар скла), що і привело до розбіжності результатів між дослідними зразками. Середнє значення несучої здатності колон N = 910 кН.

Різниця між руйнівним навантаженням колон N_u та навантаженням при появі тріщин N_w для колони марки КС – 1.1.1. становить 17,72%, а для скляної колони КС – 1.2.1 – 19,90%. Отже, поява перших тріщин в колонах відбулася при навантажені N_w = 0,81× N_u.

За результатами аналізу показів прогиномірів було побудовано графіки залежності вигину колон в площинах «XZ» та «XY» в залежності від зовнішнього навантаження (рис. 3.3).

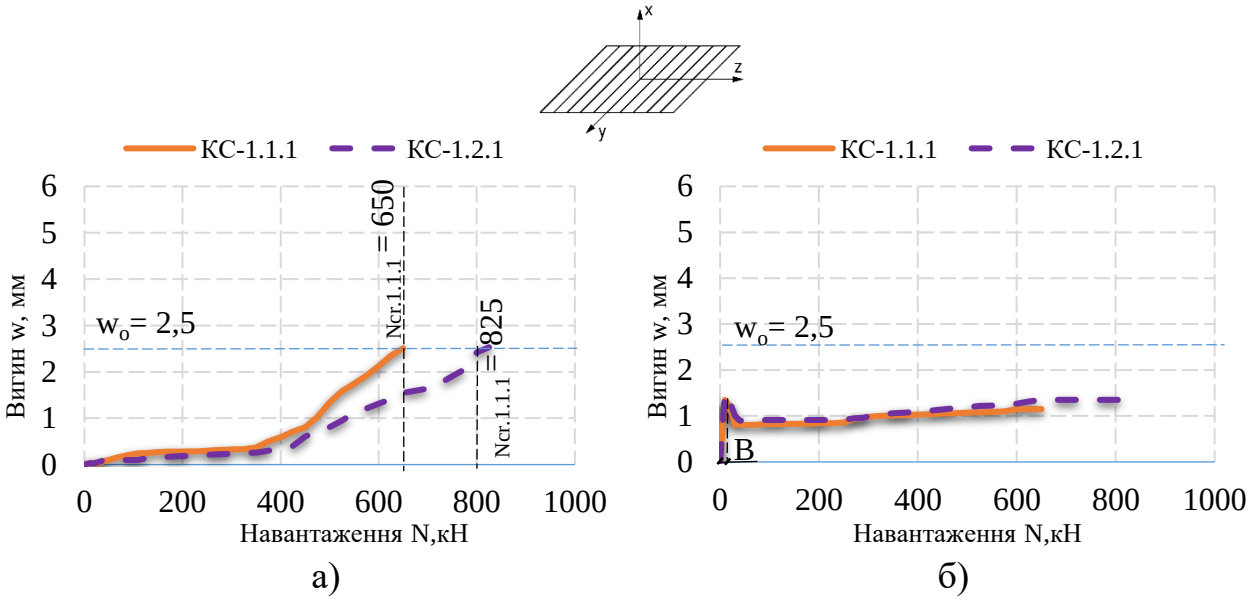
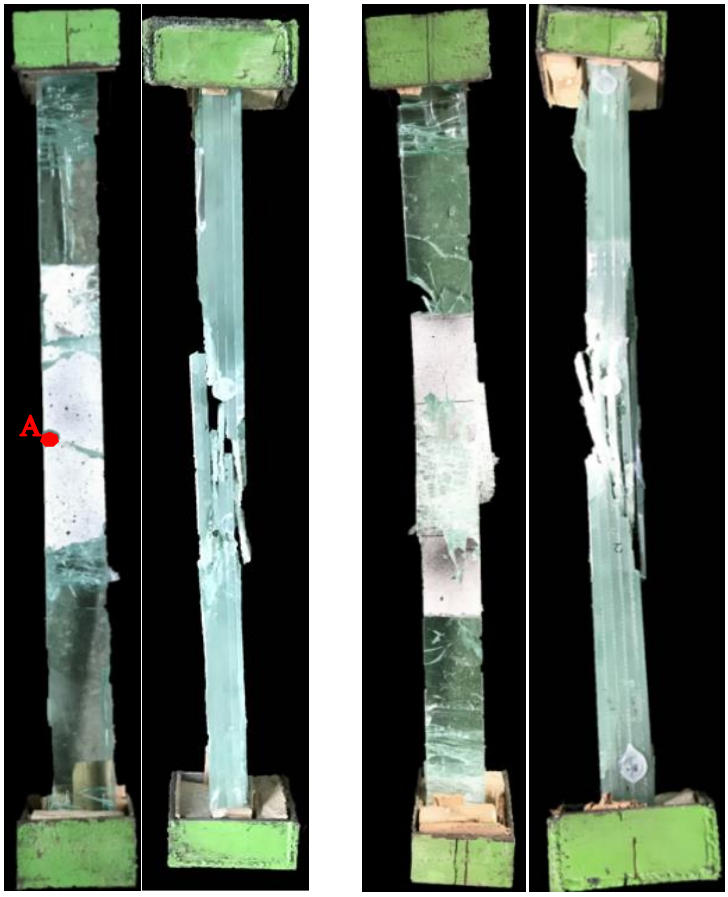


Рис. 3.3. Графіки залежності вигину колон від навантаження в площині: а) «XZ»; б) «XУ».
Зона В - включення в роботу всіх шарів скла в площині обпирання на опорний металевий лист через фанеру в «чобітку»

Дослідні зразки I серії зруйнувались за першим граничним станом від втрати стійкості. Для оцінки за II групою граничних станів у даній роботі прийнято експлуатаційну придатність скляних колон до початку появи перших тріщин $N_{cr}=N_w$. Згідно з аналізом проведеного дослідження скляних колон гранично допустимий вигин прийнято $w_o = l$ /400 = 2.5 мм, так як перша тріщина відкрилась при w=2.51мм для колони марки КС-1.1.1 та w=2.53 мм для колони марки КС-1.2.1.

3.1.2 Колони II серії

Фізичне руйнування скляних колон II серії відбулось аналогічно до колон I серії (див. розд. 3.1.1). Характер руйнування дослідних зразків II серії представлено на рис. 3.4.



а) б)

Рис. 3.4. Вигляд дослідних зразків після руйнування та складання їх в проектне положення: а) колона марки КС – 2.1.1;б) колона марки КС – 2.2.1 т.А-початок руйнування

На відміну від колон I серії в дослідних зразках II серії змінений поперечний переріз, а саме зменшено кількість шарів в два рази, для оцінки впливу поперечного перерізу колон на несучу здатність.

За результатами випробування побудовано графіки залежності відносних деформацій від напружень σ=N/A, згідно усереднених показів механічних екстензометрів (рис. 3.5).

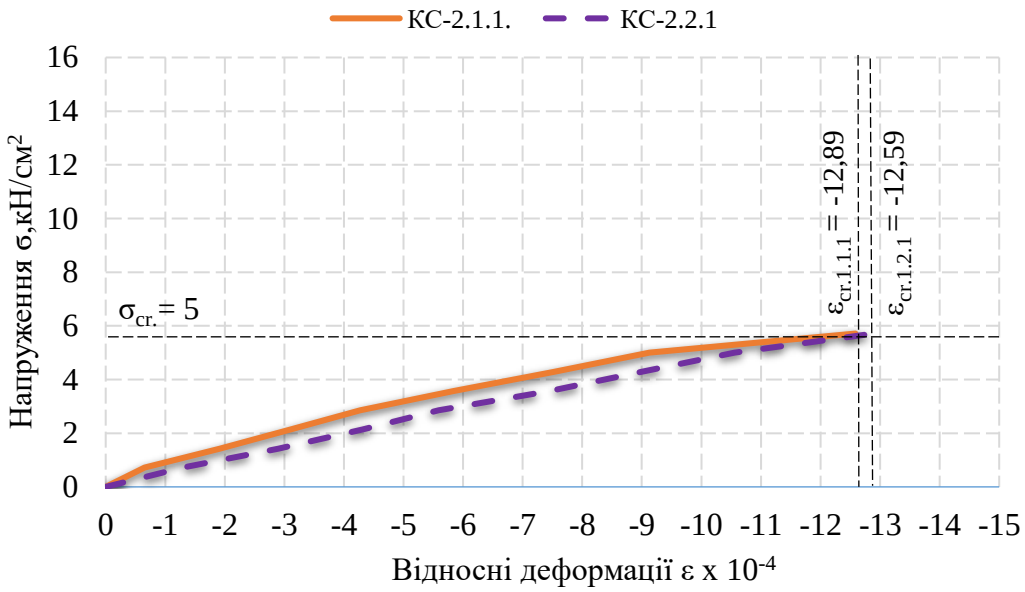


Рис. 3.5. Графіки залежності відносних деформацій від напружень σ=N/A.

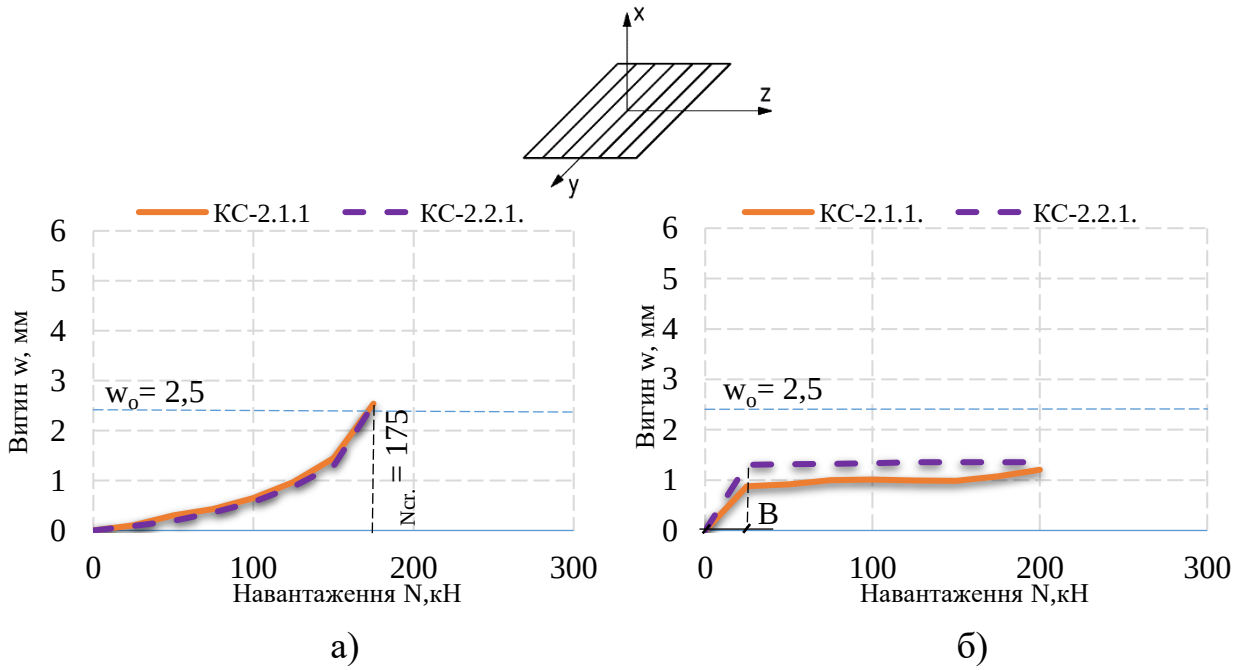
Як бачимо з графіку відносні деформації звичайного скла для колон II серії були більшими, ніж у дослідних зразках I серії при суттєво менших навантаженнях.

Відкриття першої тріщини колон серії II відбулось при навантажені N_w = 175 кН, у верхній та нижній приопорній ділянці. Тріщини у приопорних ділянках розкривались із збільшенням навантаження до моменту руйнування дослідного зразка. Тріщини по всій висоті колони почали утворюватися безпосередньо в момент руйнування дослідного зразка.

Руйнування дослідного зразка колони марки КС–2.1.1 відбулось при N_u = 270 кН, а колони марки КС–2.2.1 відбулось при N_u = 265 кН. Розбіжність між результатами випробування дослідних зразків становила 1,85%. Середнє значення несучої здатності колон N = 267,5 кН.

Різниця між руйнівним навантаженням колон N_u та навантаженням при появі тріщин N_w для колони марки КС – 2.1.1. становить 35,19%, а для скляної колони КС – 2.2.1 – 33,96%. Отже, поява перших тріщин в колонах відбулася при навантажені $N_w = 0{,}65\times N_u$.

За результатами показу прогиномірів було побудовано графіки залежності вигину колон в площинах «XZ» та «XY» в залежності від зовнішнього навантаження (рис. 3.6).



а) б)

Рис. 3.6. Графіки залежності вигину колон від навантаження в площині: а) «XZ»; б) «XУ»
Зона В - включення в роботу всіх шарів скла в площині обпирання на опорний металевий лист через фанеру в «чобітку»

Аналогічно до колон I серії гранично допустимий вигин встановлено $w_o = l/400 = 2.5$ мм.

3.1.3 Колони III серії

Колони III серії виготовлені квадратного перерізу та досліджувались, як центрально стиснуті стержні із пружно-податливим закріпленням на опорах марки КС-3.1.1, КС-3.2.1 та марок КС-3.3.2., КС-3.4.2 з шарнірним закріпленням на

опорах (див. п. 2.2.1). Для можливості встановити шарнірне з'єднання у випробувальну установку висоту колон було зменшено на 100мм.

Фізичне руйнування скляних колон ІІІ серії відбулось аналогічно до колон І та ІІ серії (див. п. 3.1.1). Колони даної серії мали вигин у двох площинах, більший із них відбувався у перпендикулярній до шарів скла площині. Характер руйнування дослідних зразків ІІІ серії представлено на рис. 3.7 та рис. 3.8, а графік залежності відносних деформацій від напружень, згідно усереднених показів механічних екстензометрів на рис. 3.9.

а) б)

Рис. 3.7. Вигляд дослідних зразків після руйнування та складання їх в проектне положення: а) колона марки КС – 3.1.1; б) колона марки КС – 3.2.1.

а) б)

Рис. 3.8. Вигляд дослідних зразків після руйнування та складання їх в проектне положення: а) колона марки КС-3.3.2; б) колона марки КС-3.4.2.

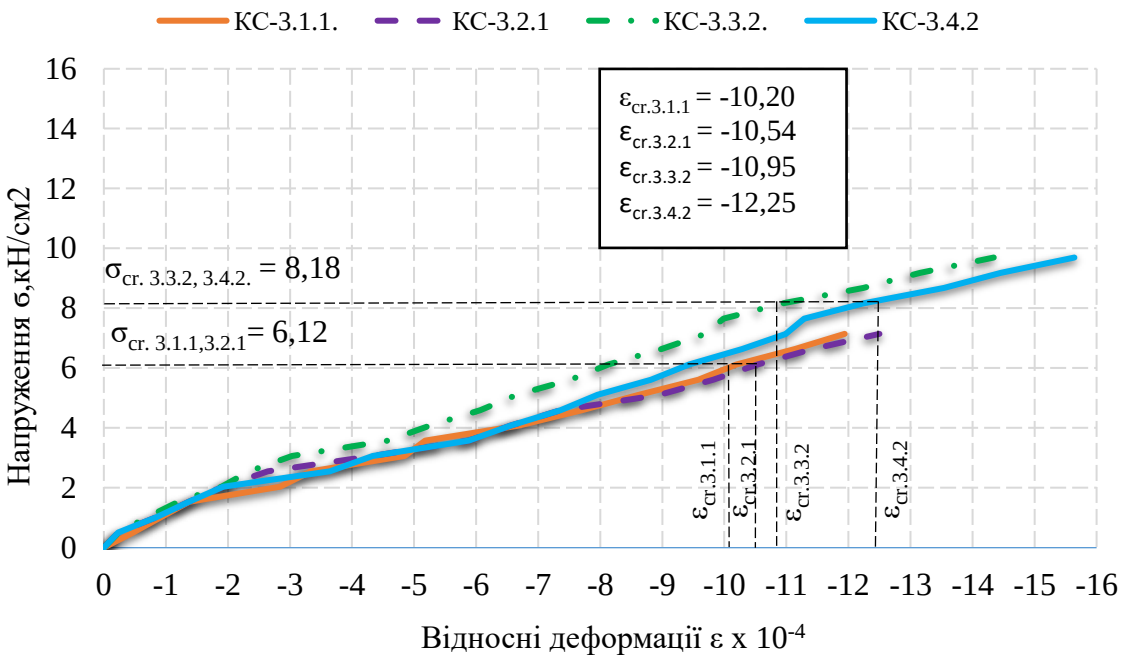


Рис. 3.9. Графіки залежності відносних деформацій від напружень σ=N/A.

Відкриття першої тріщини колон марки КС-3.1.1 та КС-3.2.1 відбулось при навантажені N_w = 300 кН, у верхній та нижній приопорній ділянці для колон марки КС-3.3.2 та КС-3.4.2 при N_w = 400 кН.

Руйнування дослідного зразка скляної колони марки КС–3.1.1 відбулось при N_u = 382,5 кН, колони марки КС–3.2.1 відбулось при N_u = 385 кН, марки КС-3.3.2 N_u = 580 кН, а КС-3.4.2 N_u = 525 кН. Розбіжність між результатами випробування дослідних зразків із пружно-податливим закріпленням на опорах становила 0,65%, а з шарнірним закріпленням 9,48%. Середнє значення несучої здатності колон з пружно-податливим закріпленням на опорах становить N = 383,75 кН, а шарнірним N = 552,5 кН.

Графіки залежності вигину колон в площинах «XZ» та «XY» в залежності від зовнішнього навантаження представлено на рис. 3.10.

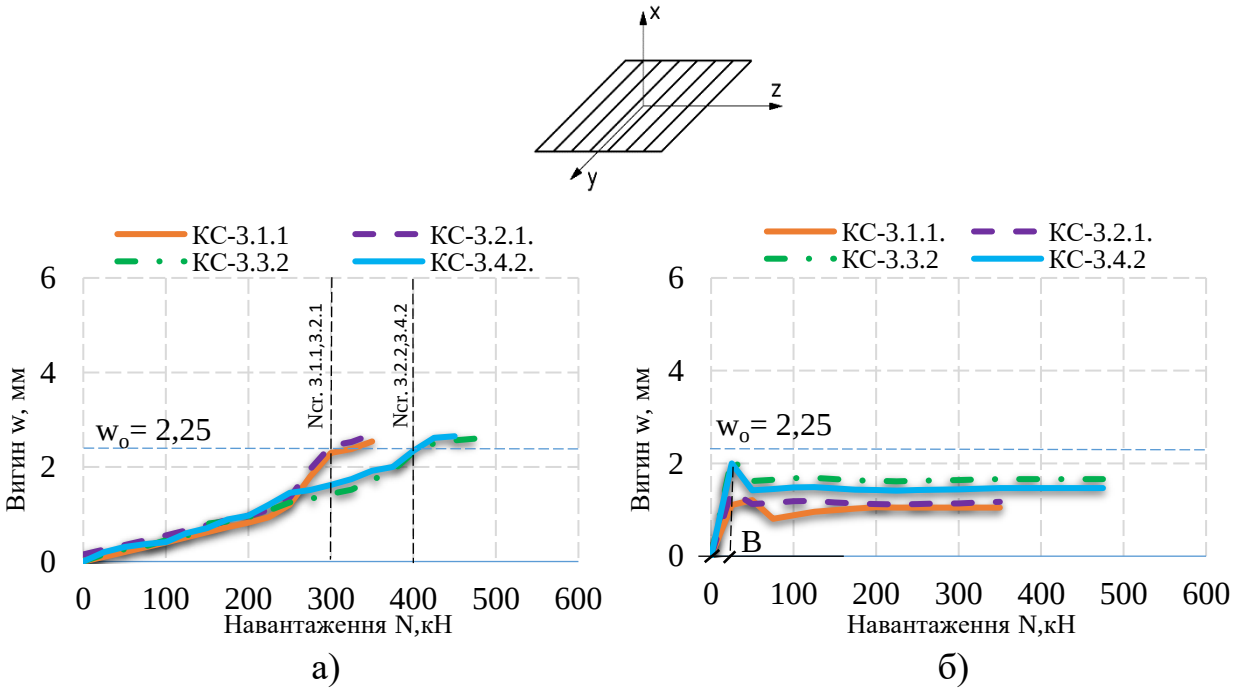


Рис. 3.10. Графіки залежності вигину колон III серії від навантаження в площині: а) «XZ»; б) «XУ»

Зона В - включення в роботу всіх шарів скла в площині обпирання на опорний металевий лист через фанеру в «чобітку»

Усереднена різниця між руйнівним навантаженням колон N_u та навантаженням при появі тріщин N_w для колони марки КС – 3.1.1, КС-3.2.1 становить 21,82%, а для скляних колон КС – 3.3.2 та КС 3.4.2 – 27,6%. Отже, поява перших тріщин в колонах КС-3.1.1 та КС-3.2.1 відбулася при навантажені $N_w = 0{,}78\times N_u$, а для колон КС-3.3.2 та КС-3.4.2 при $N_w = 0{,}72\times N_u$.

Аналогічно до колон I, II серії гранично допустимий вигин прийнято $w_o = l\ /400 = 2.25$ мм.

3.1.4 Колони IV серії

Колони IV серії випробовувались, як центрально стиснуті стержні з шарнірно закріпленими кінцями. Дослідні зразки IV серії перерізом 70×100 мм зруйнувалися при різних навантаженнях, оскільки під час випробування колони марки КС-4.2.2 та КС-4.3.2 було пошкоджено фанерну прокладку товщиною 6 мм у опорному металеву «чобітку», що створило ексцентриситет. Фанерна прокладка пошкодилась внаслідок зношення металевого «чобітка» [7]. Тому, дане закріплення для дослідження стиснутих елементів необхідно використовувати одноразово.

Колона марки КС-4.1.2 зруйнувалася при навантажені N_u=985 кН, колона марки КС-4.2.2 при навантажені N_u=705 кН, колона КС-4.3.2 при N_u=750 кН, та колона марки КС-4.4.2 при N_u=1000 кН відповідно. Характер руйнування зображено на рис. 3.11. Фізичне руйнування скляних колон марки КС-4.1.2 та КС-4.4.2 відбулось аналогічно до колон I,II та III серії (див. розд. 3.1.1). Руйнування скляних колон марки КС-4.2.2 та КС-4.3.2 відбулось раптово від появи вертикальної тріщини в глибині перерізу внаслідок зминання фанери в металевому «чобітку» без видимого вигину. Руйнування відбулось в площині перпендикулярній до клейових швів (рис. 3.11).

Рис. 3.11. Вигляд дослідних зразків після руйнування та складання їх в проектне положення: а) колона марки КС – 4.1.2; б) колона марки КС – 4.2.2; в) КС-4.3.2; г) КС-4.4.2.
т.А-початок руйнування

Розбіжність між результатами випробування дослідних зразків становила 1,5% для колон марки КС-4.1.2 та КС-4.4.2, та 6,38% для колон марки КС-4.2.2, КС-4.3.2. Відкриття першої тріщини колон марки КС-4.1.1 відбулось при навантажені N_w =750 кН, у верхній та нижній приопорній ділянці, для колон марки КС-4.2.2, КС-4.3.2 та КС-4.4.2 при N_w = 600 кН, 650кН та 800 кН відповідно.

Усереднена різниця між руйнівним навантаженням колон N_u та навантаженням при появі тріщин N_w для колони марки КС – 4.1.2, КС-4.4.2 становить 23,86%, а для скляних колони КС – 4.2.2 та КС 4.3.2 – 14,89%. Отже, поява перших тріщин в колонах КС-4.1.2 та КС-4.4.2 відбулася при навантажені N_w = 0,76× N_u, а для колон КС-4.2.2 та КС-4.3.2 при N_w = 0,85×N_u.

Для оцінки несучої здатності побудовано графіки залежності відносних деформацій від напружень, згідно усереднених показів механічних екстензометрів (рис. 3.12).

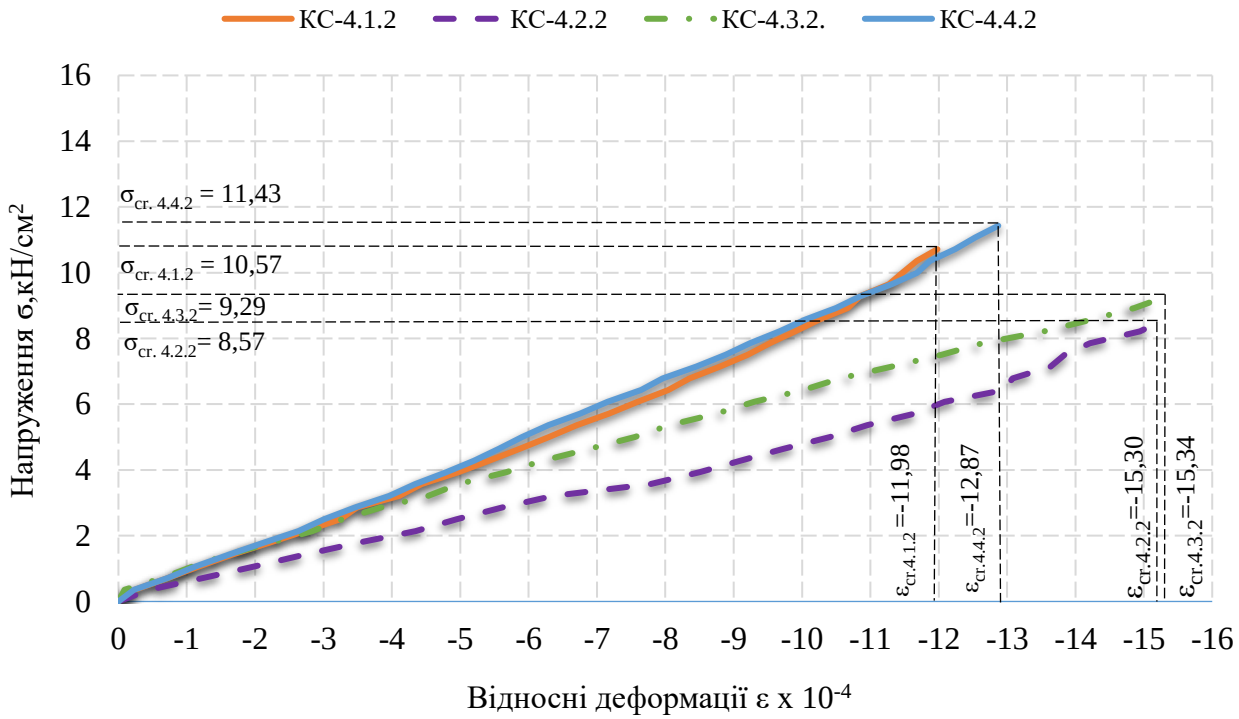
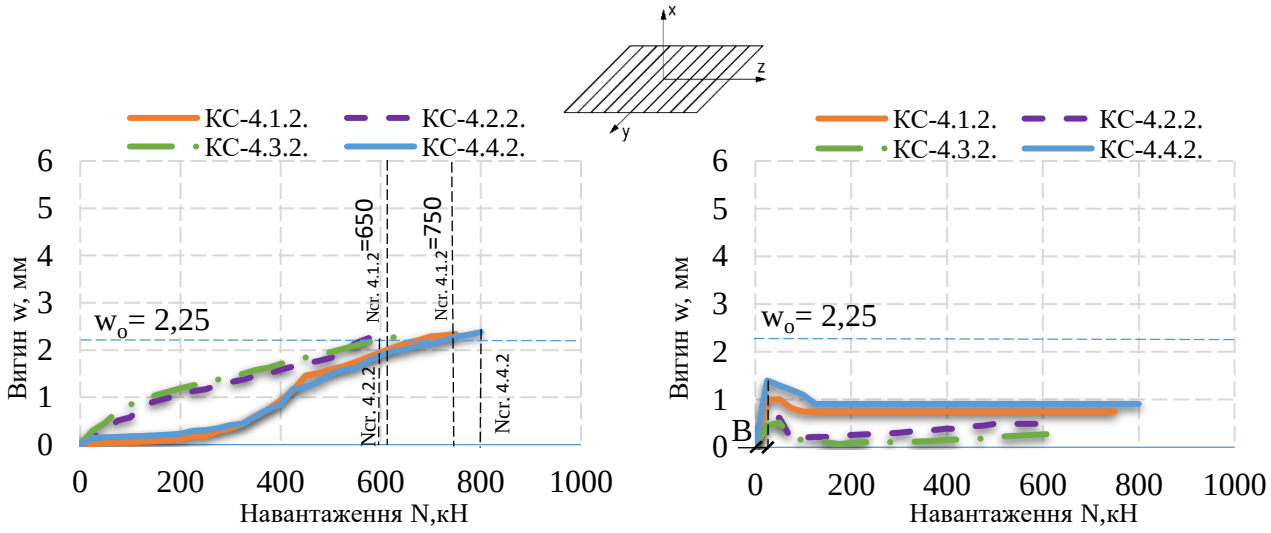


Рис. 3.12. Графіки залежності відносних деформацій колон IV серії від напружень σ=N/A.

Графіки залежності вигину колон в площинах «XZ» та «XY» в залежності від зовнішнього навантаження представлено на рис. 3.13.



а) б)

Рис. 3.13. Графіки залежності вигину колон IV серії від навантаження в площині: а) «XZ»; б) «XУ».
Зона В - включення в роботу всіх шарів скла в площині обпирання на опорний металевий лист через фанеру в «чобітку»

Аналогічно до колон I,II,III серії гранично допустимий вигин прийнято $w_o = l/400 = 2.25$ мм.

3.1.5 Колони V серії

У колонах 5-ї серії було зменшено висоту поперечного перерізу в два рази відповідно до колон 4-ї серії, а випробування виконувалося відповідно до програми експериментального дослідження (див. розд. 2.2.1).

Колона марки КС-5.1.2 зруйнувалась при навантажені N_u=300 кН, колона марки КС-5.2.2 при навантажені у N_u=302,5 кН. Розбіжність між результатами випробування дослідних зразків становила 0,82%. Під час проведення досліджень тріщин не зафіксовано. Графіки залежності відносних деформацій від напружень див. рис. 3.14.

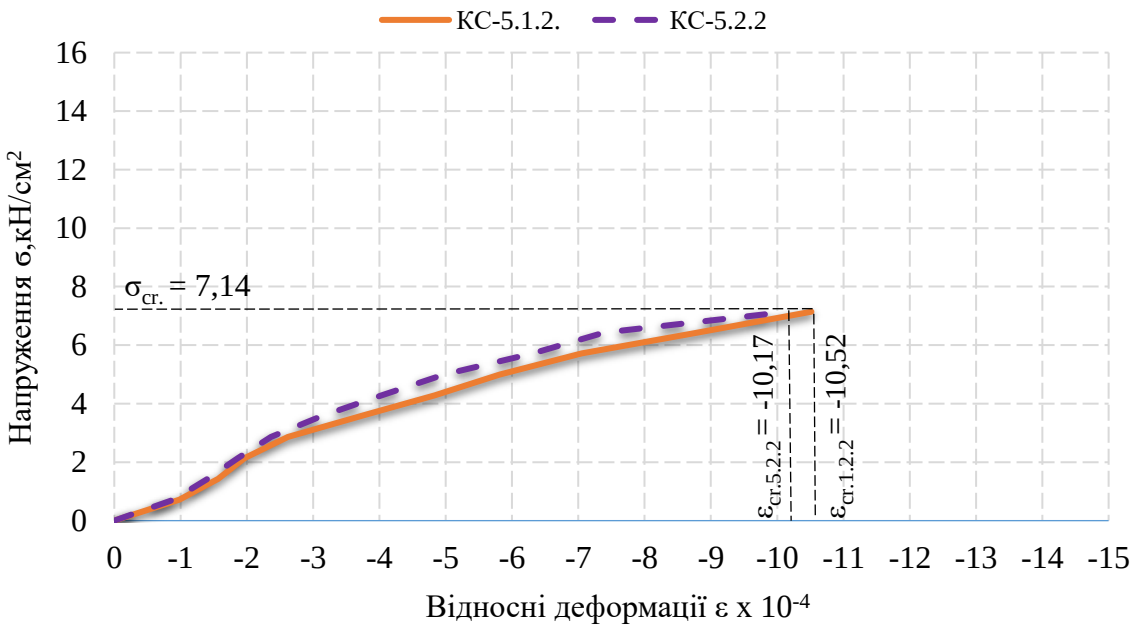


Рис. 3.14. Графіки залежності відносних деформацій колон V серії від напружень σ=N/A.

Всі дослідні зразки 5-і серії зруйнувалися при однакових навантаженнях та з однаковим характером руйнування (рис. 3.15 та рис. 3.16).

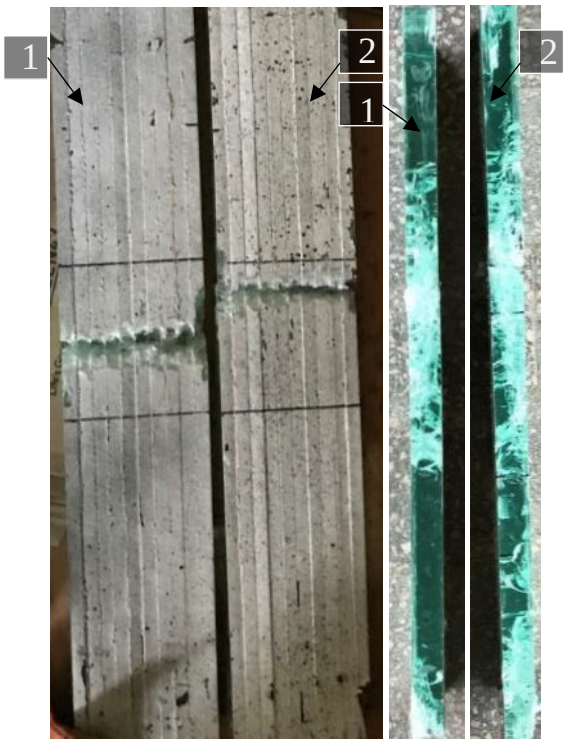


Рис. 3.15. Вигляд колон V серії після руйнування та складання їх в проектне положення: а) фронтальний; б) збоку.
1- колона марки КС-5.1.2; 2- колона марки КС-5.2.2

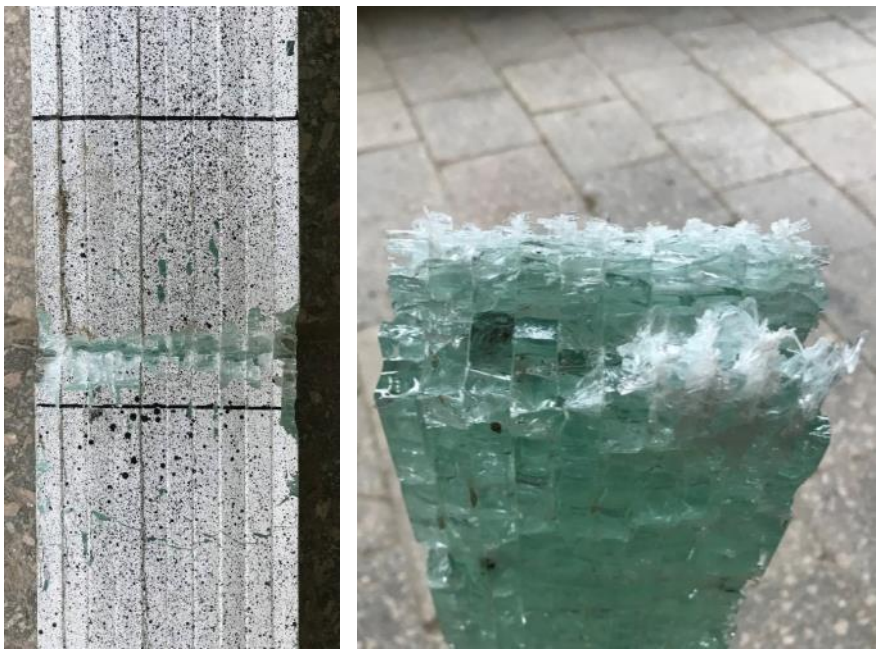
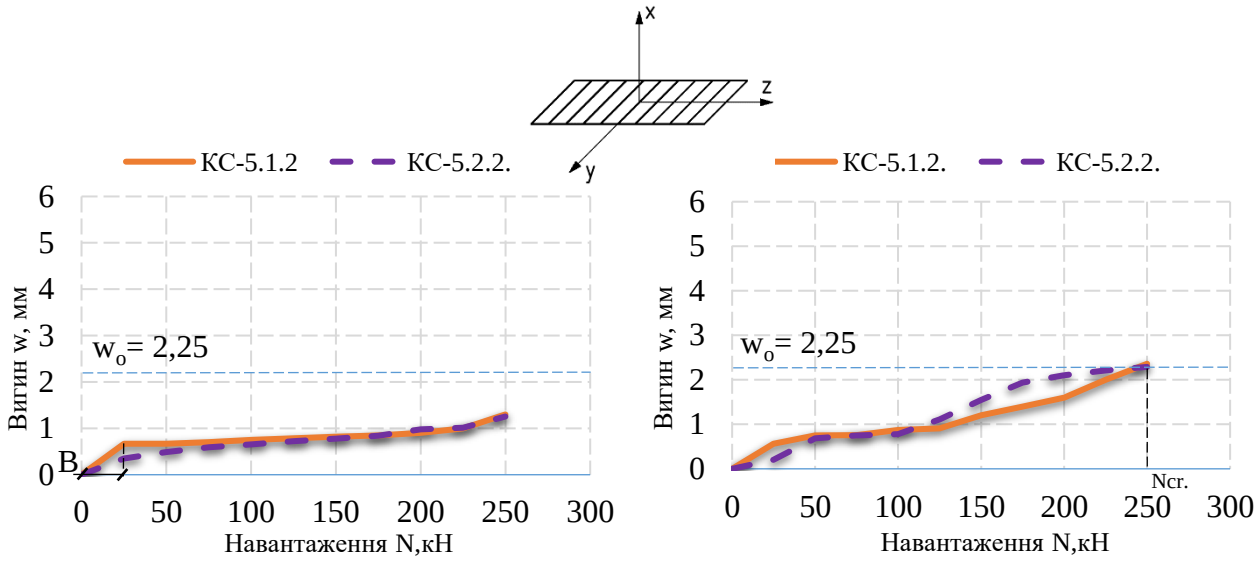


Рис. 3.16. Збільшений вигляд колони марки КС-5.2.2 після руйнування

Графіки залежності вигину колон в площинах «XZ» та «XY» в залежності від зовнішнього навантаження представлено на рис. 3.17.



а) б)

Рис. 3.17. Графіки залежності вигину колон V серії від навантаження в площині: а) «XZ»; б) «XУ».

Зона В - включення в роботу всіх шарів скла в площині обпирання на опорний металевий лист через фанеру в «чобітку»

Аналізуючи результати руйнування колон 5-і серії, можна візуально помітити концентрації напружень (місце зламу колони), у вигляді прямої лінії розповсюдження напружень по всіх скляних шарах колони. Фізичне руйнування дослідних зразків відбулось раптово, без видимого вигину по середині висоти колони в площині «ХУ». У колонах руйнування всіх шарів відбулось одночасно.

Аналогічно до колон I, II, III серії гранично допустимий вигин прийнято $w_o = l$ /400 = 2.25 мм.

3.1.6 Колони VI серії

Колони VI виготовлені, як і більшість колон, виготовлено товщиною 70мм, але збільшено кількість шарів до 12. Дослідження проводилось відповідно до програми експериментального дослідження (див. розд. 2.2.1).

Фізичне руйнування дослідних зразків відбулось аналогічно до колон I…IV серії (див. розд. 3.1.1). Колони даної серії мали вигин у двох площинах, більший із них відбувався у перпендикулярній до шарів скла площині. Характер руйнування дослідних зразків VI серії представлено на рис. 3.18.

Відкриття першої тріщини колон марки КС-6.1.1 відбулось при навантажені N_w = 780 кН, а марки КС-6.2.1 при N_w = 875 кН у верхній та нижній приопорній ділянці. Тріщини у приопорних ділянках розкривались із збільшенням навантаження до моменту руйнування дослідного зразка. Тріщини по всій висоті колони почали уторуватись безпосередньо в момент руйнування дослідного зразка.

Руйнування скляної колони марки КС–6.1.1 відбулось при N_u = 950 кН, а колони марки КС–6.2.1 відбулось при N_u = 1150 кН. Колона марки КС-6.1.1 мала дефект в приопорній ділянці (надщерблений один шар скла), що привело до розбіжності результатів між дослідними зразками.

Усереднена різниця між руйнівним навантаженням колон N_u та навантаженням при появі тріщин N_w для колони становить 20,90%. Отже, поява перших тріщин в колонах відбулася при навантажені N_w = 0,79× N_u.

а) б)

Рис. 3.18. Вигляд дослідних зразків після руйнування та складання їх в проектне положення: а) колона марки КС – 6.1.1; б) колона марки КС – 6.2.1

Графіки залежності відносних деформацій від напружень зображено на рис. 3.19.

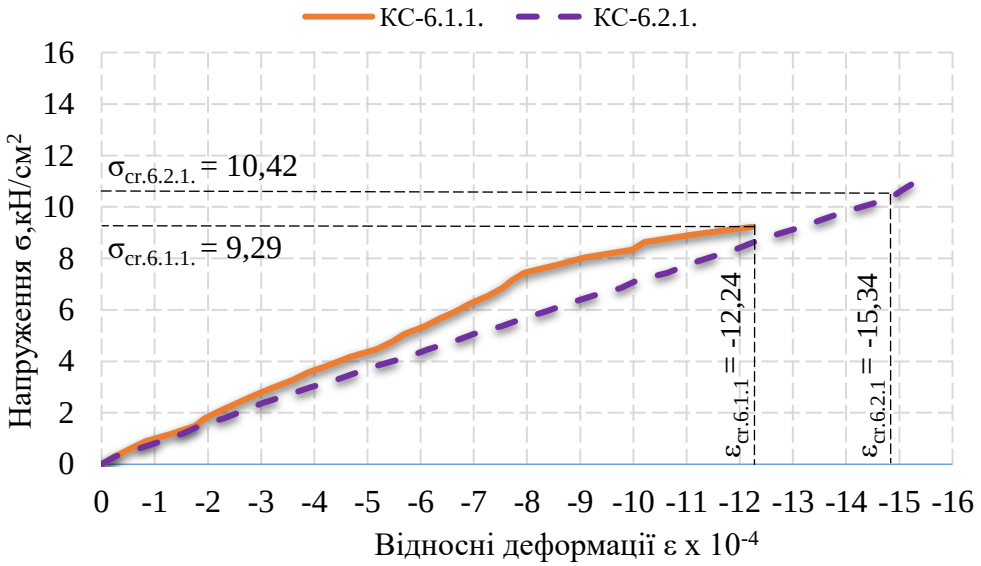
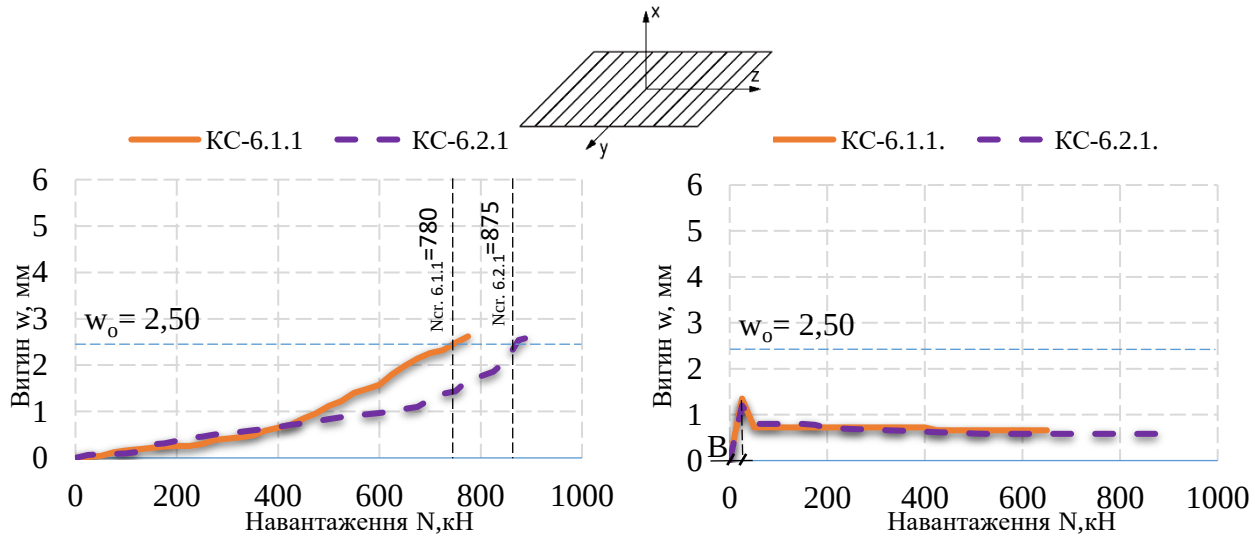


Рис. 3.19. Графіки залежності відносних деформацій колон V серії від напружень σ=N/A.

Графіки залежності вигину колон в площинах «XZ» та «XY» в залежності від зовнішнього навантаження представлено на рис. 3.20.



а) б)

Рис. 3.20. Графіки залежності вигину колон VI серії від навантаження у площині: а) «XZ»; б) «XУ».

Зона В - включення в роботу всіх шарів скла в площині обпирання на опорний металевий лист через фанеру в «чобітку»

Аналогічно до колон I,II,III серії гранично допустимий вигин прийнято $w_o = l/400 = 2.50$ мм.

3.1.7 Колони VII серії

На відміну від колон I…VI дослідні зразки VII виготовлені з термозміцненого скла, а не із звичайного листового скла. Дослідження скляних колон проводилось відповідно до програми експериментального дослідження (див. розд. 2.2.1).

Характер руйнування зображено на рис. 3.21. Колони даної марки мали вигин у двох площинах, більший із них відбувався у перпендикулярній до шарів скла площині.

а) б) г)

Рис. 3.21. Вигляд дослідних зразків після руйнування та складання їх в проектне положення: а) колона марки КС – 7.2.1; б) колона марки КС – 7.3.1; в) Вигляд колони марки КС-7.2.1 при навантажені N_u =680 кН.

Скляні колони марки КС-7.1.1. зруйнувалась при N_u=675 кН, КС-7.2.1 при N_u =680 кН та КС-7.3.1 зруйнувалися N_u =625 кН. Розбіжність між результатами випробування дослідних зразків становила 8,09%. Тріщин під час випробувань не було зафіксовано. У момент руйнування з'явились горизонтальні тріщини по центрі скляної колони, що і привели до руйнування. Колони з термозміцненого скла зруйнувались більш еластичніше в порівнянні з колонами серій I…VI. Під час руйнівного навантаження всіх колон VII серії утворився видимий вигин з розкриттям горизонтальних тріщин, який спостерігався орієнтовно 180 секунд, після чого відбулось руйнування характерне, як для термозміцненого скла.

Графіки залежності відносних деформацій від напружень зображено на рис. 3.22, а графіки залежності вигину колон в площинах «XZ» та «XY» в залежності від зовнішнього навантаження представлено на рис. 3.23.

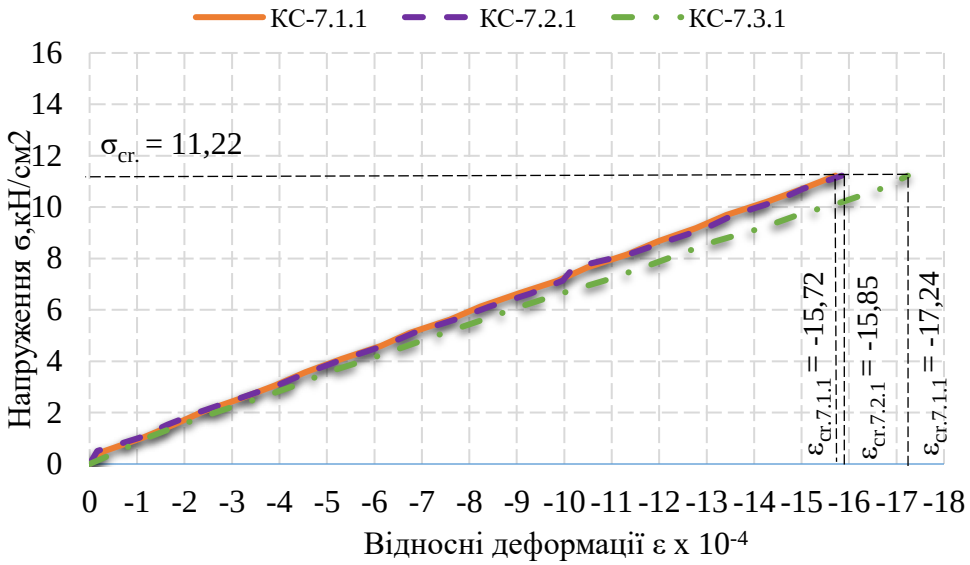
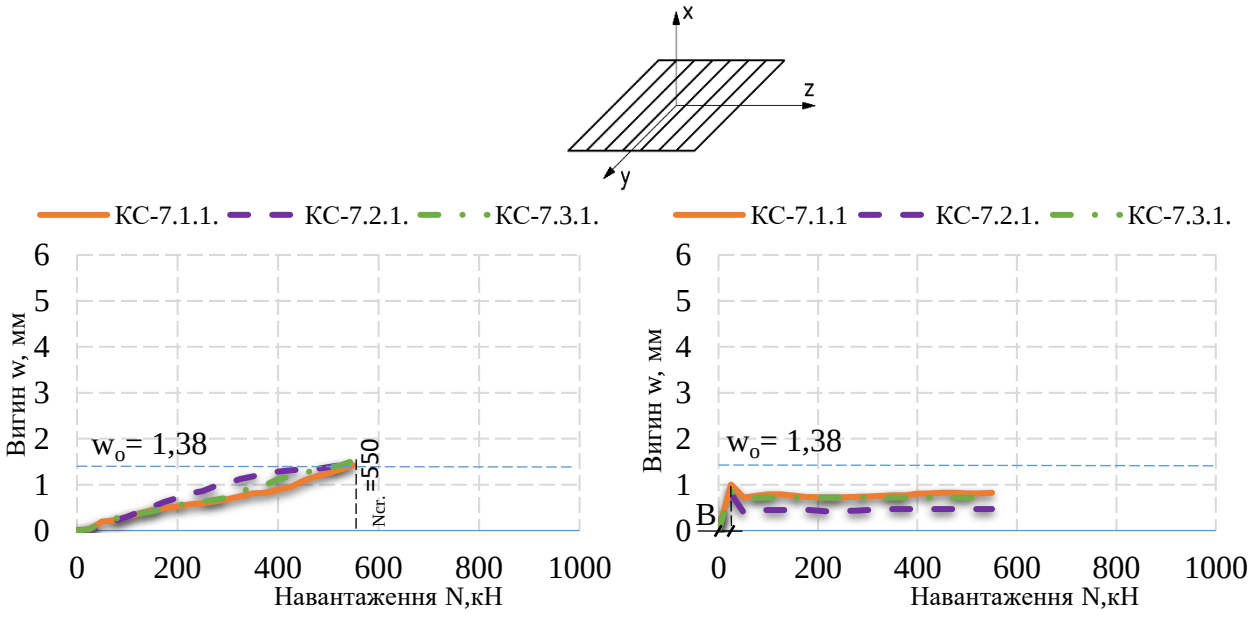


Рис. 3.22. Графіки залежності відносних деформацій колон VII серії від напружень.



а) б)

Рис. 3.23. Графіки залежності вигину колон VII серії від навантаження в площині: а) «XZ»; б) «XУ».

Зона В - включення в роботу всіх шарів скла в площині обпирання на опорний металевий лист через фанеру в «чобітку»

Як видно з рис. 3.23 скляні колони VII серії виготовлені зі термозміцненого скла, мали значно менший вигин, порівняно з колонами, виготовленими із звичайного скла.

3.1.8 Колони VIII серії

На відміну від колон I…VII дослідні зразки VIII виготовлені з гартованого скла, а не звичайного листового скла. Дослідження скляних колон проводилось відповідно до програми експериментального дослідження (див. розд. 2.2.1).

Скляні колони марки КС-8.1.1. зруйнувалися при N_u=720 кН, КС-8.2.1 при N_u =725 кН. Розбіжність між результатами випробування дослідних зразків становила 0,69%.Характер руйнування зображено на рис. 3.24.

а) б)

Рис. 3.24. Характер руйнування дослідних колон VIII серії : а) колона марки КС – 8.1.1; б) вигляд вертикальних тріщин колони марки КС – 8.2.1.

Графіки залежності відносних деформацій від напружень зображено на рис. 3.25.

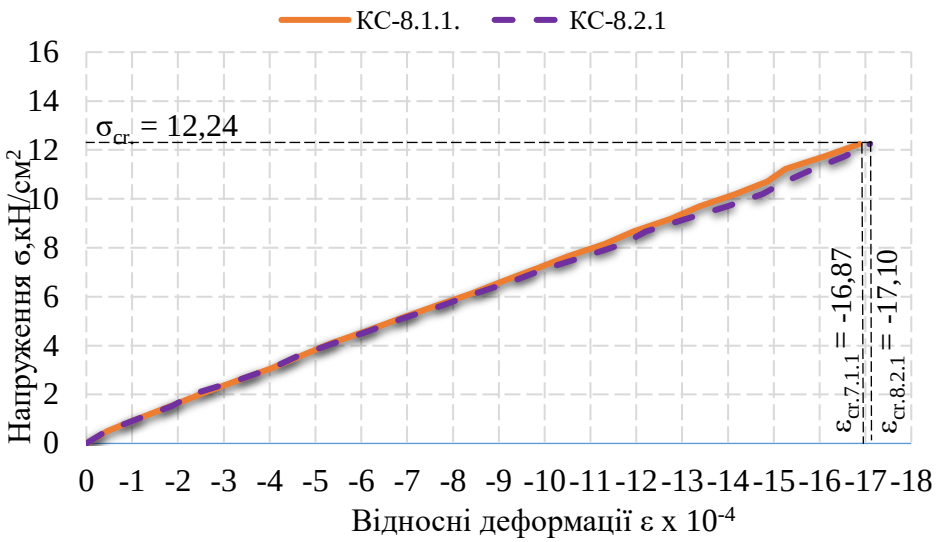


Рис. 3.25. Графіки залежності відносних деформацій колон VIII серії від напружень.

Графіки залежності вигину колон в площинах «XZ» та «XY» в залежності від зовнішнього навантаження представлено на рис. 3.26.

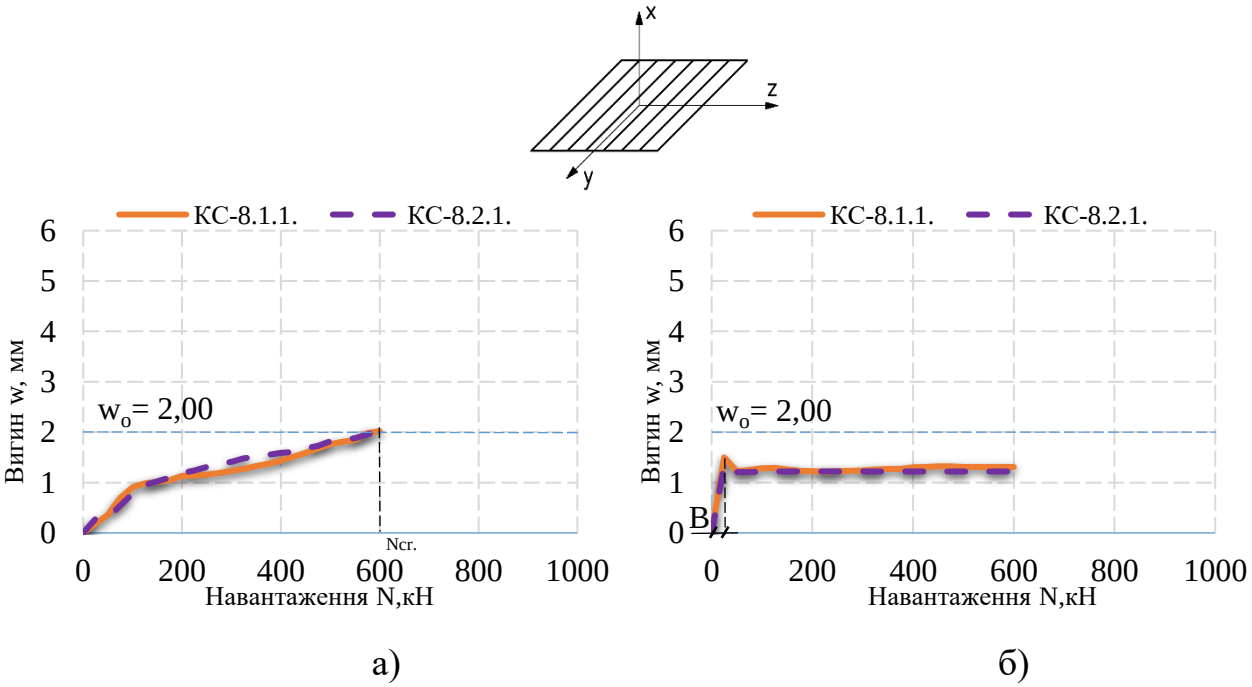


Рис. 3.26. Графіки залежності вигину колон VIII серії від навантаження в площині: а) «XZ»; б) «XУ».

Зона В - включення в роботу всіх шарів скла в площині обпирання на опорний металевий лист через фанеру в «чобітку»

Колони даної серії мали вигин у двох площинах, більший із них відбувався у перпендикулярній до шарів скла площині. Колони даної серії мали вигин у двох площинах, більший із них відбувався у перпендикулярній до шарів скла площині.

Появу тріщин під час випробувань не було зафіксовано. Під час руйнівного навантаження у всіх колонах VIII серії утворився видимий вигин без тріщин, який спостерігався впродовж 3-4 секунд. Після чого по всій висоті скляної колони відкрились тріщини у вигляді павутини та дослідний зразок розлетівся на багато дрібних уламків з тупими гранями, що характерно при руйнуванні гартованого скла.

3.2 Аналіз результатів досліджень стиснутих скляних колон

Критерій вичерпання несучої здатності був однаковий для всіх дослідних колон. Ним є експериментальний критерій, тобто втрата рівноваги між зовнішніми та внутрішніми зусиллями. Втрата рівноваги відповідає максимуму на графічних залежностях деформацій найбільш стиснутого скла від зовнішніх зусиль.

Критерієм для аналізу експлуатаційної придатності за граничним вигином було взято вигин, при якому відкрилась перша тріщина. Гранично допустимий вигин для скляних колон, виготовлених із звичайного скла, прийнято $w_o = l$ /400. У таблиці 3.1 наведено зведені результати експериментальних досліджень для всіх стиснутих скляних колон.

Таблиця 3.1

Значення навантажень та вигинів скляних багатошарових колон

№	Серія	Марка колони	Тип закр.	Несуча здатність N_u, кН	Навантаження при граничному вигині, N_w (кН)		Напруження максимальне кН/см^2, кН	Вигин, w_{cr}^{exp}, мм
					зразка	середні		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	I	КС-1.1.1	Пружно-податливе закріплення опор	790	650	737,5	11,285	2,51
2		КС-1.2.1		1030	825		14,71	2,53
3	II	КС-2.1.1		270	175	175	7,714	2,54
4		КС-2.2.1		265	175		7,571	2,53
5	III	КС-3.1.1		382,5	300	300	7,806	2,3
6		КС-3.2.1		385,0	300		7,857	2,45
7		КС-3.3.2	Шарнірне закріплення опор	580	400	400	11,83	2,31
8		КС-3.4.2		525	400		10,71	2,34
9	IV	КС-4.2.2		705	600	612,5	14,071	2,34
10		КС-4.3.2		750	625		10,071	2,31
11		КС-4.1.2		985	750	775	10,71	2,34
12		КС-4.4.2		1000	800		14,29	2,38
13	V	КС-5.1.2		300	250	250	8,57	2,36
14		КС-5.2.2		302,5	250		8,64	2,29
15	VI	КС-6.1.1	Пружно-податливе закріплення опор	950	780	827,5	11,310	2,62
16		КС-6.2.1		1150	875		13,69	2,72
17	VII	КС-7.1.1		675	550	550	13,78	1,42
18		КС-7.2.1		680	550		13,88	1,45
19		КС-7.3.1		625	550		12,76	1,52
20	VIII	КС-8.1.1		720	600	600	14,69	2,02
21		КС-8.2.1		725	600		14,80	2,05

Згідно з результатами проведених експериментальних досліджень стиснутих скляних колон можна зробити наступні висновки:

1. Руйнування дослідних зразків, виготовлених зі звичайного скла, були внаслідок відкриття горизонтальних тріщин по середині висоти колони та на приопорних ділянках. Аналізуючи результати руйнування колон двох серій різних перерізів, а саме ширини колони, варто зазначити різницю у характері руйнування даних елементів. Можна візуально помітити різницю у точці концентрації напружень (місце зламу колони) та площини, у якій зруйнувався дослідний зразок, для обох типів зразків вона є різною: для колон серії I…IV концентрація має діагональне розповсюдження по всіх скляних шарах колони навіть при наявності ексцентриситету та руйнування відбулось в площині «XZ»; для колон V серії – це пряма лінія та руйнування відбулось в площині «XY».

2. У загальному характер руйнування відповідав 3-м видам:

- горизонтальні тріщини по середині висоти колони та на приопорних ділянках (рис. 3.27, а);
- горизонтальні тріщини по середині висоти колони та на приопорних ділянках з вторинними тріщинами у вигляді павутини з чисельними дрібними частинами (рис. 3.27, б);
- тріщини у вигляді павутини з чисельними дрібними частинами (рис. 3.27, в).

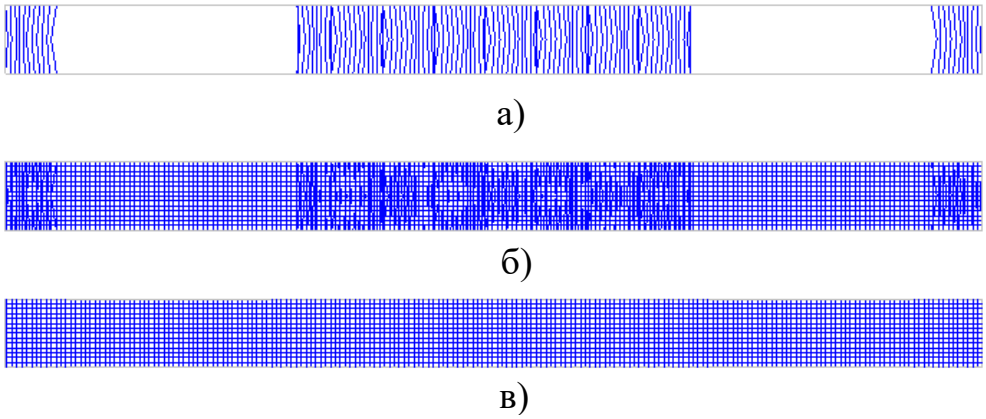


Рис. 3.27. Характер руйнування шарів скла скляних колон: а) – звичайне скло; б) – термозміцнене скло; в) – гартоване скло.

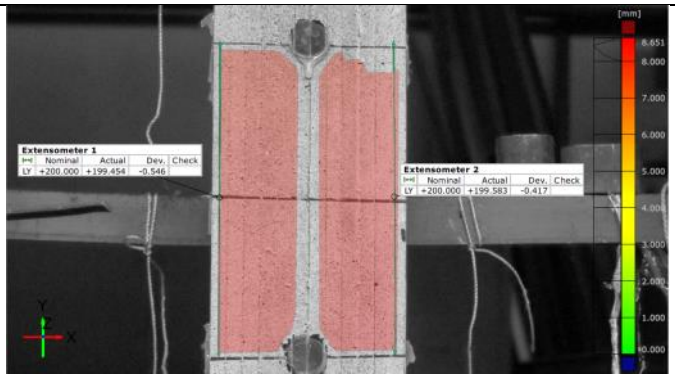
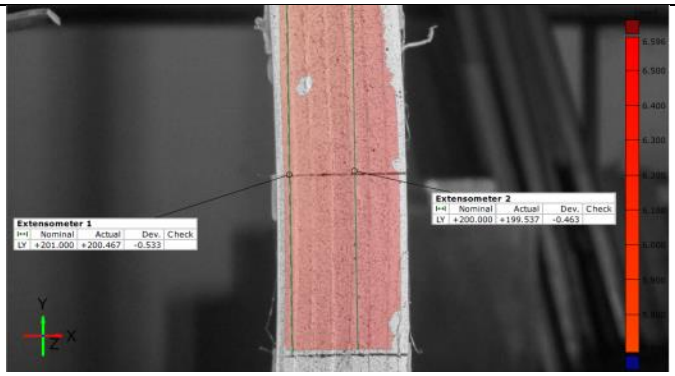
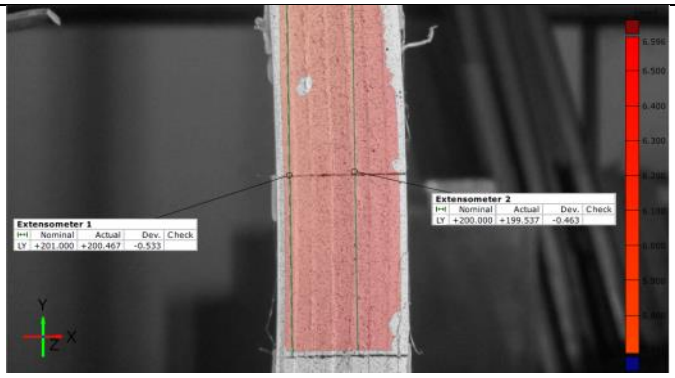
3. Скляні колони, виготовлені з гартованого скла, мають несучу здатність більшу на 47,06% від звичайного і на 8,6% від термозміцненого.

3.3 Результати вимірювання поздовжніх деформацій стиснутих скляних колон за допомогою методу двовимірної кореляції цифрових зображень та їх аналіз

Порівняльний аналіз полів деформацій для колон марок КС-6.2.1, КС-7.1.1 та КС-8.1.1, отриманих згідно методу двовимірної кореляції цифрових зображень при останньому етапі навантаження наведені в таблиці 3.2.

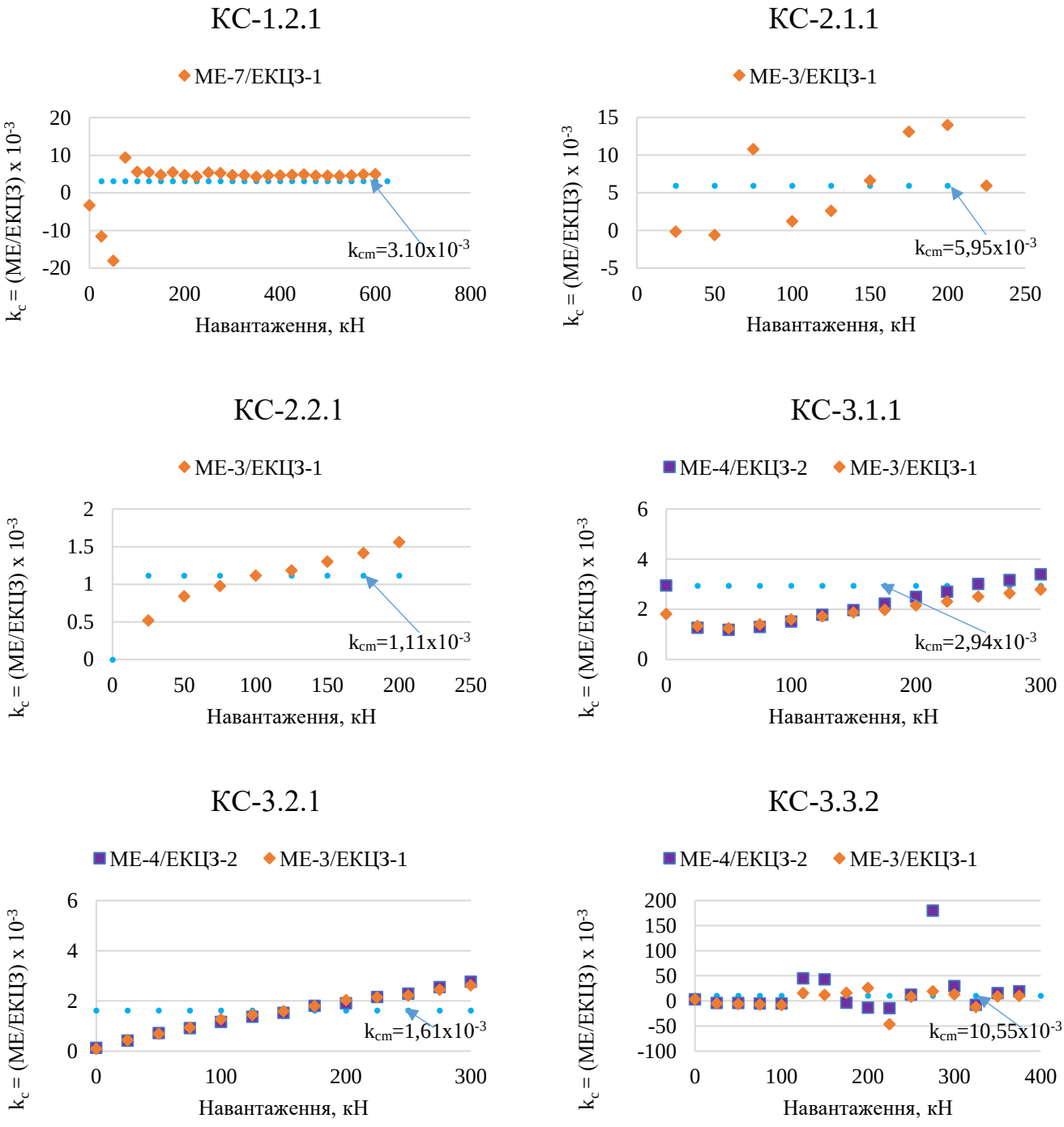
Таблиця 3.2

Поля відносних деформацій на поверхні скляної колони

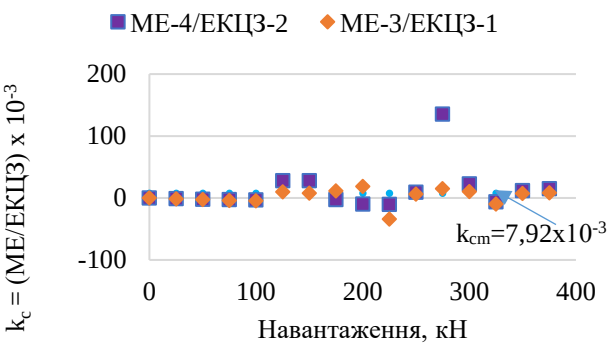
Колона марки	Вигляд полів деформацій на останньому ступеню навантаження	Критичні навантаження, N_{cr}, кН	Відносні деформації для ЕКЦЗ-1/ЕКЦЗ-2
КС-6.2.1.		1125	-0,533/-0,463
КС-7.1.1.		650	-0,546/-0,417
КС-8.1.1.		700	-0,331/-0,408

Аналіз полів деформацій показав рівномірне стискання всіх шарів скла колон.

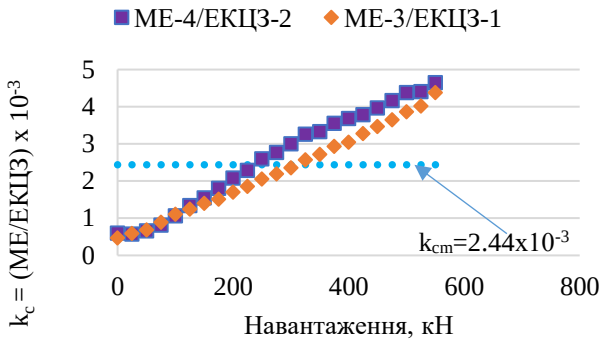
Для перевірки достовірності результатів методу двовимірної кореляції цифрових зображень у всіх скляних колонах, де він використовувався на однакових ступенях навантаження, було проведено порівняння значень екстензометрів КЦЗ (ЕКЦЗ) з механічними екстензометрами (МЕ) (рис. 3.28).



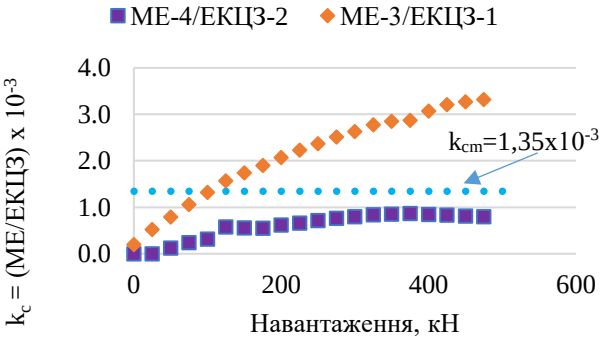
КС-3.4.2



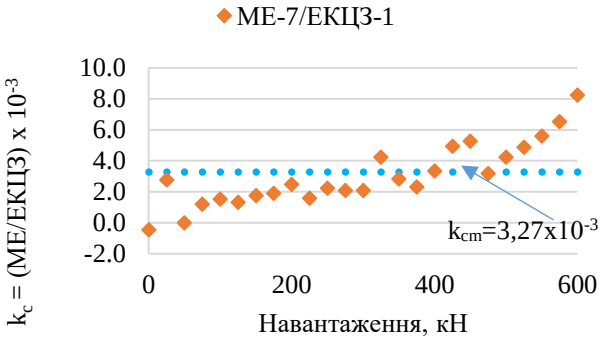
КС-4.1.2



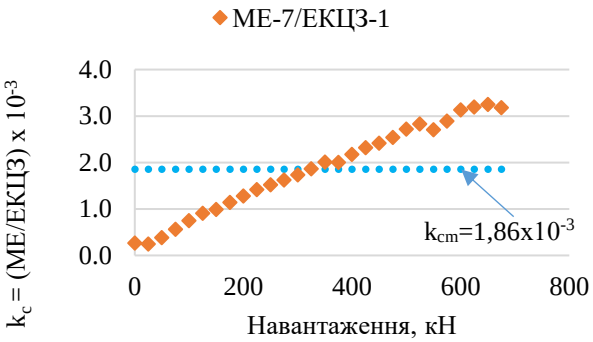
КС-4.2.2



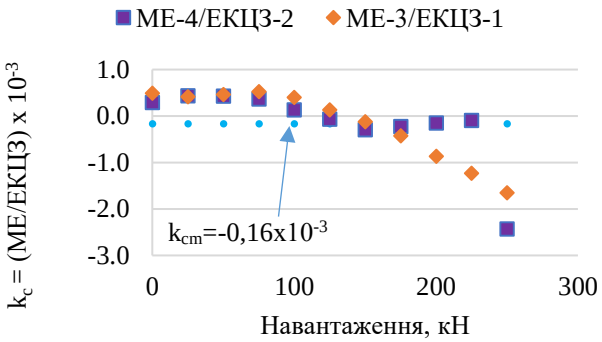
КС-4.3.2



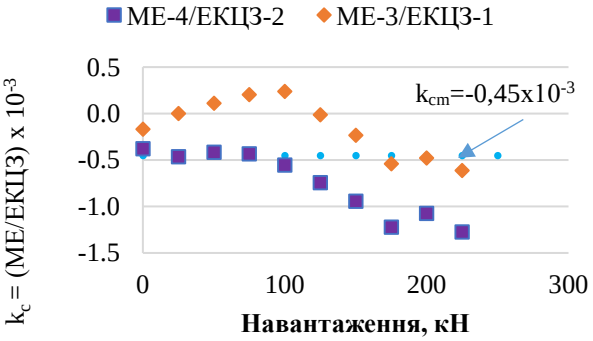
КС-4.4.2



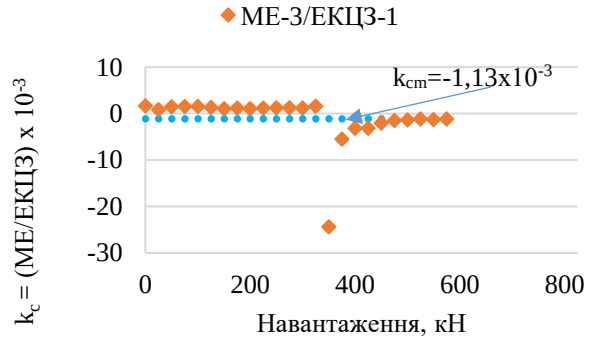
КС-5.1.2



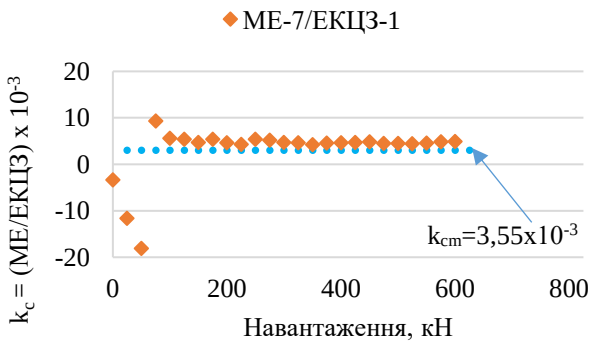
КС-5.2.2



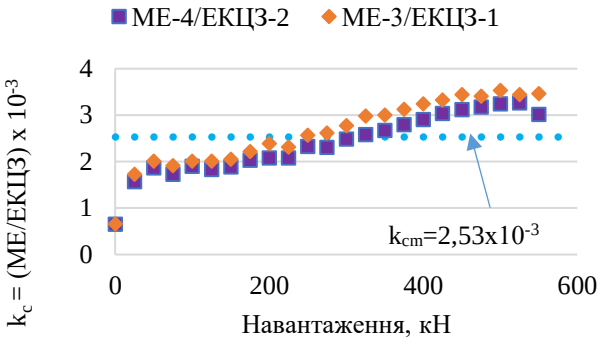
КС-6.1.1



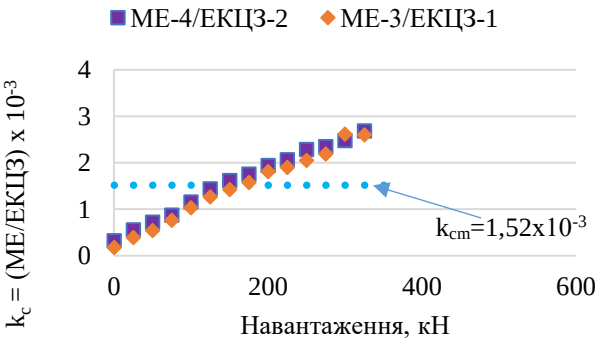
КС-6.2.1



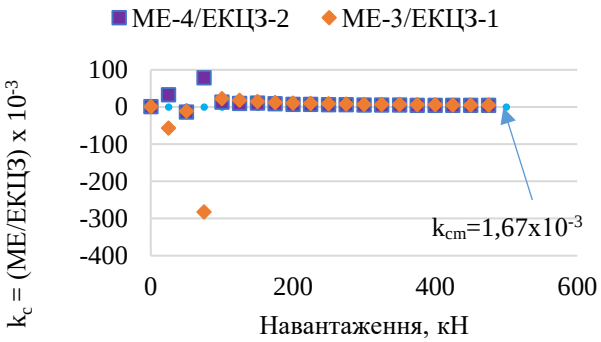
КС-7.1.1



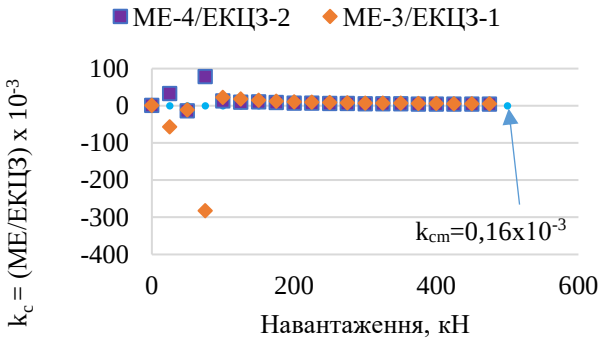
КС-7.2.1



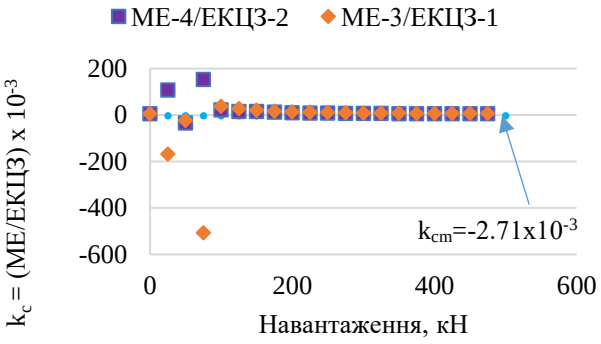
КС-7.3.1



КС-8.1.1



КС-8.2.1



k_{cm} – середнє значення k_c=МЕ/ЕКЦЗ, де *МЕ* – відносні деформації за показами механічного екстензометра; *ЕКЦЗ* – відносні деформації за показами цифрового екстензометра.

Рис. 3.28. Порівняння показів відносних деформацій екстензометрів КЦЗ (ЕКЦЗ) з механічними екстензометрами (МЕ)

Порівняльний аналіз результатів заміру відносних деформацій за допомогою двовимірної кореляції цифрових зображень та механічними приладами не виявив закономірностей, які б можна було описати простими математичними функціями, що ускладнило подальшу обробку результатів даного методу.

Як бачимо із графіку на рис. 3.28 існує видима різниця в показах відносних деформацій для двох різних способів заміру. Причиною цього можна вважати, перш за все, тип кореляції. Можливо, у даному випадку досліджень значно краще покаже себе тривимірна кореляція зображень, оскільки колони деформуються в напрямку трьох осей у просторі, а двовимірна КЦЗ заміряє деформації лише в одній площині, тобто деформування по двох осях. Також, варто зазначити, що метод двовимірної КЦЗ не є достатньо точним через необхідність застосування високоточних оптичних приладів та суттєвих впливів зовнішнього середовища, але характер відносних деформацій завжди збігається із характером на механічних приладах.

За результатами проведених досліджень деформацій, стиснутих скляних колон за допомогою двовимірної КЦЗ, можна зробити наступні висновки:

1. Використання двовимірної кореляції зображень не є ефективним при дослідженні скляних колон на центральний стиск, оскільки двовимірна КЦЗ не може врахувати переміщення дослідного зразка в просторі по трьох осях.

2. До переваг використання методу кореляції, згідно даних експериментів, можна віднести гнучкість подання результатів та колосальний запас збереженої інформації. Оскільки в подальшому є значно більша перспектива для обробки не тільки відносних деформацій, а ще й іншого ряду деформаційних характеристик досліджуваного елементу. Наступною перевагою є зручність подання інформації – візуальне сприйняття значно приємніше для спостерігача. Цей метод дозволяє отримувати повну візуальну картину деформування конструкції, дозволяє зменшити трудомісткість та охопити всі стадії завантаження до моменту руйнування.

3.4 Фізико-механічні характеристики матеріалів стиснутих скляних колон

Відповідно до програми експериментальних досліджень (див. розділ 2.2.3 2.2.5 2.2.4) отримано фізико-механічні характеристики матеріалів скляних колон.

3.4.1 Результати випробовування міцності скла на стиск

Випробувано дослідні зразки (див. розд. 2.1.2) за методикою описаною в розділі 2.2.3.

Характерні види руйнування дослідних зразків кубів та призм зі скла наведений на рис. 3.29.

а) б)

Рис. 3.29. Характер руйнування дослідних зразків: а) серії І; б) серії ІІ.

Результати дослідження скляних кубів та призм, наведених у протоколах дослідження, подано у таблиці 3.3. Міцність кубів та призм зі скла обчислена згідно формули (2.1).

Таблиця 3.3.

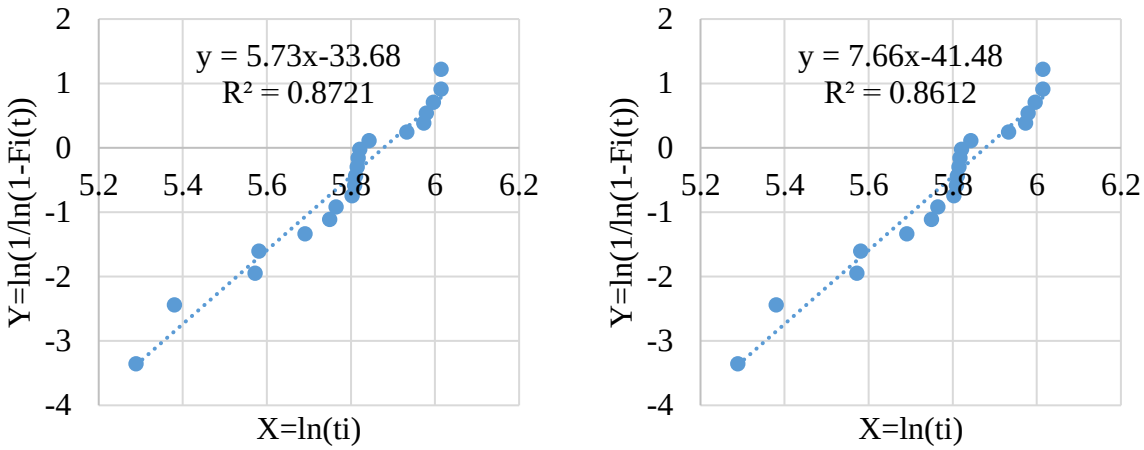
Протокол дослідження скляних кубів та призм на стиск

Марка	Руйнівне навантаження N_u, кН		Міцність на стиск кубів $f_{ck,cube}$, МПа	Міцність на стиск призм $f_{ck,prism}$, МПа	Середні міцності на стиск, МПа
	зразка	середні			
К-1	248	294.75	262.98	н/п	330.42
К-2	206.08		216.97		
К-3	284		313.92		
К-4	330		377.28		
К-5	296.8		335.12		
К-6	258.4		296.13		
К-7	304.8		344.62		
К-8	234.6		265.25		
К-9	296		335.92		
К-10	296.4		337.15		
К-11	350		401.91		
К-12	338		395.06		
К-13	290		333.24		
К-14	308		331.09		
К-15	356		409.08		
К-16	206		198.07		
К-17	270		318.84		
К-18	356		409.08		
К-19	342		392.72		
К-20	324		333.91		
П-1	198.86	185.62	н/п	227.20	212.12
П-2	176.18			202.58	
П-3	196.084			224.03	
П-4	196.82			225.63	
П-5	183.2			210.02	
П-6	200.11372			228.79	
П-7	203.2			233.58	
П-8	193.4			222.09	
П-9	232			267.68	
П-10	174.6			200.02	
П-11	150			169.21	
П-12	248			282.67	
П-13	166			187.13	
П-14	138			158.25	
П-15	192			220.10	
П-16	156			172.27	
П-17	204			232.92	
П-18	168			195.90	
П-19	152			174.32	
П-20	184			208.04	

Міцність скляних кубів на стиск була в межах $f_{ck,cube}$ = 198,07-403,08 МПа, а призм $f_{ck,prism}$ = 158,25-282,67 МПа.

Спостерігали великий розкид значень міцності скла на стиск для його аналізу використали ймовірнісно-статистичний метод на основі закону двопара \метричного розподілу Вейбулла для оцінки даних (див. розд. 2.2.6).

Для аналізу міцності скла побудовано діаграму Вейбулла (рис. 3.30) для кожної випробувальної серії, що представляє кумулятивні ймовірності руйнування $F_{i(t)}$, як функцію застосованого напруження $(t_i,)$ у вигляді прямої лінії, рівняння якої описано згідно (2.11).



а) б)

Рис. 3.30. Діаграма Вейбулла для розподілу міцності дослідних зразків: а) I серії; б) II серії.

Для аналізу міцності скла на стиск для I та II серії дослідних зразків добре підходить розподіл Вейбулла, оскільки R^2 близька до одиниці. Параметри розподілу Вейбула, визначені з наведеного вище графіка, представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Відповідно до розподілу Вейбулла основні статистичні показники міцності скла на стиск

Характеристика міцності	Серія дослідних зразків	
	I	II
Модуль Вейбулла $\beta=m$	5.73	7.66
Параметр b $b=-\beta\cdot\ln(\eta)$	-33.68	-41.48
Згідно з Вейбуллом характеристична міцність, Мпа $\eta=\exp\left(-\frac{b}{\beta}\right)$	356.94	225.39
Середня міцність, МПа $\mu(t)=M(t)=t$	330.42	212.12
Характеристична міцність, МПа $f_{5\%}=\eta\left(\ln\left(\frac{1}{1-0.05}\right)\right)^{\frac{1}{\beta}}=\eta\left(-\ln(1-0.05)\right)^{\frac{1}{\beta}}$	212.57	152.91

Отже, характеристична міцність звичайного скла на стиск становила $f_{ck,cube,5\%}$ = 212,57 МПа, а міцність скляної призми $f_{ck,prism,5\%}$ = 152,91 МПа. Співвідношення призмової міцності скла і кубової склала 152,91/212,57 = 0,7193 ≈ 0,72. Тоді, $f_{ck,prism,5\%}=0{,}72f_{ck,cube,5\%}$.

Згідно з результатами показників тензодатчиків було знайдено реальний модуль пружності за формулою (2.2) та коефіцієнт Пуассона (2.3). Результати наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5.

Експериментальні значення модуля та коефіцієнту Пуассона для скла

Марка	Модуль пружності Е, x10^{10} Па		Коефіцієнт Пуассона, ν	
	зразка	середні	зразка	середні
П-6	6,55	6,55	0,248	0,25
П-7	6,57		0,251	
П-8	6,54		0,247	
П-9	6,58		0,249	
П-10	6,51		0,253	

Коефіцієнт Пуассона для досліджуваного звичайного скла склав ν=0,25, а модуль пружності E_{ck}=6,55x10^{10} Па = 65 500,00 МПа = 6,55x10^{4} МПа.

3.4.2 Результати випробовувань міцності скла на розтяг при згині

Випробування виконано за методикою відповідно до п. 2.2.4 дослідних зразків (див. п. 2.1.3). У всіх проведених експериментах початок руйнування був по центрі зразка. На рис. 3.31 показані вигляди поверхонь руйнувань трьох серій дослідних зразків.

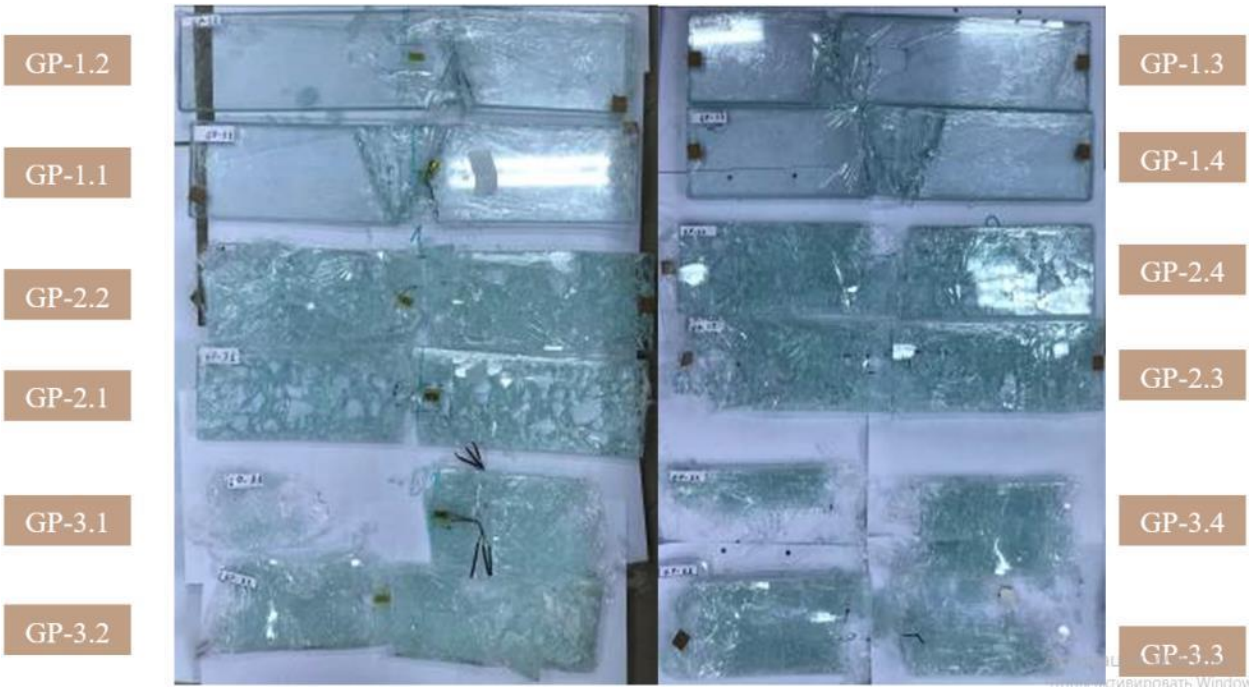


Рис. 3.31. Вигляд дослідних зразків після руйнування.

Характер руйнування дослідних зразків схожий до високо- та середньо міцної кераміки (згідно з [29]). У зразках II серії, виготовлених із термозміцненого скла, після початку руйнування відкрилась павутина тріщин орієнтовним розміром 4х4 мм, а для зразків III серії, виготовлених із гартованого скла, павутина була орієнтовним розміром 1х1 мм (рис. 3.32).

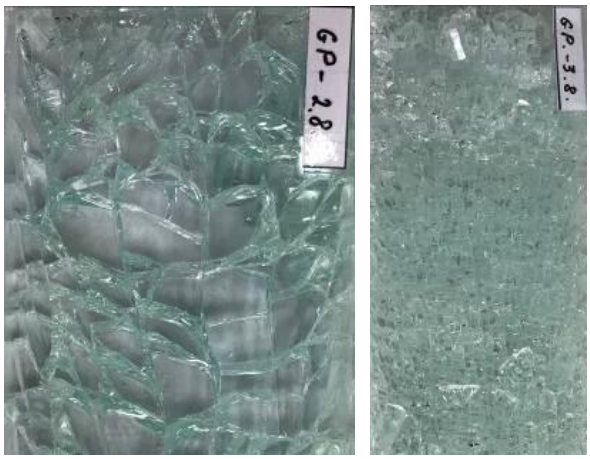
Результати випробувань, а також знайдені значення міцності на розтяг при згині σ_{flex} згідно рівняння (2.4), швидкості наростання максимального напруження відповідно до рівняння (2.5) та модуль пружності двома методиками за допомогою рівнянь (2.6) та (2.7) відповідно наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6.

Результати проведених досліджень міцності на розтяг при згині

Серія	Марка	Максим. Навант. F_{max}, кН	Максим. прогин, мм [f]	Міцність на розтяг σ_{flex}, N/mm^2 (MPa)	Модуль пружності аналітичний метод, x10^{10}Па	Модуль пружності за законом Гука, x10^{10}Па	Темп збільшення навантаження N/s	Швидкість наростання максим. напруження, MPa/s
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	GP-1.1	1,1675	3.73	78.81	7.13	7.24	10	0.68
	GP-1.2	0,9881	3.32	66.70	6.78	6.64		0.68
	GP-1.3	1,2528	3.91	84.56	7.30	7.20		0.68
	GP-1.4	1,3167	4.41	88.88	6.80	6.70		0.68
	GP-1.5	1,0655	3.38	71.92	7.18	7.23		0.68
	GP-1.6	1,3946	4.53	94.14	7.01	7.15		0.68
	GP-1.7	1,0901	3.43	73.58	7.24	7.11		0.68
	GP-1.8	0,8955	2.81	60.45	7.26	7.12		0.68
	GP-1.9	1,2746	4.41	86.04	6.58	6.46		0.68
	GP-1.10	1,0234	3.26	69.08	7.15	7.09		0.68
II	GP-2.1	1,5813	5.39	106.74	6.68	6.75		0.68
	GP-2.2	2,4371	7.88	164.50	7.05	7.20		0.68
	GP-2.3	2,3926	7.91	161.50	6.89	6.98		0.68

1	2	3	4	5	6	7	8	9
II	GP-2.4	2,0231	6.47	136.56	7.12	7.24	10	0.68
	GP-2.5	1,7115	5.5	115.53	7.09	7.18		0.68
	GP-2.6	1,8438	5.96	124.46	7.05	7.12		0.68
	GP-2.7	2,5009	8.51	168.81	6.70	6.95		0.68
	GP-2.8	2,2565	7.62	152.31	6.75	6.71		0.68
	GP-2.9	1,8074	5.9	122.00	6.98	6.85		0.47
	GP-2.10	3,1277	10.49	211.12	6.79	6.61		0.47
III	GP-3.1	4,2007	13.55	283.55	7.06	7.15	10	0.68
	GP-3.2	3,0634	10.05	206.78	6.94	7.05		0.68
	GP-3.3	2,5711	8.5	173.55	6.89	6.98		0.68
	GP-3.4	3,3425	11.07	225.62	6.88	7.02		0.68
	GP-3.5	3,2338	10.49	218.28	7.02	7.20		0.68
	GP-3.6	3,779	12.53	255.08	6.87	6.96		0.68
	GP-3.7	2,7398	8.77	184.94	7.12	7.24		0.68
	GP-3.8	3,2428	10.82	218.89	6.83	6.94		0.68
	GP-3.9	2,3479	7.58	158.48	7.06	7.21		0.68
	GP-3.10	2,7523	9.17	185.78	6.84	6.97		0.68



а) б)

Рис. 3.32. Характер розкриття тріщин дослідних зразків: а) II серії; б) III серії.

Для дослідних зразків I серії, виготовлених із звичайного скла, міцність скла на розтяг при згині була в межах 60,45-94,14 Мпа, для II серії з термозміцненого

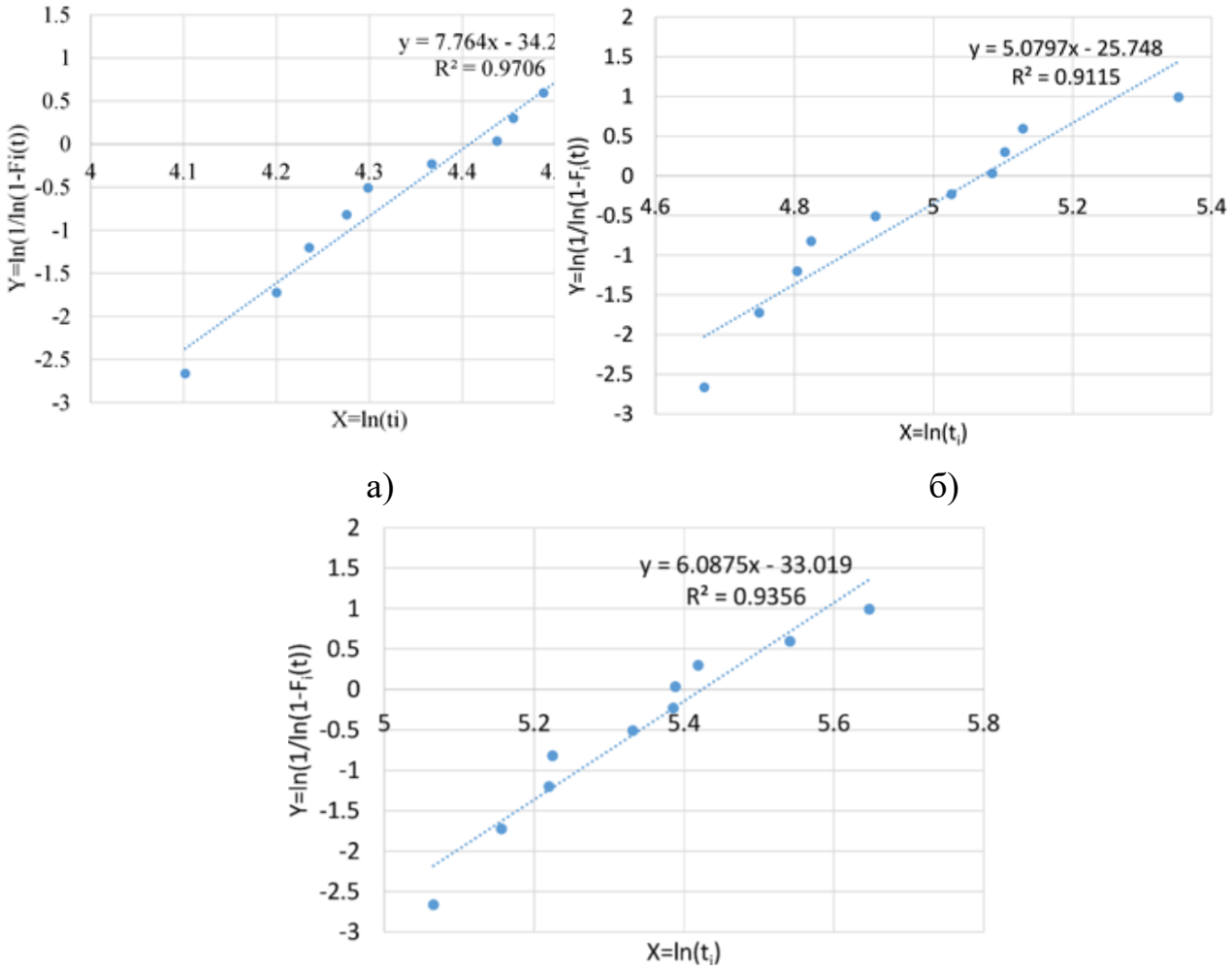
скла 106,74-211,12 МПа та для дослідних зразків ІІІ серії з гартованого скла 158,48-283,55 МПа. Величина швидкості наростання напружень відповідала нормативним вимогам (див. розд. 2.2.4), не перевищивши значення 1,05 МПа/с.

Усереднений максимальний прогин дослідних зразків І серії становив 3,7мм. Зразки ІІ серії зруйнувались з усередненим максимальним прогином 7,2 мм, що було на 194% більшим, як у зразків І серії. Зразки ІІІ серії зруйнувались з усередненим максимальним прогином 10,3 мм, що було на 278% більшим у порівнянні до зразків І серії та на 143% в порівнянні з дослідними зразками ІІ серії.

Модуль пружності згідно рівняння (2.6) для зразків І…ІІІ серії був в межах 6,46-7,24 х10^{10}Па, а з рівняння (2.7) в 6,58-7,30 х10^{10}Па. Так як різниці між аналітичним знаходженням модуля пружності і емпіричним (заміру тензодатчиків) майже немає, еталонні значення прийняті ті, які знаходились відповідно до замірів тензодатчиків HBM-1-LY41-10 / 120.

Оскільки спостерігаємо велику розбіжність в результатах значення міцності скла на розтяг при згині та модуля пружності, для їхнього аналізу застосували ймовірнісно-статистичний метод на основі закону двопараметричного розподілу Вейбулла для оцінки даних (див. розд. 2.2.6).

Для аналізу міцності скла побудовано діаграму Вейбулла (рис. 3.33) для кожної випробувальної серії, що представляє кумулятивні ймовірності руйнування $F_{i(t)}$, як функцію застосованого напруження $(t_i,)$ у вигляді прямої лінії, рівняння якої описано згідно (2.11). Був використаний коефіцієнт детермінації *R2,* для перевірки підтвердження наскільки обрана модель розподілу відповідає рівнянню, як статистичний критерій згоди.



а) б)

в)

Рис. 3.33. Діаграма Вейбулла для розподілу міцності дослідних зразків: а) I серії; б) II серії ; с) III серії .

Можна стверджувати, що для аналізу міцності скла для I…III серії дослідних зразків добре підходить розподіл Вейбула, оскільки R^2 становив ≤ 1. Параметри розподілу Вейбула визначені з наведеного вище графіка представлені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Відповідно до розподілу Вейбулла основні статистичні показники міцності скла на розтяг при згині

Характеристика міцності	Серія дослідних зразків		
	I	II	III
Модуль Вейбулла $\beta=m$	7.76	5.08	6.09

Характеристика міцності	Серія дослідних зразків		
	I	II	III
Параметр b $b=-\beta\cdot\ln(\eta)$	-34.22	-25.75	-33.02
Згідно з Вейбуллом характеристична міцність, МПа $\eta=\exp\left(-\frac{b}{\beta}\right)$	82.08	159	226.78
Середня міцність, МПа $\mu(t)=M(t)=t$	77,42	146,35	211,01
Характеристична міцність, МПа $f_{gk,5\%}=\eta\left(\ln\left(\frac{1}{1-0.05}\right)\right)^{\frac{1}{\beta}}=\eta\left(-\ln(1-0.05)\right)^{\frac{1}{\beta}}$	55.94	88.6	139.22

Отже, характеристична міцність звичайного скла на розтяг при згині становила $f_{g\,k,\,5\%}$=55,94 МПа, термозміцненого $f_{g\,k,\,5\%}$=88,60 МПа, а гартованого скла $f_{g\,k,\,5\%}$=139,22 МПа.

Для аналізу значень модуля пружності було побудовано діаграму Вейбула (рис. 3.34), аналогічно з аналізом міцності скла.

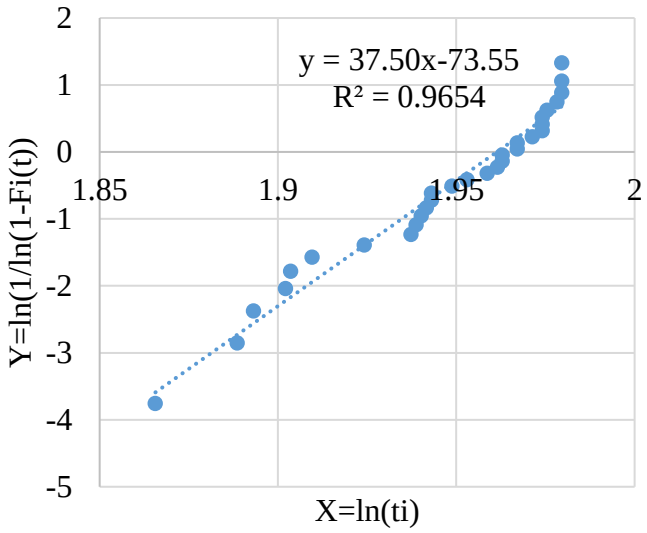


Рис. 3.34. Діаграма Вейбулла для розподілу значень модуля пружності скла дослідних зразків: а)I серії; б) II серії ; с) III серії .

Можна стверджувати, що для аналізу модуля пружності скла для I…III серії дослідних зразків добре підходить розподіл Вейбула, оскільки R^2 близька до одиниці. Параметри розподілу Вейбула визначені з графіка рис. 3.34 представлені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

Відповідно до розподілу Вейбулла основні статистичні показники модуля пружності скла

Характеристика модуля пружності скла	Значення
Модуль Вейбулла $\beta=m$	37.50
Параметр b $b=-\beta\cdot\ln(\eta)$	-73.55
Згідно з Вейбуллом характеристичний модуль пружності, 10^{10}Па $\eta=\exp\left(-\frac{b}{\beta}\right)$	7.08
Середня міцність, 10^{10}Па $\mu(t)=M(t)=t$	7,01
Характеристичний модуль пружності скла, 10^{10}Па $E_{gk,5\%}=\eta\left(\ln\left(\frac{1}{1-0.05}\right)\right)^{\frac{1}{\beta}}=\eta\left(-\ln(1-0.05)\right)^{\frac{1}{\beta}}$	6.57

Модуль пружності звичайного скла на розтяг при згині склав $E_{g\,k,\,5\%}$ = 6,57х10^{10} Па = 65 677,79 МПа = 6,567 10^4 МПа. Модуль пружності звичайного скла, отриманий при дослідженні скляних призм на стиск, склав $E_{g\,k,\,5\%}$ = 6,55х10^4 МПа. Як бачимо за два різні підходи визначення модуля пружності скла дало аналогічні результати.

3.4.3 Результати випробовування зчеплення скляних пластин між собою за дії статичного навантаження

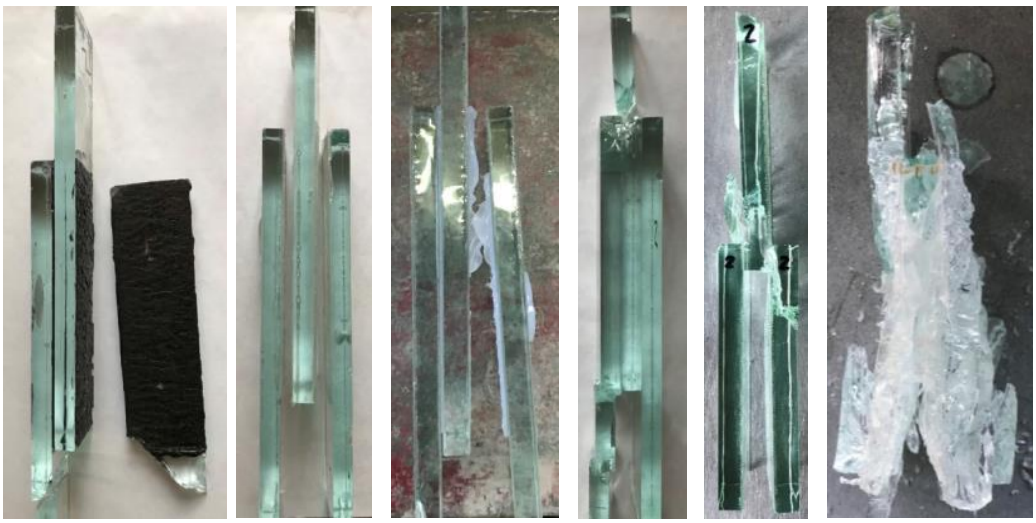
Випробування виконано відповідно до розділу 2.2.5 дослідних зразків (2.1.4) [18].

Зразки I…III серії зруйнувались поступово після досягнення руйнівного значення навантаження, а зразки IV…VI серії миттєво. Результати випробувань дослідних зразків наведено в таблиці 3.9. Характер руйнування наведений на рис. 3.35.

Таблиця 3.9

Результати випробувань

Серія	Марка	Руйнівне навантаження F, кН		Дотичні напруження τ, кН/см^2	Вид руйнування	
		зразка	середнє		По клейовому шву	По тілу
I	СЗ-1.1	8,82	8,795	0,173	Так	
	СЗ-1.2	8,77				
II	СЗ-2.1	13,13	13,53	0,267		
	СЗ-2.2	13,93				
III	СЗ-3.1	1,34	1,33	0,026	Так	
	СЗ-3.2	1,32				
IV	СЗ-4.1	32,3	32,7	0,645		Так
	СЗ-4.2	33,1				
V	СЗ-5.1	9,57	9,01	2,25	Так	
	СЗ-5.2	8,45				
VI	СЗ-6.1	89,09	88,83	1,057		Так
	СЗ-6.2	88,56				



а) б) в) г) д) е)

Рис. 3.35. Характер руйнування дослідних зразків: а) I серії; б) II серії; в) III серії; г) IV серії; д) V серії; е) VI серії.

Також, за результатами проведених випробувань побудовано графік залежності деформацій зсуву від дотичних напружень (рис. 3.36). Дотичні напруження визначались за формулою (2.8).

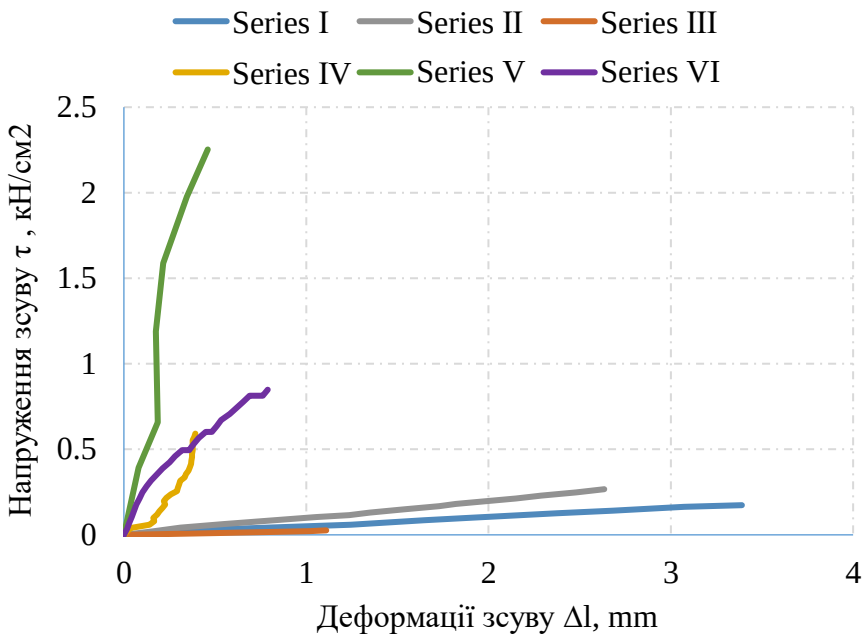


Рис. 3.36. Графік залежності деформацій зсуву від дотичних напружень

У дослідних зразках I…III серій руйнування відбувається поступово, безпечно, але досить малі дотичні напруження та великі деформації зсуву не більше 4 мм в порівнянні з серіями IV-VI, що руйнувалися миттєво.

З табл. 3.9. видно, що руйнування по тілу скла відбулось у зразках серії IV та VI, що свідчить про достатнє склеювання скла між собою.

Як бачимо з графіка дотичні напруження дослідних зразків V та IV серії досить різняться, хоча і спосіб склеювання в них однаковий. Це пов'язано з тим, що зразки IV зруйнувались по тілу, а V по шву дослідного зразка. Оскільки, зразки VI зруйнувались теж по тілу порівнюючи із зразком виготовленого за допомогою УФ клею IV серії мають значно більші дотичні напруження.

Оскільки зразки VI серії дали найкращий результат несучої здатності, у даній роботі для виготовлення колон було використано полімерну плівка EVASAFE.

3.5 Висновок до розділу 3

1. Отримано результати експериментальних досліджень стиснутих скляних колон на центральне осьове навантаження з різним закріпленням. Проведено детальний аналіз несучої здатності, характеру руйнування та деформативних характеристик дослідних зразків. Для всіх колон критерієм вичерпання несучої здатності було прийнято втрату рівноваги між зовнішнім і внутрішнім зусиллям, яке відбулось одночасно з появою перших тріщин в наслідок деформації зразка.

2. Рекомендовано не використовувати вимірювання поздовжніх деформацій стиснутих скляних колон за допомогою методу двовимірної кореляції цифрових зображень. Оскільки, даний метод не може врахувати переміщення дослідного зразка в просторі по трьох осях.

3. Характеристична міцність звичайного скла на стиск скляних колон становила $f_{ck,cube,5\%}$ = 212,57 МПа, а міцність призми $f_{ck,prism,5\%}$ = 152,91 що відповідало рівню ненадійності 5% з нижньою межею довірчого інтервалу на рівні 95%. Також, отримано реальне значення модуля пружності скла

E_{ck}=65 500,00 Мпа (6,55x10^4 МПа), при випробовуванні призм на статичне навантаження та значення коефіцієнта Пуассона ν=0,25.

4. Було прийнято у скляних колонах, виготовлених у заводських умовах за допомогою триплексації, використовувати для з'єднання скла полімерну плівку EVASAFE, відповідно до отриманих результатів експериментальних досліджень роботи різних типів з'єднань скла між собою.

5. За результатами випробування дослідних зразків на трьохточковий згин отримано реальні величини, які рекомендовано використовувати при розрахунку: значення характеристичної міцності звичайного скла на розтяг при згині $f_{gk,5\%}$ =55,94 МПа, термозміцненого $f_{gk,5\%}$ =88,60 МПа та гартованого скла $f_{gk,5\%}$ =139,22 МПа скляних колон. Також при проведені даних досліджень був встановлений модуль пружності скла $E_{gk,5\%}$ =65677,79 МПа, який рекомендовано використовувати в розрахунках.

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ СКЛЯНИХ СТИСНУТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ З ПРОЕКТУВАННЯ

4.1 Методика розрахунку несучої здатності стиснутих скляних елементів

Розрахунок напружено-деформованого стану скляних стиснутих елементів виконувався двома методами.

І метод полягав в аналітичному розрахунку проектної стійкості скляних багатошарових колон. Відповідно до методики розрахунку наведеної в розділі 1.5, було обраховано момент інерції на одиницю довжини I_s, що використовується для розрахунку ефективної товщини з багатошарового скла згідно формули (1.3). Також був розрахований модуль зсуву Γ (1.2) при G_{int} – 2,5 Н/мм^2 (відповідно до технічного свідоцтва № Z-70.3-197 [145, с.9-11]) та ефективну товщину $h_{ef;w}$ (1.1) для розрахунку вигину скляних колон різного перерізу при осьовому стиску. Результати розрахунків наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

Результати розрахунку ефективної товщини для різного перерізу скляної багатошарової колони згідно з [50]

Розрах. значення	Вид закріплення	Геометричні розміри колон (ДхШхВ), мм			
		50x70x900	70x70x900	70x70x900	100x35x900
$h_{ef;w,}$ мм	Шарнірне закріплення опор	-	-	48,10	89,02
$h_{ef;w,}$ мм	Пружно-податливе закріплення опор	24,82	54,00	-	-

Як відомо, перевірку вигину стиснутих елементів можна вважати зодовільною, якщо розрахункове осьове навантаження N_{Ed} не перевищує розрахункову міцність на вигин $N_{b,\,Rd}$ [50]*:*

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \tag{4.1}$$

На основі оригінальної теорії Айртона – Перрі опублікована у 1886 році [33], наприклад, ДБН В.2.6-161:2017 [1], визначають проектну стійкість дерев'яних колон суцільного перерізу чи Єврокоду, визначають проектну стійкість сталевих колон розмірами hxL_0 і загальною товщиною t ($A = ht$ площа перерізу) як:

$$N_{b,Rd} = \chi A f_{g;d} \tag{4.2}$$

де, χ - коефіцієнт зниження для критичного навантаження Ейлера, $f_{g;\,d}$ – розрахункове значення міцності скла, розраховане за Фельдманом, М. та Каспер, Р. та ін., [69] та нормами [50].

Як показали дослідження різних авторів [25, 26, 27] та з норм [50, 69] дану методику можна використати не лише для розрахунку монолітних конструкцій, але й багатошарових використавши параметр ефективної товщини (див. розд. 1.5).

Коефіцієнт зниження для критичного навантаження Ейлера $\chi \leq 1$ відповідно до норм [50] (коефіцієнт поздовжнього згину):

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \tag{4.3}$$

де, Ф – параметр для розрахунку коефіцієнта зменшення критичного навантаження:

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{imp}(\bar{\lambda} - \alpha_0) + \bar{\lambda}^2] \tag{4.4}$$

де, α_{imp} та α_0 - параметри кривих вигину ЕС (рис. 1.17), також α_{imp} ще називають як фактор недосконалості, а α_0 - коефіцієнт, що обмежує ділянку кривої, в якому $\chi = 1$ [50].

Приведена гнучкість (стисненого елемента) розраховують за формулою відповідно до [50 с. 196]:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_{g;k;st}}{N_{cr}^{(E)}}} \tag{4.5}$$

де, $f_{g;\,k;\,st}$ – характеристична міцність скла, критичне навантаження Ейлера розраховують за формулою:

$$N_{cr}^{(E)} = \frac{\pi^2 EJ_{eq}}{(L_0)^2} \tag{4.6}$$

де, E - модуль пружності скла, $L_0 = \mu l$ - розрахункова довжина колони, де μ – коефіцієнт розрахункової довжини, l – довжина колони, J_{eq} – еквівалентний момент інерції багатошарового скла визначають за формулою:

$$J_{eq} = \frac{bh_{ef;w}^3}{12} \tag{4.7}$$

де, b- ширина перерізу колони, $h_{ef;w}$ – ефективна товщина перерізу (див. розд. 1.5).

При виконанні перевірки стійкості у вище наведених формулах застосовуємо міцність на розтяг при згині, оскільки коефіцієнт Пуассона склав 0,25. Дану міцність використовували при проектуванні скляних конструкцій також ряд вчених [100, 69, 41, 27, 26] та наведена в інструкції [50].

Характеристична міцність скла, що враховується при перевірці стійкості слід розраховувати за формулою згідно з [50 с.230]:

$$f_{g;k;st} = k_{\mathrm{mod}} k_{ed} k_{sf} \lambda_{gA} \lambda_{gl} f_{g;k} \tag{4.8}$$

де, k_{mod} =0,88 – коефіцієнт перетворення, що враховує тривалість дії навантаження та температурно-вологісні умови експлуатації, прийнятий відповідно до норм [50 табл.2.2 с.39];

k_{ed}-коефіцієнти зниження, залежно від обробки країв скла, якщо (d≥5s)=1 (s=товщина шару скла, d-відстань див. розділ 1.5),в нашому випадку для звичайного скла k_{ed}=0,9 для термозміцненого та гартованого скла k_{ed}=0,8, згідно до [50 табл.7.3 с.222];

k_{sf} =1 коефіцієнт зниження, залежно від поверхні скла, для флоат-скла рівний 1, прийнятий відповідно до [50 табл.7.4 с.222];

λ_{gA}=1, масштабний коефіцієнт, залежно від розмірів поверхні, що зазнає розтягуючих навантажень, якщо (d<5s)=1, якщо ні визначається за формулою:

$$\lambda_{gA} = \left(\frac{0.24}{kA} \right)^{\frac{1}{7}} \tag{4.9}$$

де, A-площа поперечного перерізу колони, k – коефіцієнт визначається відповідно до [50 табл.7.5 с.223];

λ_{gl} - коефіцієнт масштабу для крайових напружень, якщо (d>5s)=1, якщо ні, визначається за формулою для конструкцій з полірованими краями:

$$\lambda_{gA} = \left(\frac{0.1667 \cdot 0,45}{k_b l} \right)^{\frac{1}{5}} \tag{4.10}$$

де, k_b – коефіцієнт, що залежить від розподілу напружень по краю колони, для постійного розподілу k_b=1, відповідно до [50, табл.7.6 с.223], l – довжина колони; $f_{g;k}$ – характеристичне значення міцності скла на розтяг при згині.

Після обрахунку напружено-деформованого стану скляних стиснутих колон марки КС-3.3.2 та КС-3.4.2 шарнірно закріплених на кінцях за допомогою вище наведених формул та простих математичних алгоритмів, був отриманий коефіцієнт розрахункової довжини для колон марки КС-3.1.1 та КС-3.2.1 із пружно-податливим закріпленням на опорах. Оскільки, вони були виготовлені за однаковою технологією та з однаковими геометричними розмірами. Виразивши коефіцієнт поздовжнього згину, як:

$$\chi = 1/(0,5(1+\alpha_{imp}(\sqrt{\frac{Af_{g;k;st}}{(\frac{\pi^2 EJ_{eq}}{(\mu l)^2})}}-\alpha_0)+\frac{Af_{g;k;st}}{(\frac{\pi^2 EJ_{eq}}{(\mu l)^2})})+$$
$$+\sqrt{(0,5(1+\alpha_{imp}(\sqrt{\frac{Af_{g;k;st}}{(\frac{\pi^2 EJ_{eq}}{(\mu l)^2})}}-\alpha_0)+\frac{Af_{g;k;st}}{(\frac{\pi^2 EJ_{eq}}{(\mu l)^2})})^2-\frac{Af_{g;k;st}}{(\frac{\pi^2 EJ_{eq}}{(\mu l)^2})}} \quad (4.11)$$

Розв’язавши рівняння (4.12), отримаємо значення коефіцієнту розрахункової довжини для колон із пружно-податливим закріпленням на опорах:

$$\mu = ((\frac{1}{\chi}\cdot\alpha_{imp}-\sqrt{(\frac{1}{\chi})^2\cdot\alpha_{imp}^2-12(\frac{1}{\chi})^2+4\chi+4\chi\alpha_{imp}\alpha_0}+$$
$$+\sqrt{8(\frac{1}{\chi})^3-8(\frac{1}{\chi})^2\alpha_{imp}\alpha_0})/2(1-2\cdot\frac{1}{\chi}))\cdot\sqrt{\frac{\pi^2 EJ_{eq}}{l^2 Af_{g;k;st}}}=1,43 \quad (4.12)$$

У таблиці 4.2. подано результати отриманих значень аналітичного розрахунку напружено-деформованого стану для скляних багатошарових колон із звичайного скла. Колони серії I, VI та IV не розраховувались, оскільки під час проведення дослідження в них був широких розкид несучої здатності із-за різних причин (див. п. 3.1.1, 3.1.4, 3.1.6).

Таблиця 4.2.

Результати аналітичного розрахунку напружено-деформованого стану скляних стиснутих колон

Серія	Марка колони	Тип закріплення	Приведена гнучкість	Значення, отримані відповідно до аналізу проведених випробувань		Значення, отримані згідно з проведеним аналітичним розрахунком	
			$\bar{\lambda}$	N_u, кН	N_w кН	Ейлера N_{cr}, кН	$N_{b,Rd}$
II	КС-2.1.1	Пружно-податливе закріплення опор	0,708	270	175	224,66	172,10
	КС-2.2.1			265			
III	КС-3.1.1		0,669	382,5	300	359,1	252,69
	КС-3.2.1			385,0			
	КС-3.3.2	Шарнірне закріплення опор	0,557	580	400	518,97	286,99
	КС-3.4.2			525			
V	КС-5.1.2		0,673	300	250	254,27	179,85
	КС-5.2.2			302,5	250		

Як бачимо з табл. 4.2. максимальна різниця між значеннями несучої здатності теоретичних розрахунків з експериментальними дослідженнями становить 20%, а максимальна різниця за II групою граничних станів (придатність до нормальної експлуатації) скла – 39,38%. Алгоритм аналітичного розрахунку напружено-деформованого стану скляних стиснуто зігнутих колон представлено блок-схемою на рис. 4.1.

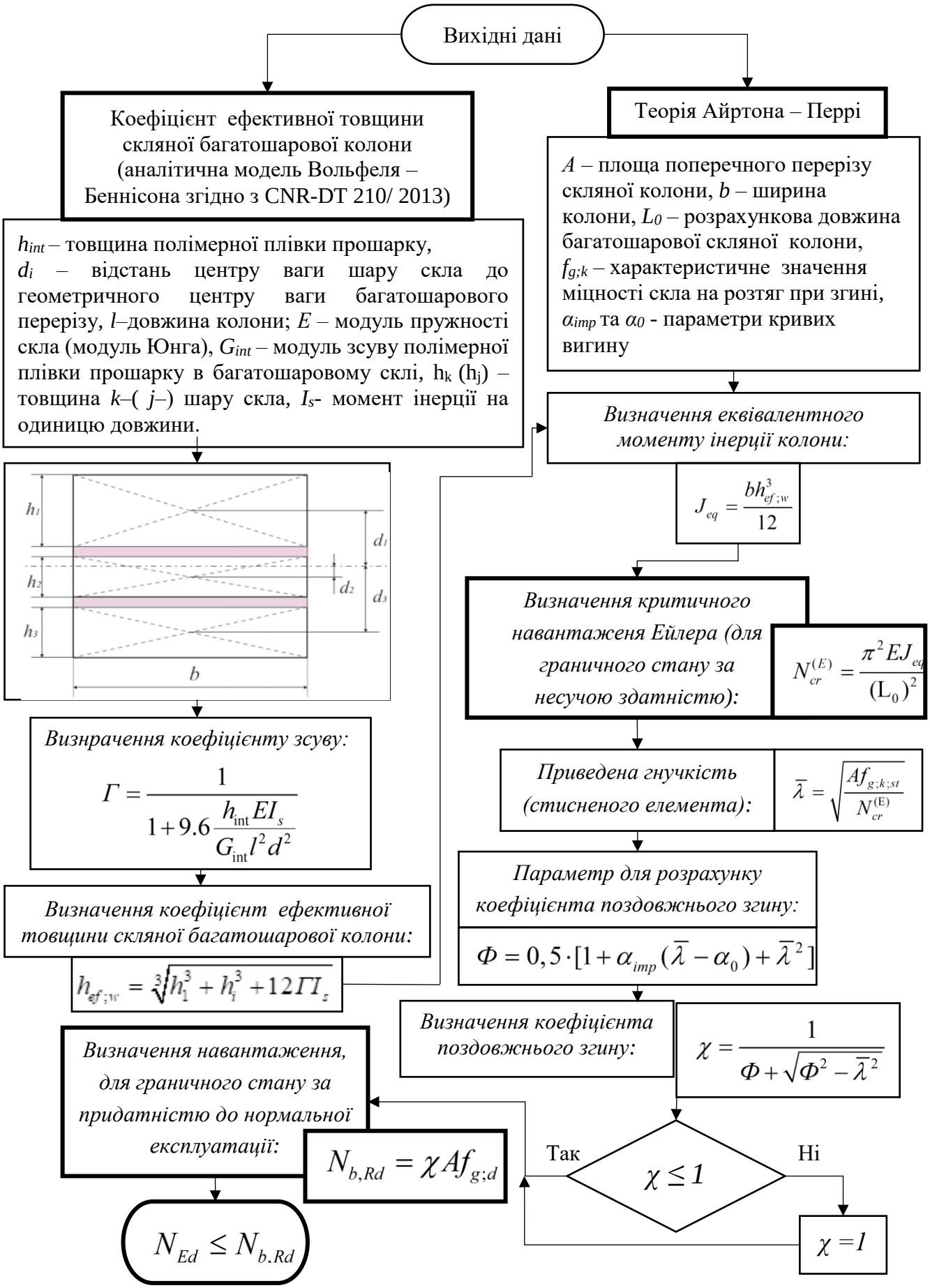


Рис. 4.1. Алгоритм аналітичного розрахунку скляної багатошарової колони

Також, було побудовано еліптичну криву (ЕС криву) за допомогою калібрування результатів випробувань, та порівняння їх з доступними в літературі результатами дослідження скляних колон [100, 72, 21, 70] з числовими прогнозами (рис. 4.2).

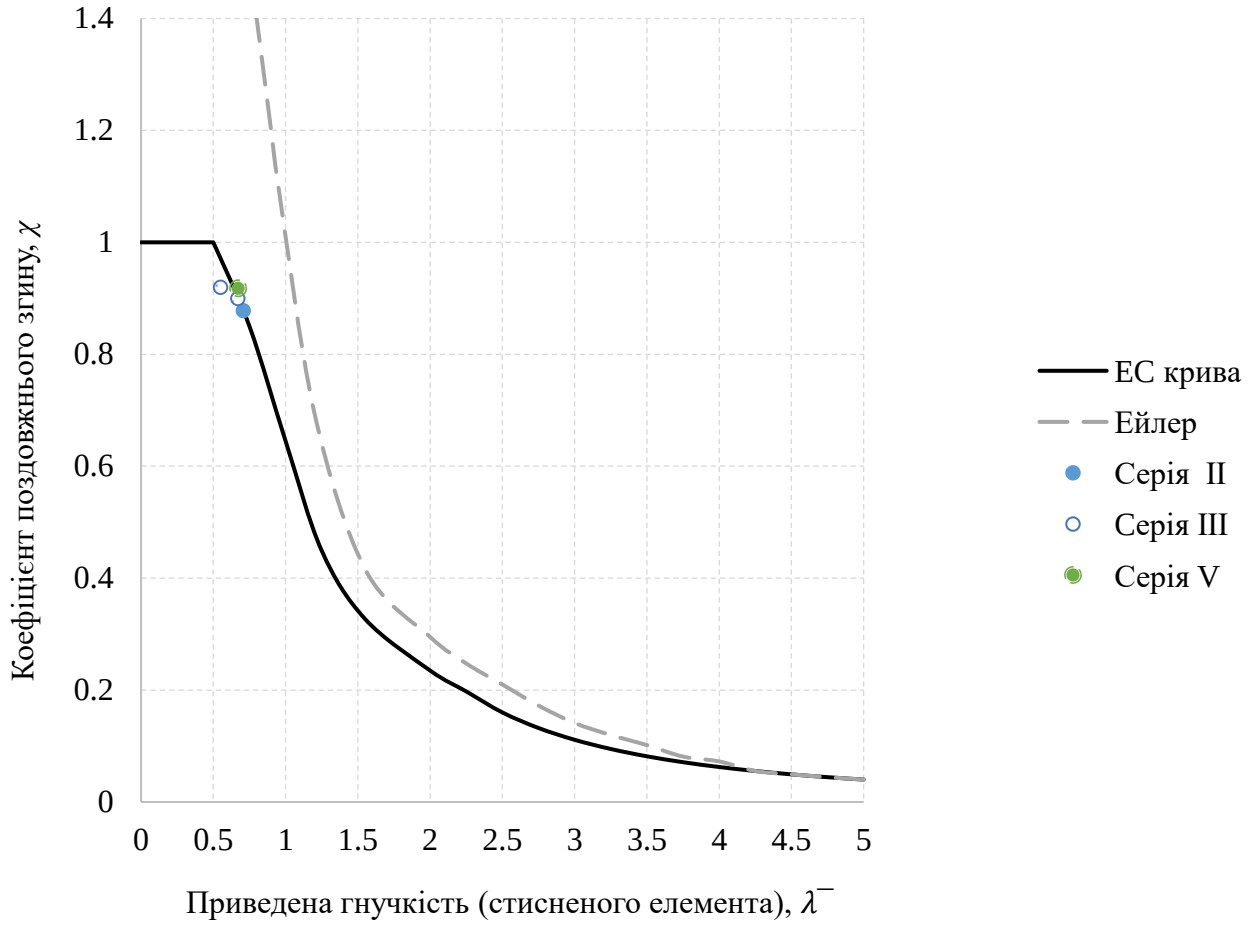


Рис. 4.2. Параметри кривих вигину «ЕС крива» для багатошарових скляних колон

Як бачимо з параметрів кривих вигину «ЕС крива», скляні багатошарові колони руйнуються за першим граничним станом від втрати стійкості форми при приведеній гнучкості $\bar{\lambda} \geq 0,5$. При $\bar{\lambda} \leq 0,5$ колони руйнуються за першим граничним станом від втрати міцності самого матеріалу скла. Схожі результати були отримані також вченими [21, 25, 26, 27, 28, 70, 72, 81, 100].

Отже, скляні колони малої приведеної гнучкості $\bar{\lambda} \le 0,5$ розраховуються тільки на міцність, а стержні великої приведеної гнучкості $\bar{\lambda} \ge 0,5$ розраховуються на втрату стійкості за формолою Ейлера та на основі Теорія Айртона – Перрі.

ІІ метод полягав у розрахунку критичної сили методом кінцевих елементів та вектор втрати стійкості скляних багатошарових колон під дією центрального навантаження з різним закріпленнями колон на опорах, який виконаний у програмі ©Dlubal RFEM, використавши концепцію ефективної товщини (Вольфеля-Беннісона) [50]. Програмний комплекс RFEM призначений для розрахунку несучих конструкцій, динамічного аналізу, машинобудування та розроблений компанією Dlubal. У розрахунку використаний додатковий модуль RF-STABILITY. Даний модуль дозволяє розраховувати стержневі та пластинчасті конструкції на стійкість. Проте, дозволяє знаходити значення критичного навантаження тільки у стержневих системах. Тому модель колон – це стержень. Додатковий модуль RF-STABILITY основної програми ©Dlubal RFEM виконував аналіз власних значень для визначення критичних коефіцієнтів навантаження та власних векторів втрати стійкості (режими вигину). Критичний коефіцієнт навантаження (критичний коефіцієнт навантаження на вигин глобальної системи) дозволив оцінити стабільність поведінки скляної багатошарової колони. Відповідний вектор втрати стійкості вказував область в моделі, схильну до вигинання. Модуль RF-STABILITY дозволив аналізувати відразу кілька власних векторів.

Згідно з посібником користування [122] програми ©Dlubal RFEM наведено основні особливості додаткового модуля RF-STABILITY:

• Визначення декількох власних векторів за один обчислювальний цикл;

• Імпорт осьових зусиль із випадків навантаження або комбінацій RFEM;

• Можливість врахування сприятливі ефекти через напруження;

• Можливість врахувати зміни жорсткості від RFEM;

• Аналіз власних значень з урахуванням визначених користувачем приростів навантаження;

• Визначення власних векторів, що дозволяють вирішити проблеми нестабільності конструкції;

• Потужний алгоритм, що використовує різні методи власних значень із визначеними користувачем параметрами;

• Можливість нормалізації власних векторів;

• Табличне відображення критичних факторів навантаження та відповідних власних векторів;

• Візуалізація власних векторів, включаючи опцію анімації у графічному вікні RFEM;

• Роздрук звіту RFEM, включаючи автоматичне оновлення змін;

• Підготовка власних векторів для додаткових модулів;

• Експорт даних у MS Excel, OpenOffice Calc або формат файлу CSV.

Таким чином, модуль RF-STABILITY є дуже зручним інструментом для аналізу конструкцій, схильних до вигинів та втрати стійкості [122].

Для достовірності отриманих результатів розрахунку за допомогою метода кінцевих елементів в програмі ©Dlubal RFEM був створений новий матеріал, який відповідав фізико-механічним характеристикам скла, визначених за допомогою статистичного та статистично-ймовірного аналізу даних проведеного дослідження (рис. 4.3). У зв'язку із прийнятими умовами роботи зразка – модель роботи матеріалу прийнято ізотропною.

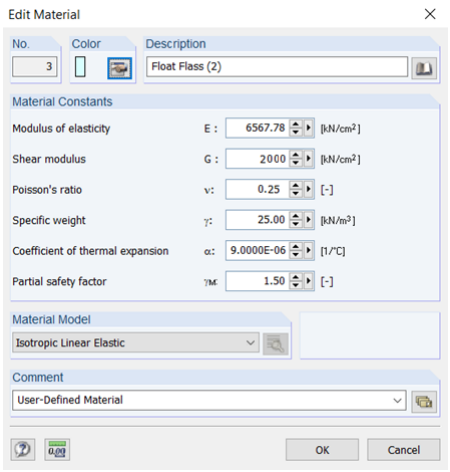


Рис. 4.3. Характеристики нового матеріалу для дослідження

Скляна багатошарова колона змодельована прямим стержнем із різними умовами закріплення опор, а саме – шарнірним та пружно-податливим заріпленням на опорах (рис. 4.4).

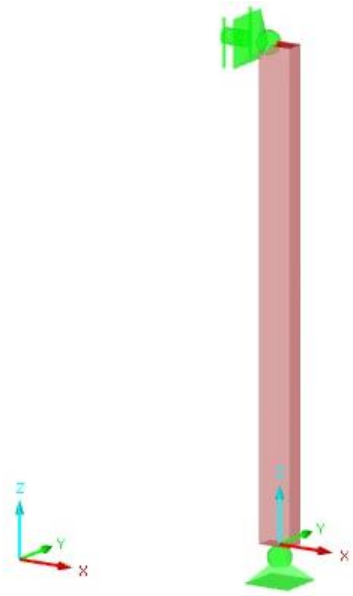


Рис. 4.4. Кінцево-елементна модель досліджуваного зразка

Для пошуку критичного навантаження та визначення вектор втрати стійкості скляної багатошарової колони під дією центрального навантаження з різним закріпленням колон на опорах задано елементарну одиницю сили (рис. 4.5).

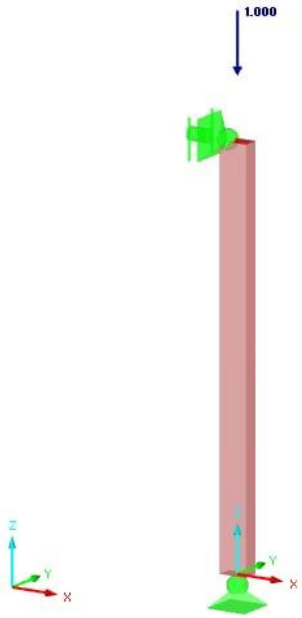


Рис. 4.5. Схема завантаження стержня

Для пошуку критичного навантаження скляної багатошарової колони та вектор втрати стійкості під дією центрального навантаження з різним закріпленням колон на опорах задано в підпрограмі RF-STABILITY наступні параметри:

- Кількість шуканих форм коливань – 4;
- Метод розрахунку – пошук форм власних векторів;
- Метод пошуку векторів – метод Ланцоша [94];
- Додаткові чинники, які впливають на розрахунок – відсутні.

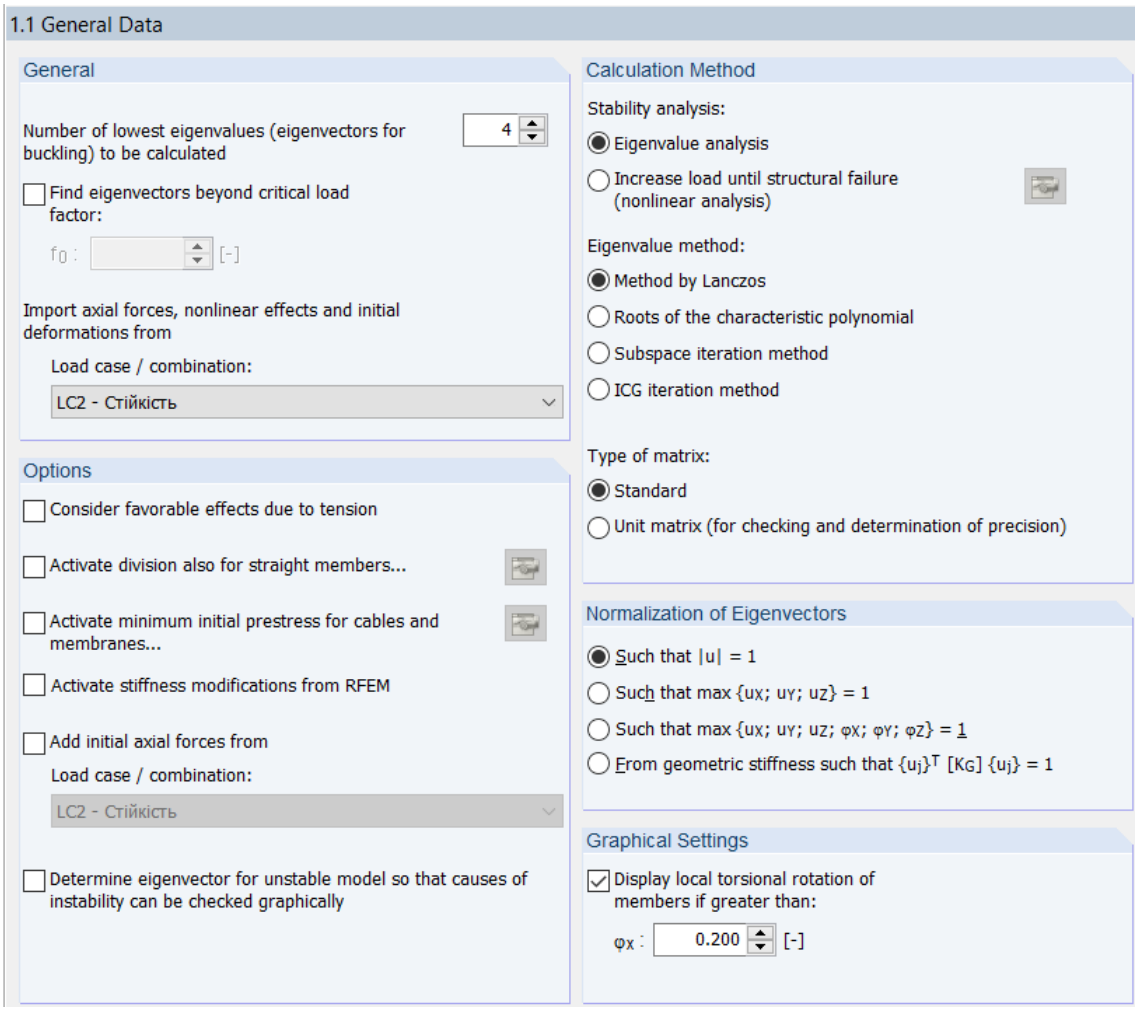


Рис. 4.6. Дані для розрахунку критичного навантаження у модулі RF-STABILITY

Для визначення вектора втрати стійкості використаний алгоритм К. Ланцоша [94], розроблений у 1950 році, який полягав у обчисленні власних значень симетричної матриці. Але його довгий час не використовували, оскільки даний метод мав чисельну нестабільність, і лише у 1970 році І. Джялво та М. Нюман цю

проблему вирішили і застосували дане рішення до великих інженерних споруд, під дією динамічного навантаження [112]. У 1988 році І. Джялво опублікував детальний алгоритм використання даного методу [113].

Значення критичного навантаження втрати стійкості скляної багатошарової колони під дією центрального навантаження з різним закріпленням колон на опорах наведеного в табл. 4.3.

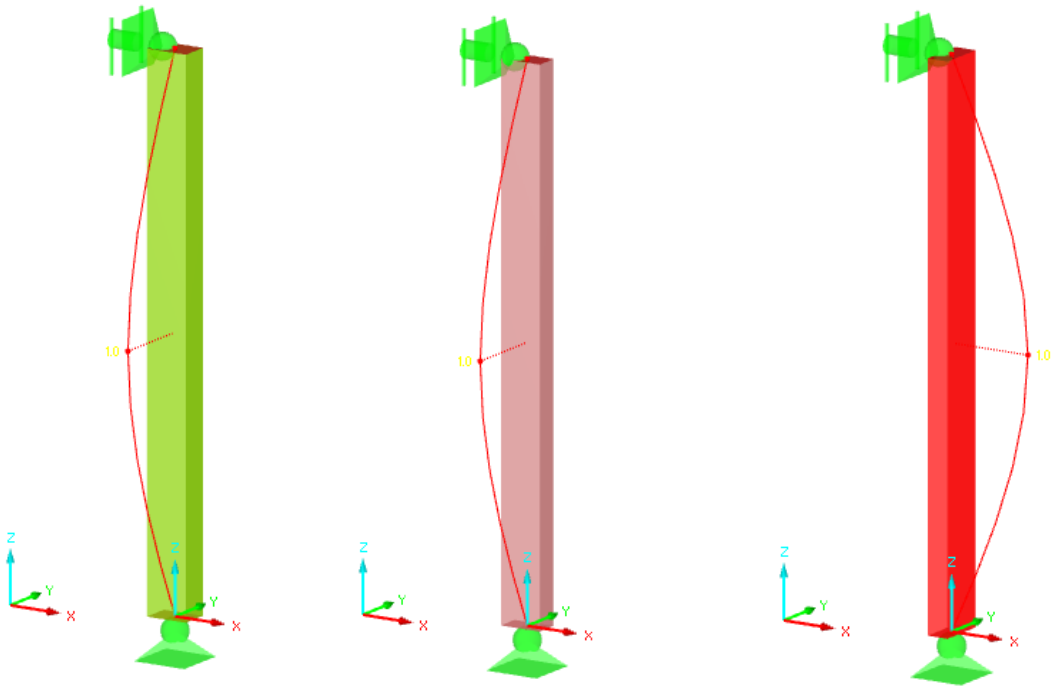
Таблиця 4.3.

Результати розрахунку за допомогою метода кінцевих елементів напружено-деформованого стану скляних стиснутих колон

Серія	Марка колони	Тип закріплення	Значення, отримані відповідно до аналізу проведених випробувань	Значення, отримані згідно з проведеним аналітичним розрахунком
			N_u, кН	$N_{cr}{}^{cal}$, кН
II	КС-2.1.1	Пружно-податливе закріплення опор	270	238,24
	КС-2.2.1		265	
III	КС-3.1.1		382,5	360,08
	КС-3.2.1		385,0	
	КС-3.3.2	Шарнірне закріплення опор	580	520,03
	КС-3.4.2		525	
V	КС-5.1.2		300	255,31
	КС-5.2.2		302,5	

Як бачимо з таблиці, максимальна різниця між значеннями теоретичних розрахунків з експериментальними дослідженнями становить 15%, що свідчить про високу точність розрахунку напружено-деформованого стану скляних стиснутих колон під дією центрального навантаження з різним закріпленням на опорах за допомогою методу кінцевих елементів.

Встановлений вектор та форму втрати стійкості скляних багатошарових колон під дією центрального навантаження наведено на рис. 4.7.



а) б) в)

Рис. 4.7. Форма втрати стійкості скляних багатошарових колони: а) серії II; б) серії III; в) серії V.

Як бачимо з рис. 4.7, за допомогою розрахунку методу кінцевих елементів вдалось визначити вектор та форму втрати стійкості скляних багатошарових колон під дією центрального навантаження з різним закріпленнями колон на опорах, використавши концепцію ефективної товщини (Вольфеля-Беннісона) [50, 147].

4.2 Порівняння результатів проведених теоретичних розрахунків з експериментальним дослідженням скляних стиснутих колон

Порівняльний аналіз результатів проведених теоретичних розрахунків з експериментальними дослідженнями скляних стиснутих колон під дією центрального навантаження з різним закріпленням колон на опорах показав високу збіжність результатів. Це свідчить про можливість проведення розрахунку таких конструкцій, прогнозування їхньої роботи, поведінки та свідчить про повторюваність отриманих результатів. Порівняльний аналіз теоретично-експериментальних досліджень наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4.

Порівняння результатів проведених теоретичних розрахунків з експериментальним дослідженням скляних стиснутих колон

Серія	Марка колони	Експер. значення		Теоретичні значення			Порівняння значень		
				I методика		II методика			
		N_u, кН	N_w кН	N_{cr}, кН	$N_{b,\,Rd}$	$N_{cr}{}^{cal}$, кН	$\frac{N_u}{N_{cr}}$	$\frac{N_w}{N_{d,Rd}}$	$\frac{N_u}{N_{cr}^{cal}}$
II	КС-2.1.1	270	175	224,66	172,10	238,24	1,20	1,02	1,13
	КС-2.2.1	265					1,18		1,11
III	КС-3.1.1	382,5	300	359,1	252,69	360,08	1,06	1,18	1,06
	КС-3.2.1	385,0					1,07		1,07
	КС-3.3.2	580	400	518,97	286,99	520,03	1,12	1,39	1,12
	КС-3.4.2	525					1,01		1,01
V	КС-5.1.2	300	250	254,27	179,85	255,31	1,18	1,39	1,18
	КС-5.2.2	302,5	250				1,19		1,18

За допомогою проведеного аналітичного розрахунку багатошарових стиснутих колон отримано значення несучої здатності при втраті стійкості, які максимально різняться з експериментом на 20%. Що свідчить про високу точність розрахунку напружено-деформованого стану скляних стиснутих колон під дією центрального навантаження з різним закріпленням на опорах за аналітичним методом розрахунку. А максимальний запас міцності за II групою граничних станів (придатність до нормальної експлуатації) склав 39%.

За проведеним чисельно-аналітичним розрахунком методом кінцевих елементів скляних багатошарових колон вдалось визначити критичне навантаження при втраті стійкості, яке відрізняється від експериментального на 18%. Також, за допомогою II методики розрахунку вдалось визначити вектор

втрати стійкості, який повністю зійшовся з проведеними експериментальними дослідженнями.

Отже, згідно з запропонованими методиками розрахунку та їхнього алгоритму отримали значення напружено-деформативного стану скляних багатошарових колон.

4.3 Рекомендації щодо проектування скляних багатошарових колон

Згідно проведеного аналізу експериментальних досліджень та запропонованих теоретичних розрахунків напружено-деформативного стану скляних багатошарових колон, під дією центрального навантаження з різним закріпленням на опорах, та виготовлених за допомогою методу триплексації розроблені наступні рекомендації щодо проектування:

1. Рекомендовано виготовляти скляні багатошарові колони з флоат-скла за методом триплексації, використовуючи полімерну плівку типу EVASAFE™.

2. Для збільшення несучої здатності колон ефективніше збільшувати ширину шарів скла, ніж кількість шарів скла, що пов'язано з податливістю клейових швів.

3. Для розрахунку напружено-деформованого стану скляних стиснутих колон під дією центрального навантаження з різним закріпленням на опорах рекомендовано використовувати аналітичний метод розрахунку *(перша методика)* на основі концепції ефективної товщини (CNR-DT 210/ 2013), формулювання якого сформовано за результатами оригінальної роботи Вольфеля-Беннісона та використовувати оригінальну теорію Айртона – Перрі.

4. Для визначення критичної сили, вектора та форми втрати стійкості скляних стиснутих колон під дією центрального навантаження з різним закріпленням на опорах рекомендовано використовувати чисельно-аналітичний метод розрахунку *(друга методика)* на основі концепції ефективної товщини Вольфеля-Беннісона (CNR-DT 210/ 2013) та метода кінцевих елементів в програмному комплексі ©Dlubal RFEM і модуля RF-STABILITY.

5. Колони виготовлені з термозміцненого скла є економічно більш ефективнішими, ніж колони з гартованого скла, так як застосування гартованого

скла збільшило їх несучу здатність лише на 8,6% в порівнянні з термозміцниним склом, а вартість виготовлення їх була на 35% вища.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Розроблено та надано алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану скляних стиснутих колон під дією центрального навантаження з різним закріпленням на опорах двома методами: аналітичний *(І метод)* та чисельно-аналітичний *(ІІ метод).*

2. Проведено порівняння результатів виконаних теоретичних розрахунків з експериментальним дослідженням скляних стиснутих колон під дією центрального навантаження, що свідчить про високу точність розрахунку напружено-деформованого стану скляних стиснутих колон під дією центрального навантаження з різним закріпленням на опорах. Це свідчить про можливість проведення розрахунку таких конструкцій, прогнозування їхньої роботи, поведінки та свідчить про повторюваність отриманих результатів.

3. Відповідно до п.4.1 чисельно-аналітичної методики розрахунку *(ІІ метод)* на основі концепції ефективної товщини Вольфеля-Беннісона (CNR-DT 210/ 2013) та метода кінцевих елементів у програмному комплексі ©Dlubal RFEM і модуля RF-STABILITY вдалось визначити критичну силу, вектор та форму втрати стійкості скляних стиснутих колон під дією центрального навантаження з різним закріпленням на опорах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Згідно з аналізом наявної нормативної та наукової літератури встановлено стан наукової проблеми та вибрано основні напрямки досліджень несучої здатності та деформативності скляних багатошарових колон, сформовано основні завдання дисертаційної роботи.

2. Запроектовано та виготовлено у виробничих умовах двадцять одну скляну колону за допомогою методу триплексації, які згруповано у вісім серій в залежності від геометричних розмірів, типу закріплення та виду скла багатошарових колон. На даний дослідний зразок отримано патент України «Скляна колона» №128990.

3. Розроблена методика та проведено в лабораторних умовах експериментальне дослідження скляних багатошарових колон під дією короткочасного статичного навантаження на центральний стиск з різними розрахунковими схемами закріпленням опор.

4. Уперше було апробовано метод двовимірної кореляції цифрових зображень (КЦЗ) для вимірювання відносних деформацій багатошарових скляних колон. Цей метод не рекомендовано використовувати для вимірювання поздовжніх деформацій колон. Для заміру деформацій скла при дослідженні колон рекомендовано спробувати використовувати метод тривимірної кореляції цифрових зображень.

5. Розроблено методику експериментальних досліджень, на основі якої визначено характеристичну міцність звичайного скла на стиск $f_{ck,cube,5\%}$ = 212,57 МПа, $f_{ck,prism,5\%}$ = 152,91, коефіцієнт Пуассона ν=0,25. Також, отримано реальне значення модуля пружності скла, визначене двома методами, E_{ck}=65 500,00 Мпа (6,55x10^4 МПа) та $E_{gk,5\%}$ =65677,79 МПа (6,57x10^4 МПа). Визначено значення характеристичної міцності звичайного скла на розтяг при згині $f_{gk,5\%}$ =55,94 МПа, термозміцненого $f_{gk,5\%}$ = 88,60 МПа, та гартованого скла $f_{gk,5\%}$ = 139,22 МПа багатошарових колон.

6. Виконано теоретичний розрахунок напружено-деформованого стану скляних стиснутих елементів під дією центрального навантаження з різним закріпленням на опорах двома методами:

- аналітичний метод розрахунку *(І метод)* на основі концепції ефективної товщини (CNR-DT 210/ 2013) формулювання якого сформовано за результатами оригінальної роботи Вольфеля-Беннісона та використано оригінальну теорію Айртона – Перрі.

- чисельно-аналітичний метод розрахунку *(ІІ метод)* на основі концепції ефективної товщини Вольфеля-Беннісона (CNR-DT 210/ 2013) та методу кінцевих елементів у програмному комплексі ©Dlubal RFEM і модуля RF-STABILITY.

7. Проведено порівняння результатів виконаних теоретичних розрахунків з експериментальним дослідженням скляних стиснутих колон під дією центрального навантаження, що свідчить про високу точність розрахунку напружено-деформованого стану скляних колон під дією центрального навантаження з різним закріпленням на опорах. Це свідчить про можливість проведення розрахунку таких конструкцій, прогнозування їхньої роботи, поведінки та свідчить про повторюваність отриманих результатів.

8. Відповідно до проведених теоретичних розрахунків та аналізу проведених експериментальних випробувань надано рекомендації щодо проектування скляних багатошарових колон, що працюють на центральний стиск.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.6-161:2017, Дерев'яні конструкції, Мінрегіон України, 2017. – 111 с. – (Національний стандарт України);
2. ДБН В.2.6-198:2014, Сталеві конструкції.- Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Національний стандарт України);
3. ДБН В.2.6-98:2009, Бетонні та залізобетонні конструкції. - К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с. – (Національний стандарт України);
4. Демчина Б. Г., Сурмай М. І., Ткач Р. О. (2018), Експериментальне дослідження скляних багатошарових колон на центральний стиск, *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва*. Львів: НУЛП, 2018. №888. С52-58;
5. Демчина Б.Г., Осадчук Т.Ю. Дослідження деформацій багатошарових скляних плит за допомогою кореляції цифрових зображень. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура.* ХНУМГ, Харків – 2017. – Т.134. – С. 153–163;
6. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О. (2018), «Скляна колона», Патент України на корисну модель №128990, E04C 3/30, E04B 1/18, E04B 1/28, E04H 15/34, E04H 15 -60, заява № u201805969 від 29.05.2018, опубліковано 10.10.2018, бюл. №19/2018;
7. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О. (2019), «Спосіб випробовування скляної колони», Патент України на корисну модель №134878, G01N 3/10, заява № u201812746 від 21.12.2018, опубліковано 10.06.2019, бюл. №11;
8. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О., Гула В., Визначення фізико-механічних властивостей скла на згин за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла, *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. Київ: КНУБА, 06/2020. №6. С94-113. DOI: 10.32347/2522-4182.6.2020.94-113;
9. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О., Осадчук Т.Ю. (2020), «Зразок для випробування зчеплення пластин між собою», Патент України на корисну модель №140007, G01N 3/08, заява № u201905744 від 27.05.2019, опубліковано 10.02.2020, бюл. №3;

10. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О., Шидловський Я.М., Експериментальне дослідження багатошарових скляних колон квадратного перерізу**,** *Наука та будівництво, 4 (18)*| 2018, С74-80;
11. 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*. Львів, 2015. - №823. С.113-116;
12. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Будівельні матеріали бетони. Методи визначення призмовоі міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона, 2010;
13. ДСТУ Б.В.2.7-122:2009 Скло листове. Технічні умови. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. –С. 52 (in Ukraine);
14. Іваницький Я. Л., Максименко О. П., Запоточний Р. М., Мольков Ю. В., Оптико-цифровий метод визначення полів деформацій на локальних ділянках залізобетонних мостів, *Фізико-хімічна механіка метеріалів №2*, 2015, С104-108;
15. Коваль П. М., Іваницький П.М., Ковальчик Я. І., Мольков Ю. В., Дослідження напружено-деформованого стану бетонних зразків методом цифрової кореляції зображень, *Автомобільні дороги і дорожне будівництво*. Вип. 89. 2013. С. 185-192. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb_2013_89_27;
16. Ковальчик Я. І., Перспективи використання методу цифрової кореляції зображень для дослідження будівелних конструкцій. З*бірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. Вип.5 (35). 2012. ПолтНТУ. С.92-100;
17. Максименко О.П., Іваницький Я.Л., Гвоздюк М.М., Визначення жорсткості з’єднання “композит–метал” методом цифрової кореляції зображень, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2014. Т. 50, № 6. С. 44-49;
18. Осадчук Т.Ю. (2020), Міцність та деформативність скляних багатошарових плит, кваліфікаційна наукова праця, Національний Університет «Львівська Політехніка»;
19. Ab Ghani A. F., Ali M. B., DharMalingam S., Mahmud J. Digital Image Correlation

(DIC) Technique in Measuring Strain Using Opensource Platform Ncorr, 2016 - C-10-21https://www.researchgate.net/publication/309463775_Digital_Image_Correlation_DIC_Technique_in_Measuring_Strain_Using_Opensource_Platform Ncorr;

20. ABAQUS® version 6.9. Simulia, Pawtucket, R.I. 02860 USA; 2009.
21. Aiello S., Campione G., Minafò G., Scibilia N. Compressive behaviour of laminated structural glass members. Eng Struct 2011; 33:3402–8.
22. Akerboom, R. (2016). Glass columns, exploring the potential of free standing glass columns assembled from stacked cast elements (MSc thesis). Retrieved from Repository TU Delft;
23. Alan J. Brookes and Dominique Poole, Innovation in architecture (London: Spon Press, 2004);
24. Al-Masri R., Rasheed H.A. (2018), Buckling solutions of clamped-pinned anisotropic laminated composite columns under axial compression using bifurcation approach and finite elements, *Thin-Walled Structures 123*, 206–213, https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.11.022;
25. Amadio C., Bedon C. (2010) Buckling of laminated glass elements in out-of-plane bending. *Engineering Structures 32(11)*: 3780–3788;
26. Amadio C., Bedon C. (2011) Buckling of laminated glass elements in compression. *Journal of Structural Engineering*, 137(8);
27. Amadio C., Bedon C. (2013) A buckling verification approach for monolithic and laminated glass elements under combined in-plane compression and bending. *Engineering Structures*, *52(7)*: 220–229;
28. Amadio C., Bedon C. Standardized buckling curves for the verification of glass columns, beams and panels. In: *Proceedings of XXVII ATIV conference-from a grain of sand. . . to the strength of a structure-engineering & architectural session: special glass structures*, Parma, Italy, 15–16 November 2012, pp. 113– 120. ISSN:2281-3462.;
29. ASTM C1161-13. Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013. DOI: 10.1520/C1161-13.

30. ASTM C1161-18, Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018;
31. ASTM C158 Flexural Bend Testing for Glass - TestResources, Available from: https//www.testresources.net/applications/standards/astm/astm-c158-flexural-bend-testing-for-glass;
32. ASTM E1300-09a, Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings, American Society for Testing Material (ASTM), 2009;
33. Ayrton WE, Perry J. On struts. *The Engineer 1886*:137–53.
34. Badalassi M., et al., Safety factors for the structural design of glass, *Construction and Building Materials 55* (2014) 114–127;
35. Bedon Ch., Amadio C. (2017) Design buckling curves for glass columns and beams, *Structures and Building Volume 168 Issue SB7*, Pages 514–526 http://dx.doi.org/10.1680/stbu.13.00113;
36. Bedon Ch., Amadio C., Flexural-torsional buckling: Experimental analysis of laminated glass elements, *Engineering structures*, vol. 73, pp. 85-99, 2014;
37. Behling, S, Behling S. (Eds.), 1999, Glass. *Konstruktion und technologie in der architektur*, München: Prestel;
38. Belis, J. L. I. F., Mocibob, D., Luible, A., & Vandebroek, M. (2011). On the size and shape of initial out-of-plane curvatures in structural glass components. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2700-2712. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.021
39. Bennison S.J., Serruys F. Designing the Grand Canyon's new laminated glass walkway. *Glass Performance Days: Conference proceedings*, Tampere, Finland, 15 - 18 June 2007. P. 333-335. URL: http://www.sun tec.ch/downloads/gpd07 bennison.pdf (Last accessed: 10.12.2019);
40. Bennison S.J., Smith C., Van Duser A., Jagota A. Strength of Laminated Safety Glass. *Glass Processing Days: Conference proceedings*, Tampere, Finland, 18-21 June 2001. URL: http://glasslaminatingsolutions.kuraray.com/fileadmin/user _upload/technical_information/downloads/whitepapers/strength_of_laminated_

safety_glass.pdf (Last accessed: 10.12.2019);

41. Bennison, S., Structural Properties of Laminated Glass, Short Course, Glass Processing Days, Tampere (Fi), 2009;
42. Blenkinsopp R., Harland A., Price D., Lucas T., Roberts J. A Method to Measure Dynamic Dorsal Foot Surface Shape and Deformation During Linear Running Using Digital Image Correlation, *Procedia Engineering*, Volume 34. – 2012. – C.266-271. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581201659;
43. Bomarito, Geoffrey & Hochhalter, Jacob & Ruggles, Tim & Cannon, Andrew, Increasing accuracy and precision of digital image correlation through pattern optimization. *Optics and Lasers in Engineering*. 91. – 2017. – C.73-85. – Режим доступу: 10.1016/j.optlaseng.2016.11.005;
44. Bos F., Louter C., Nijsse R., Veer F., Challenging Glass 3. *Conference on Architectural and Structural Applications of Glass* (Amsterdam: IOS Press, 2012);
45. Bos F., Veer F., Hobbelman G., Romein T., Nijsse R., Belis J., Louter C., Nieuwenhuijzen E., Designing and Planning the World's Biggest Experimental Glass Structure. Glass Processing Days (2005);
46. Calderone I., Davies P.S., Bennison S.J., Xiaokun H., Gang L. Effective laminate thickness for the design of laminated glass. In: Proceedings of Glass performance days. Tampere (Finland); 2009.
47. CEN (2004b) EN-1994-1-1: 2004 Eurocode 4 – Design of composite and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, Brussels, Belgium, European Standard Draft;
48. CEN (2004c) EN-1995-1-1: 2004 Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, Brussels, Belgium, European Standard Draft;
49. CEN (European Organisation for Standardisation) (2004a) EN- 1993-1-1: 2004 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, Brussels, Belgium, European Standard Draft;
50. CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) (2013) CNR-DT 210/ 2013: Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed. il controllo di costruzioni con elementi

strutturali di vetro. National Research Council, Rome, Italy, Technical Document (in Italian).

51. Curkovic L., Bakic A., Kodvanj J., Haramina T., Flexural strength of alumina ceramics: Weibull analysis, *Transactions of Famena 34*, 2010, 13-18, Available from: http://repozitorij.fsb.hr/3589/1/FLEXURAL%20STRENGTH%20OF%20ALUMINA%20CERAMICS.pdf;
52. Demchyna B., Osadchuk T., Flexural strength of glass using Weibull statistic analysis, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 87/2, 2018, P49-61;
53. 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;
54. Demchyna B., Surmai M., Tkach R., The experimental study of glass multilayer columns using digital image correlation, *Archives of Materials Science and Engineering* 96/1, 2019, P32-41. DOI: 10.5604/01.3001.0013.1990;
55. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin. 2014. 12 s. URL: https://www.mepla.net/media/medien/dibt_abz_evasafe_schubverbund_valid_20190327_7315a.pdf (Last accessed: 10.12.2019).
56. Doenitz F., Jung H., Behling S., Achenbach J., Laminated Glass Tubes as Structural Elements in Building Industry, Glass Processing Days (2003);
57. Eline Ouwerkerk, Glass columns (Delft University of Technology: Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 2011);
58. EN 12150-1:2015+A1:2019. Glass in building - Thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 1: Definition and description. European Committee for Standardization (CEN), 2015. 22 p.
59. EN 12603:2002, Glass in building - Procedures for goodness of fit and confidence intervals for Weibull distributed glass strength data, European Committee for Standardization (CEN), 2002;

60. EN 1288-3:2000, Glass in building - Determination of the bending strength of glass - Part 3: Test with specimen supported at two points (four point bending), Brussels, European Committee for Standardization CEN, 2000;
61. EN 14179-1:2016. Glass in building - Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 1: Definition and description. European Committee for Standardization (CEN), 2016. 50 p.;
62. EN 1863-1:2011. Glass in building - Heat strengthened soda lime silicate glass - Part 1: Definition and description. European Committee for Standardization (CEN), 2011. 34 p.;
63. EN 410:2011. Glass in building. Determination of luminous and solar characteristics of glazing, 2011;
64. EN 572-1:2012+A1:2016. Glass in building - Basic soda lime silicate glass products - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties. European Committee for Standardization (CEN), 2012;
65. EN 572-2:2012. Glass in Building - Basic soda lime silicate glass products - Part 2: Float glass. European Committee for Standardization (CEN), 2012. 18 p.;
66. EN 61649:2008, Weibull analysis (IEC 61649:2008), European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), 2008;
67. EN 673:2011. Glass in building - Determination of thermal transmittance (U value) - Calculation method; German version, 2011, 20 p;
68. Feldmann M., Kasper R., Abeln B., et al. Guidance for European Structural Design of Glass Components: Joint Research Centre (JRC) Scientific and 168 Policy Report (JRC No: JRC86637). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. 208 p. DOI: 10.2788/5523;
69. Feldmann M., Kasper R., et al., Guidance for European Structural Design of Glass Components Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes, Report EUR 26439 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourgh, 2014, ISBN 978-92-79-35093-1 (pdf), doi: 10.2788/5523. 978-92-79-35093-1 (pdf). doi: 10.2788/5523;

70. Feldmann M., Langosch K., Buckling resistance and buckling curves of pane-like glass columns with monolithic sections of heat strengthened and tempered glass. In: *Conference on architectural and structural applications of glass*, Delft, Netherlands, 2010;
71. Felekou, E., Structural Glass in High-Rise buildings (MSc thesis). Retrieved from Repository TU Delft, 2016;
72. Foraboschi P. Buckling of a laminated glass column under test. Struct Engr 2009;87(1);
73. Frans Luijten, Construeren met materialen: construeren met glas (Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2009);
74. Galuppi L., Royer Carfagni G. The effective thickness of laminated glass plates. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2012. № 7. P. 375-400. DOI: 10.2140/jomms.2012.7.375;
75. Galuppi L., Royer-Carfagni G., Enhanced Effective Thickness of multi-layered laminated glass Composites: Part B 64 (2014) 202–213;
76. Gennady Vasilchenko-Malishev. Structural use of stacked annealed glass. Glass Processing Days (2007);
77. Giuseppe Campione., Mario Di Paola., Giovanni Minafo. Laminated Glass Members in Compression: Experiments and Modeling. *Journal of Structural Engineering*. 2014. №2. P. 1-9;
78. Glass in Building: Principles, Applications, Examples /Bernhard Weller et al, Detail Practice, 2009;
79. Glass Truss Bridge De Nationale Staalprijs is een bouwprijs voor projecten in staal URL: https://www.pinterest.com/pin/370632244335356593/ (Last accessed: 28.11.2020);
80. Haldimann M., Fracture strength of structural glass elements – analytical and numerical modeling, testing and design. Lausanne: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2006;
81. Haldimann M., Luible A., Overend M., Structural Use of Glass, ETH Zurich, Switzerland, 2008, 215 p. ISBN 3-85748-119-2.;

82. Heinz W. Krewinkel, Glass Buildings: Material, structure and detail (Basel: Birkhдuser,1998);
83. Hemmy van Reenen, Glazen engel klaar voor transport naar Zwolle. De stentor 1 december (2009);
84. Huang XK., Liu Q, Liu G, Zhou Z, Li G. Experimental investigation of multilayered laminated glass beams under in-plane bending. Struct Eng Mech 2016;60(5):781–794;
85. Interior of the Great Exhibition of 1851 stock illustration, URL: https://www.istockphoto.com/vector/interior-of-the-great-exhibition-of-1851-gm498334235-41047034, (Last accessed: 28.11.2020);
86. International Digital Image Correlation Society, Jones, E.M.C. and Iadicola, M.A. (Eds.) (2018). A Good Practices Guide for Digital Image Correlation, 10.32720/idics/gpg.ed1;
87. Jauffrès D., Morri C., Sherwood J., Chen J., Discrete mesoscopic modeling for the simulation of woven–fabric reinforcement forming. *International Journal of Material Forming*, 3, 2, 2009, 1205–1216;
88. Jo Miseré Glass Sculpture in Venlo URL: https://www.flickr.com/photos/jomisere/10749592536/in/photolist-SbZ2o5-7QJQ6v-8cFgGF-8cJzT9-8cJzRS-7QJQ46-7QJQ8B-7QN8tG-TCFrwh-BVV319-CkJX8f-BqE8Uv-8cFgN6 (Last accessed: 28.11.2020);
89. Kalamar R., Bedon Ch., Eliasova M. Experimental investigation for the structural performance assessment of square hollow glass columns. *Engineering Structures* 2016. №113. P.1–15;
90. Kalamar R., Eliasova M. Load Bearing Innovative Construction from Glass. *2nd International Conference on Innovative Materials*, Structures and Technologies. (Riga, 30 sep 2 oct. 2015 y.) Riga, 2015. P.1-7;
91. Kamarudin M.K., et al., Experimental and Numerical Investigation of the Buckling Performance of Tubular Glass Columns under Compression, *Structures* 15, 2018 355–369;
92. Katherine K. Leitch, Structural Glass Technology: Systems and Applications

(Massachusetts: ScB. Civil Engineering Brown University, 2004).

93. Khorasani N., “Design Principles For Glass Used Structurally” (http://www.lth.se/fileadmin/byggnadskonstruktion/publications/Report1025.pdf) accessed 08-11-2012;
94. Lanczos, C., An iteration method for the solution of the eigenvalue problem of linear differential and integral operators. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 45 (4), 1950, 255–282. doi:10.6028/jres.045.026.
95. Liu Q., et al., Investigation on flexural buckling of laminated glass columns under axial compression, *Engineering Structures* 133, 2017, 14–23;
96. Loughran P., Falling glass – problems and solutions in contemporary architecture. Basel:Birkhäuser, 2003.
97. Louter C., Bos F., Belis J., Lebet J., Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference. CRC Press, 2014.
98. Luible A., Crisinel M. Plate buckling of glass panels. In: Proceedings of glass processing days, 2005, Tampere, Finland;
99. Luible A., Schärer D., Lateral torsional buckling of glass beams with continuous lateral support. *Glass Struct Eng*, 2016;1(1):153–71;
100. Luible A., Stabilität von Tragelementen aus Glas. Lausanne: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne; 2004;
101. Miljojković J., Bijelić I., Vranić N., Radovanović N., Živković M., Determining elastic modulus of the material by measuring the deflection of the beam loaded in bending. *Technical Gazette* 24, 4, 2017, P1227-1234;
102. Mohamed Digital Image Correlation for Dynamic Shake Table Test Measurements. – 2019. https://www.researchgate.net/publication/326016564_Digital_Image_Correlation_for_Dynamic_Shake_Table_Test_Measurements;
103. Myxi Follow Thin Blue Lines 1.1 © 2008 All rights reserved URL: https://www.flickr.com/photos/myxi/2418316662/in/photolist-T2orM5-t3egaY sf1tTC-tiKvKi-2jKrEDA/ (Last accessed: 28.11.2020);
104. National Police Memorial URL: https://exploring-london.com/2013/08/14/10-more-curious-london-memorials5-national-police-memorial

/(Last accessed: 28.11.2020);

105. Nieuwenhuijzen E., Bos F., Veer F., The Laminated Glass Column, Glass Processing Days (2005);
106. Nijsse R., Glass in Structures: elements, concepts, designs (Basel: Birkhдuser,2003);
107. Nijsse, R., ten Brincke, E.H.J.: Glass columns. In: Louter, C., Bos, F., Belis, J., Lebet, J. (eds.) Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference, Lausanne 2014, pp. 625–632. Taylor & Francis Group, London (2014);
108. Oikonomopoulou, F., Bristogianni, T., Nijsse, R., Veer, F.A.: Innovative structural applications of adhesively bonded solid glass blocks. Glass Performance Days, pp. 256–261. Glass Performance Days, Tampere (2015a)
109. Oikonomopoulou, F., Bristogianni, T., Veer, F., Nijsse R.: Developing the bundled glass column. In: Cruz, P.J.S. (ed.) *Third International Conference on Structures and Architecture* (ICSA 2016). CRC Press, Portugal (2016);
110. Oikonomopoulou, F., Bristogianni, T., Veer, F., Nijsse, R.: The construction of the Crystal Houses facade: challenges and innovations. *Glass Struct. Eng*. (2017). doi:10.1007/ s40940-017-0039-4;
111. Oikonomopoulou, F., Veer, F.A., Nijsse, R., Baardolf, K., A completely transparent, adhesively bonded soda-lime glass blockmasonry system. J. FacadeDes.Eng. 2(3–4), 201–222 (2015b). doi:10.3233/fde-150021;
112. Ojalvo I. U., Newman M. Vibration modes of large structures by an automatic matrix-reduction method. *AIAA Journal*. **8** (7), 1970, 1234–1239. doi:10.2514/3.5878;
113. Ojalvo I. U., Origins and advantages of Lanczos vectors for large dynamic systems. *Proc. 6th Modal Analysis Conference (IMAC)*, Kissimmee, 1988, FL. pp. 489–494;
114. Patterson, Structural Glass Facades and Enclosures (Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2011);
115. Pešek O., Horáček M., Melcher J., Experimental Verification of the Buckling Strength of Strucutral Glass Columns, *Procedia Engineering*, vol. 161, pp. 556-562, 2016;

116. Pešek O., Melcher J., “Lateral-torsional buckling of glass members,” International Journal of Science, *Engineering and Technology*, vol. 82, eISSN 2010-3778, 2013;
117. Pešek O., Melcher J., Balázs I., Experimental Verification of the Structural Glass Beam-Columns Strength, *Materials Science and Engineering* 245, 2017, doi:10.1088/1757-899X/245/3/032068;
118. Pocanschi A., Phocas M. C., A light pole made of glass for lighting of the market square in Göppingen, *Ernst & Sohn Verlag for Architecture and Technical Sciences GmbH&Co.KG, Berlin Bautechnik* 85, 2008, issue 10, pp.659-666, DOI: 10.1002/bate.200810049;
119. Pompano Park Casino - glass water feature containing 6 tonnes of glass URL: https://www.pinterest.com/pin/561824122238125418/ (Last accessed: 28.11.2020);
120. Pompano Park Casino, Fort Lauderdale, Florida URL: https://www.pinterest.com/pin/561824122238125418 (Last accessed: 28.11.2020);
121. prEN 16612:2013. Glass in building - Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing. European Committee for Standardization (CEN), 2013. 45 p;
122. Program Description Add-on Module RF-STABILITY ©Dlubal Software GmbH 2014 Am Zellweg 2 D-93464 Tiefenbach Germany, 2014;
123. Rasmus Ingomar Petersen and Anne Bagger “Structural use of glass: Cruciform columns and glass portals with bolted connections subjected to bending” Glass Processing Days (2009);
124. Reichman A., Development of Nano–characterization System for Polymer Film Measurement and Single BGA Solder Joint Forming Experiment. ProQuest, 2007;
125. Royer-Carfagni G., Silvestri M., A proposal for an arch footbridge in Venice made of structural glass masonry, Engineering Structures 29 (2007) 3015–3025;
126. Sable L., Skukis E., Japins G., Kalnins K. Correlation between Numerical and Experimental Tests of Laminated Glass Panels with Visco-elastic Interlayer. *Procedia Engineering*. 2017. № 172. P. 945-952. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.107;

127. Schober H., Schneider J., Developments in Structural Glass and Glass Structures“. *Structural Engineering International* 2 (2004);
128. Schott: duran, Tubing, Capillary and Rod of Borosilicate Glass 3.3. In: AG, S. (ed.). Germany (2012);
129. Shelby J.E., Introduction to glass science and technology. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2005;
130. Sophia and Stefan Behling Editors, Glass: structure and Technology in Architecture (Mьnchen: Presetel, 1999);
131. Statue, green glass, angel, michael, patron saint, square, town, architecture, building exterior, built structure URL: https://www.pxfuel.com/en/free-photo-xjnin (Last accessed: 28.11.2020);
132. Steel and Glass facades URL: https://www.pinterest.com/pin/426856870902348039/ (Last accessed: 28.11.2020);
133. Surmai M., Tkach R., An analysis of experimental study of glass multilayer columns made of thermally strengthened glass, *Scientific Collection «InterConf»,* (39): with the Proceedings of the 8 th International Scientific and Practical Conference, Science and Practice: Implementation to Modern Society, December 26-28, 2020. Manchester, Great Britain, P1770-1773;
134. Surmai M., Tkach R., Analysis of strength and deformativity of glass plate joints under static loading, *Technology audit and production reserves*, № 2/1(52), 2020. P38-41. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.202735;
135. 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;
136. 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;
137. Sutton, M. A., Orteu, J. and Schreier, H. W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. New York:

Springer Science+Business; 2009;
138. Technology meets aesthetics URL: https://www.schott.com/innovation/en/technology-meets-aesthetics/ (Last accessed: 28.11.2020);
139. Tower Place (London). URL: http://wikimapia.org/203560/Tower-Place (Last accessed: 28.11.2020);
140. Unknown author, Konstruktive Glasrohre, Structural Glass Tubes – Tower Place London, Detail 7/8 (2003);
141. Veer F.A., Nägele T., Janssen M.J.H.C., 2005, The possibilities of glass bond adhesives. Tampere: GPD;
142. Veer F.A., Pastunink J.R., (1999) Developing a Transparent Tubular Laminated Column, Glass Processing Days, 13–16 June, pp. 277-280;
143. Veer F.A., Zuidema J., The Strength of Glass, Effect of Edge Quality, Glass Processing Days (2003);
144. Veer, F.A. 2007. The strength of glass, a nontransparent value. Heron. pp. 87-104.
145. Verbund-Sicherheitsglas mit einer Verbundfolie der Produktfamilie EVASAFE mit Ansatz eines Schubverbundes: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-70.3-
146. Weller, B., Harth K., Tasche, S., & Unnewehr, S. (2009). Glass in building: principles, applications, examples. *Regensburg*, Germany: Aumuller Druck;
147. Wölfel E., Elastic Composite: An Approximation Solution and its Application Possibilities, *Stahlbau*, 6: 173–180, 1987;
148. Wurm J., Stacking of glass – Structures and Sculptures, Glass Processing Days (2007);
149. Zappa E., Turrisi S., Lavatelli A. Estimation and compensation of motion blur for the reduction of uncertainty in DIC measurements of flexible bodies, *Journal of Physics: Conf. Series* 1149 (2018) 012009, P1-10, DOI:10.1088/1742-6596/1149/1/012009.

ДОДАТОК А. Акти про впровадження результатів дисертаційних наукових досліджень

СКЛО РЕСУРС
skloresurs.com

Акт

впровадження результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційної роботи Ткача Романа Олександровича «Несуча здатність та деформативність скляних багатошарових колон», а саме рекомендації з проектування скляних багатошарових колон, були використані під час варіантного проектування вертикальних несучих колон фасадного огородження вхідної групи у торгово-розважальному центрі «Форум» у Львові на вул. Під Дубом, 7Б та фасадної системи автосалону«Land Rover, Jaguar» у Києві, який розташовується за адресою:кільцева дорога, 1-А, 03134.

В обох об'єктах були запроектовані скляні багатошарові колони, на противагу традиційним профільним системам, на які повинні були монтуватися вертикальні склопакети фасаду. Вони виконували огороджувальну функцію, сприймали вітрове навантаження та власну вагу. Розрахунок був виконаний за двома методиками, а саме:

- з використанням чисельно – аналітичним методом розрахунку на основі концепції ефективної товщини Вольфеля-Беннісона;
- з використанням програмного комплексу ©Dlubal RFEM, в якому використано метод кінцевих елементів.

Використання скляних багатошарових колон давало можливість покращити загальний естетичний вигляд фасаду, а також інтер'єру вхідної групи торгово-розважального центру «Форум» та автосалону «Land Rover, Jaguar», в порівнянні з традиційними профільними системами. Оскільки, зовнішні огороджуючі конструкції виконувались повністю зі скла і були прозорі, таке рішення відповідало сучасним архітектурним течіям в будівництві.

Генеральний директор
ТОВ «Склоресурс» **О.М. Кірічук**

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «СКЛОРЕСУРС» SKLORESURS skloresurs.com 34629505 УКРАЇНА РІВНЕНСЬКА обл. м. ДУБНО

Семидубська, 105, Дубно, Україна
skloresurs.com
office@skloresurs.com
+38 /03656/ 282 83
+38 /03656/ 455 65 fax

ЄДРПОУ 34629505; ІПН 346295017178;
р/р 26008210303995 в АТ "Прокредитбанк" МФО 300584;
р/р 26000504842600 в АТ "УкрСиббанк" МФО 351005;

Рис. А.1. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи від ТОВ «Склоресурс»

Приватне підприємство

ПП «Ямпільтеплобудсервіс»

Адреса: 24500, вул.І.Виговського,10, м.Ямпіль, Вінницька область

код ЄДРПОУ 35160369

Р/р UA373808050000000026007607857 АТ Райффайзен Банк Аваль МФО 380805

№137 від 15.12.2020р.

Довідка

про впровадження результатів

При розробці проектно-кошторисної документації вхідної групи в аптеку №1 ТОВ «Пігулка+» за адресою: вулиця Сонячна, 4 місто Ямпіль Вінницької області, працівниками ПП «Ямпільтеплобудсервіс» запроектовано дві скляні багатошарові колони висотою 2,81м, для передачі навантаження від даху на фундамент.

Для проектування вище наведених конструкцій використано результати дисертаційного наукового дослідження Ткача Романа Олександровича на тему «Несуча здатність та деформативність скляних багатошарових колон». Було використано рекомендації щодо їх проектування. Підібрано поперечний переріз колон, що склав 100 х70 мм, за допомогою запропонованого підходу, щодо розрахунку скляних багатошарових колон. Для обпирання кінців колони, запроектовано металеві опори у вигляді «чобітків» на основі результатів дисертаційного дослідження.

За допомогою запропонованих ефективних рішень було запроектовано скляні конструкції у вигляді колон для реалізації концепції вхідної групи в аптеку №1 «Пігулка+» запропоновану архітектором.

Директор
ПП «Ямпільтеплобудсервіс» Л.М. Пасілецька

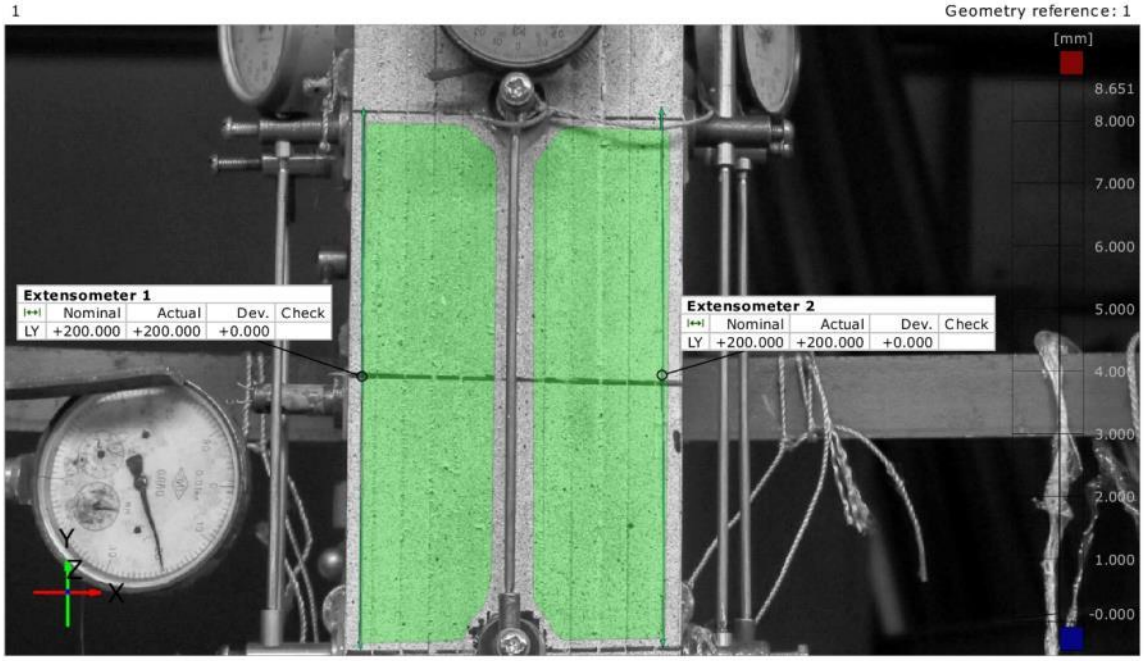
Рис. А.2. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи від ПП «Ямпільтеплобудсервіс»

ДОДАТОК Б. Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

KC-6.2.1(120x70)

1

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+200.000			+0.000		
Extensometer 2		LY	+200.000	+200.000			+0.000		

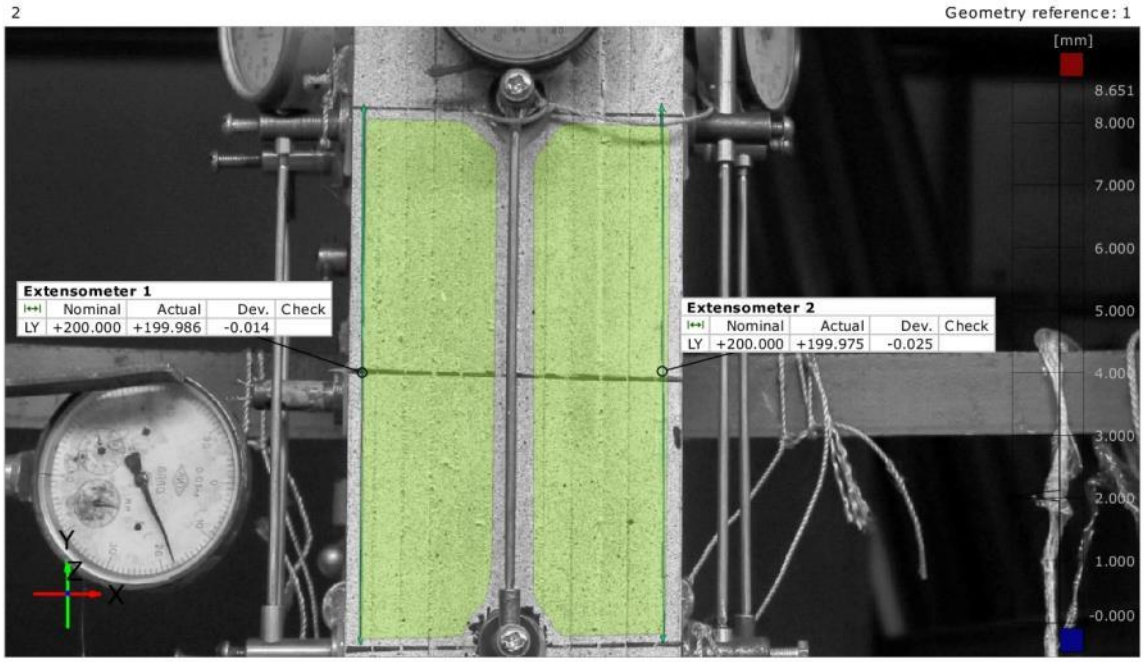
Original alignment

Length unit: mm

1/48

Рис. Б.1 Протоколи випробувань скляної багатошарової колони методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.986			-0.014		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.975			-0.025		

Original alignment Length unit: mm

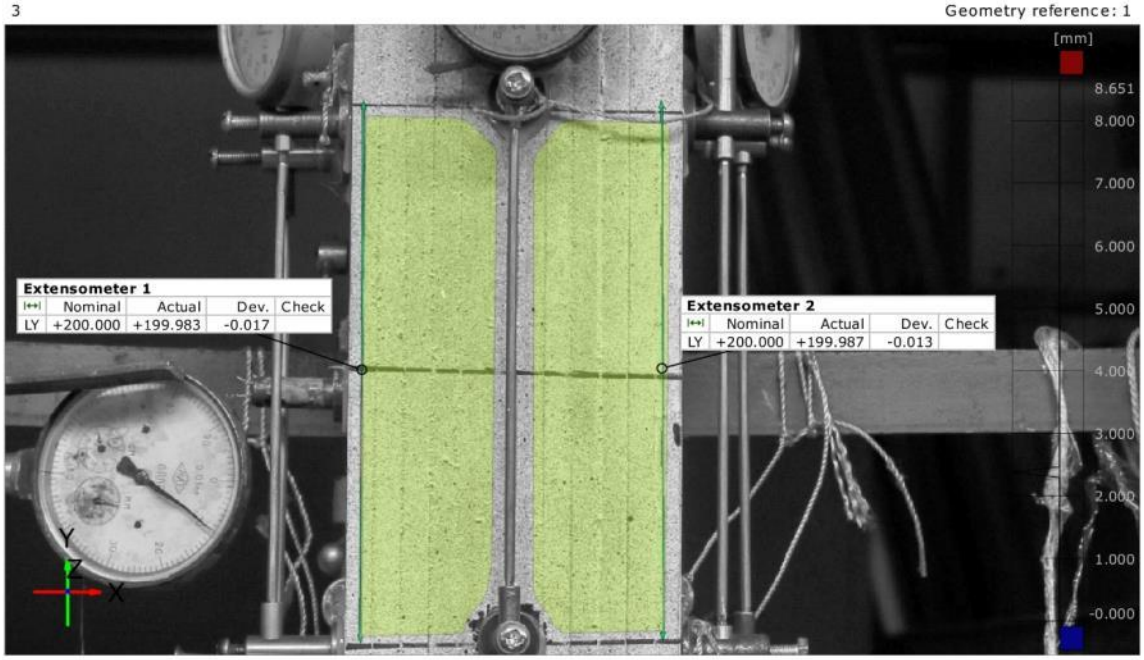
2/48

Рис. Б.2 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

3

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.983			-0.017		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.987			-0.013		

Original alignment

Length unit: mm

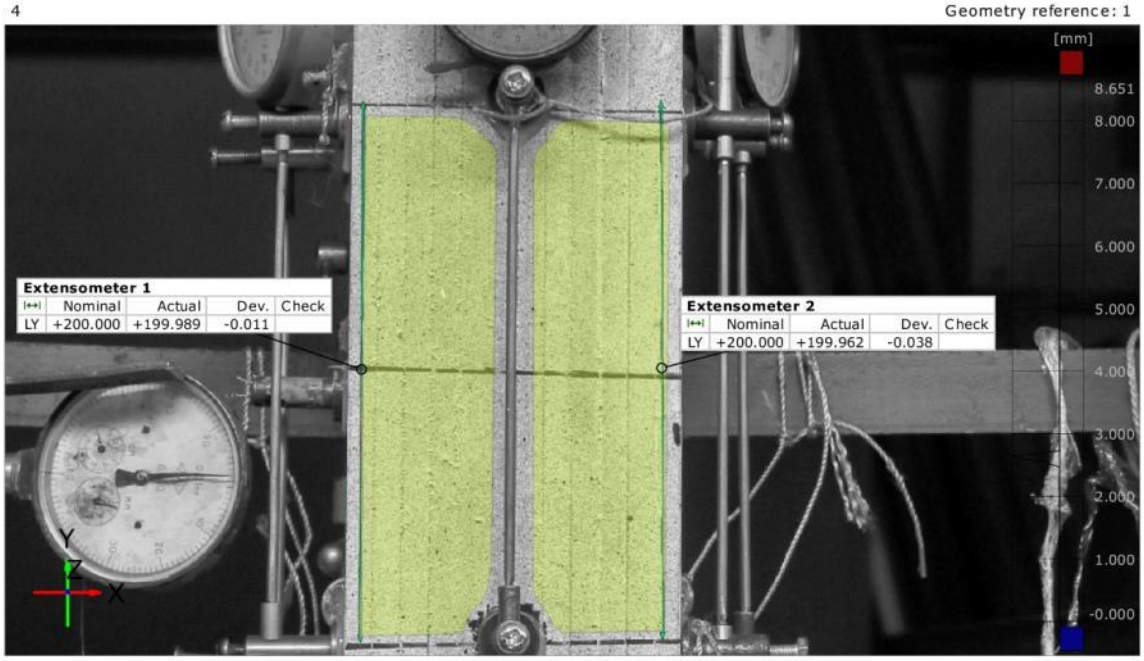
3/48

Рис. Б.3 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

KC-6.2.1(120x70)

4

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.989			-0.011		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.962			-0.038		

Original alignment

Length unit: mm

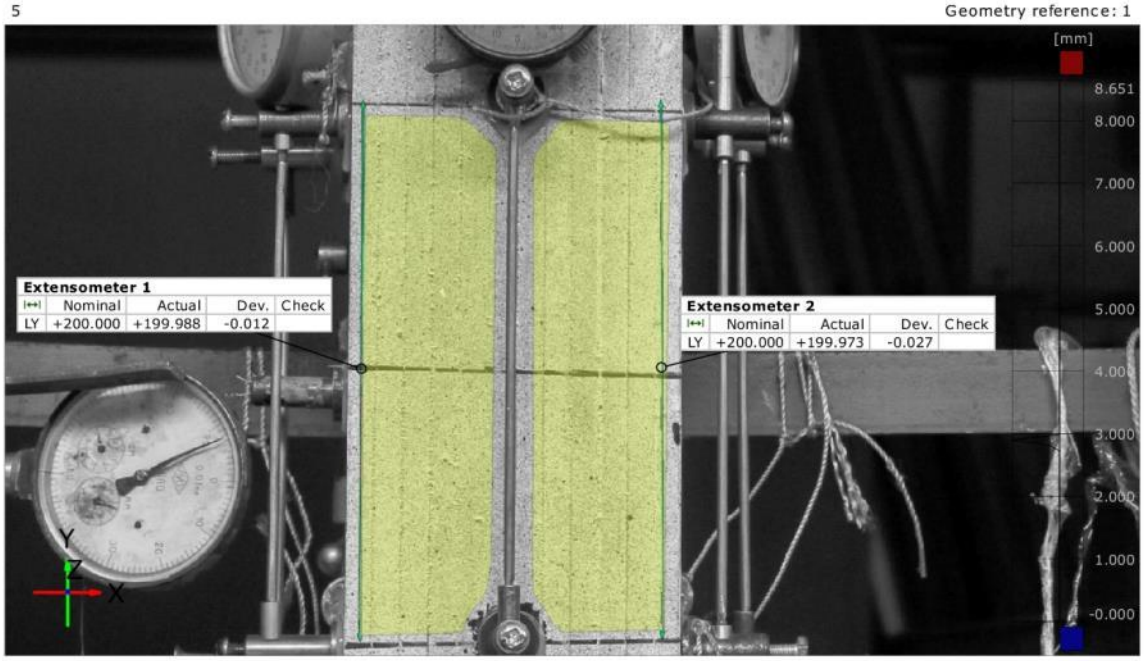
4/48

Рис. Б.4 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

5

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.988			-0.012		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.973			-0.027		

Original alignment

Length unit: mm

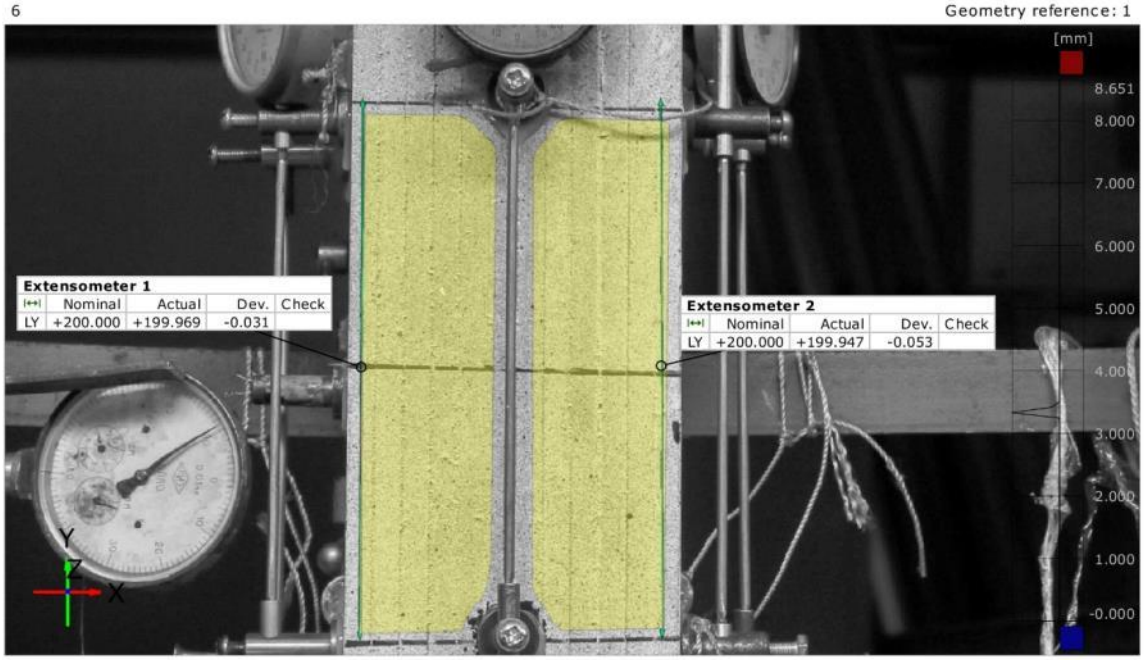
5/48

Рис. Б.5 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

6

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.969			-0.031		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.947			-0.053		

Original alignment

Length unit: mm

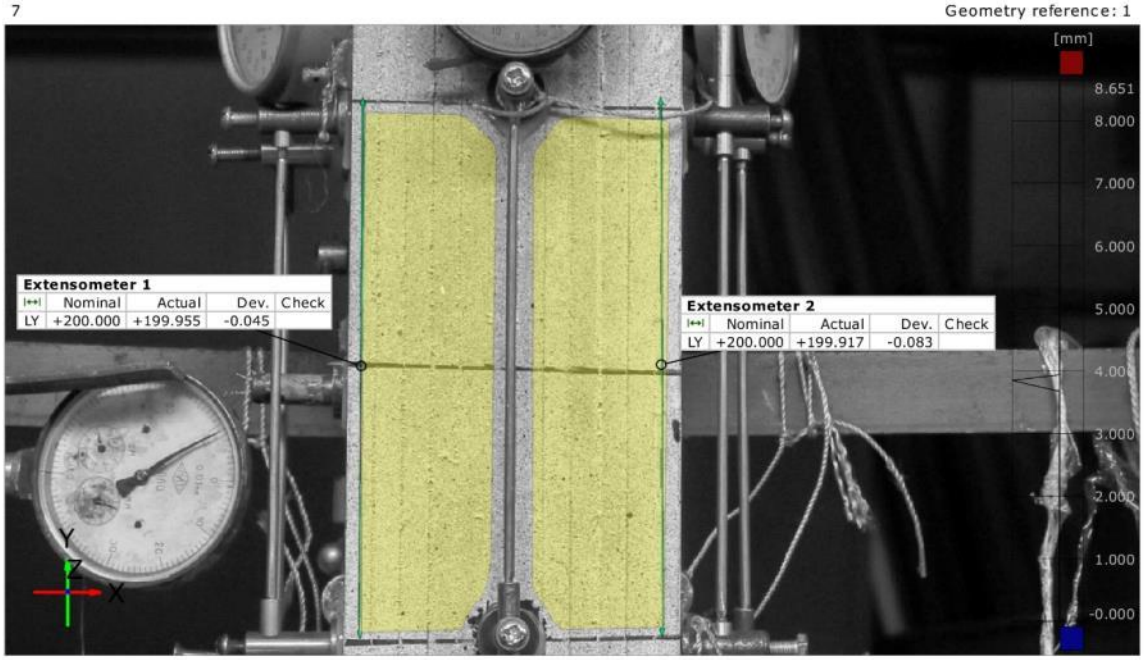
6/48

Рис. Б.6 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

7

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.955			-0.045		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.917			-0.083		

Original alignment

Length unit: mm

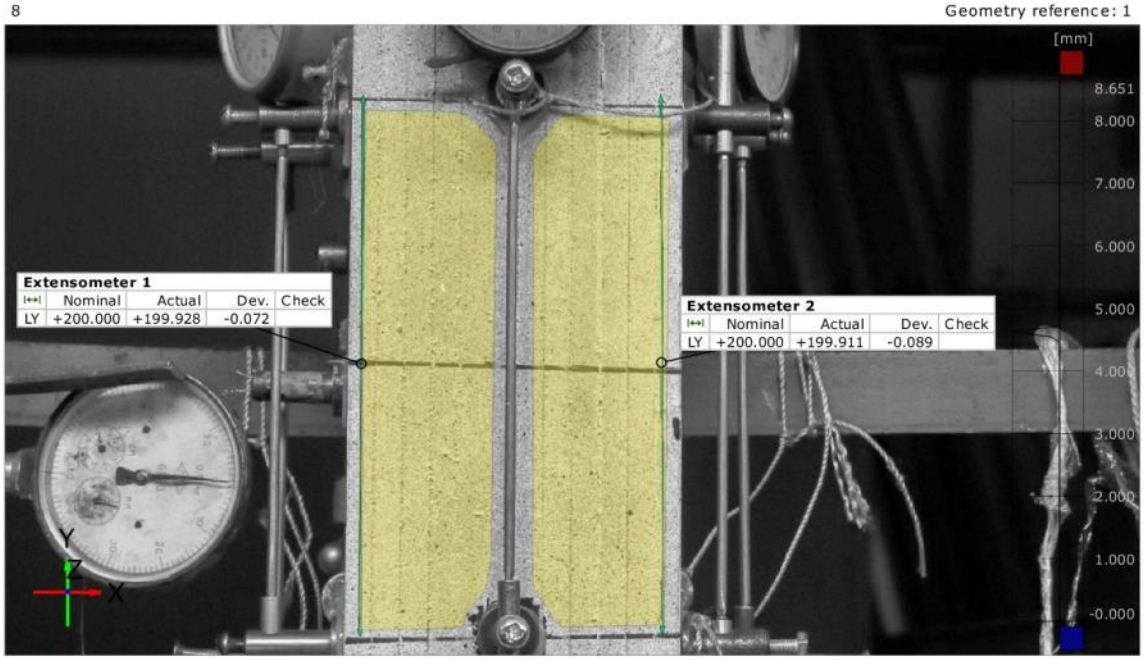
7/48

Рис. Б.7 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

8

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.928			-0.072		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.911			-0.089		

Original alignment

Length unit: mm

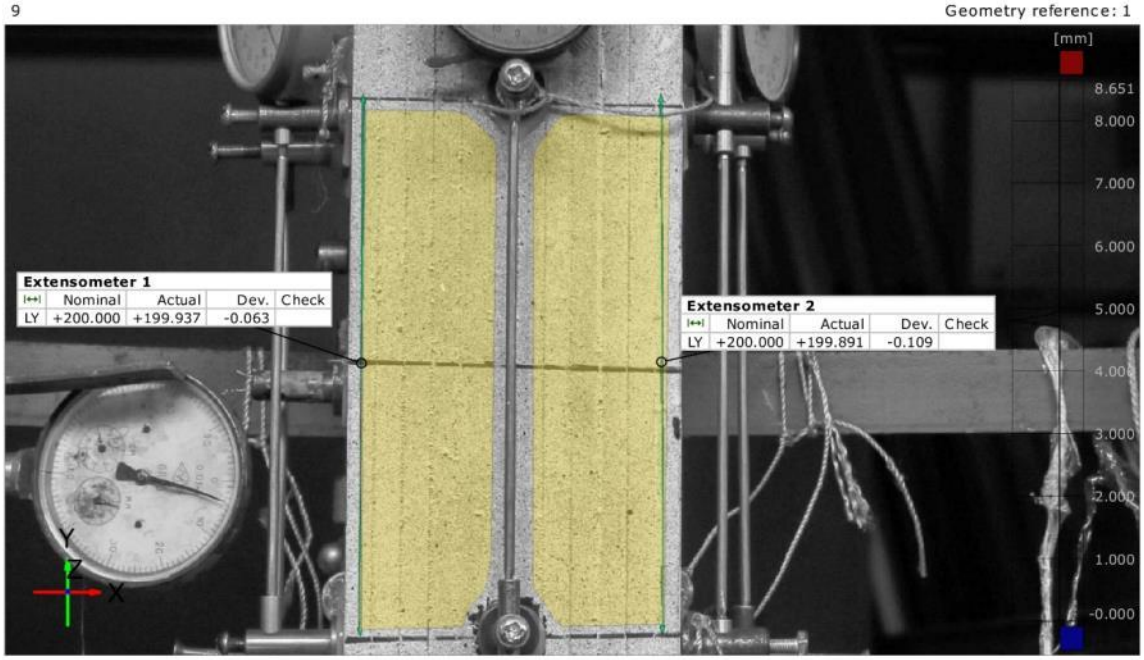
8/48

Рис. Б.8 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

9

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.937			-0.063		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.891			-0.109		

Original alignment

Length unit: mm

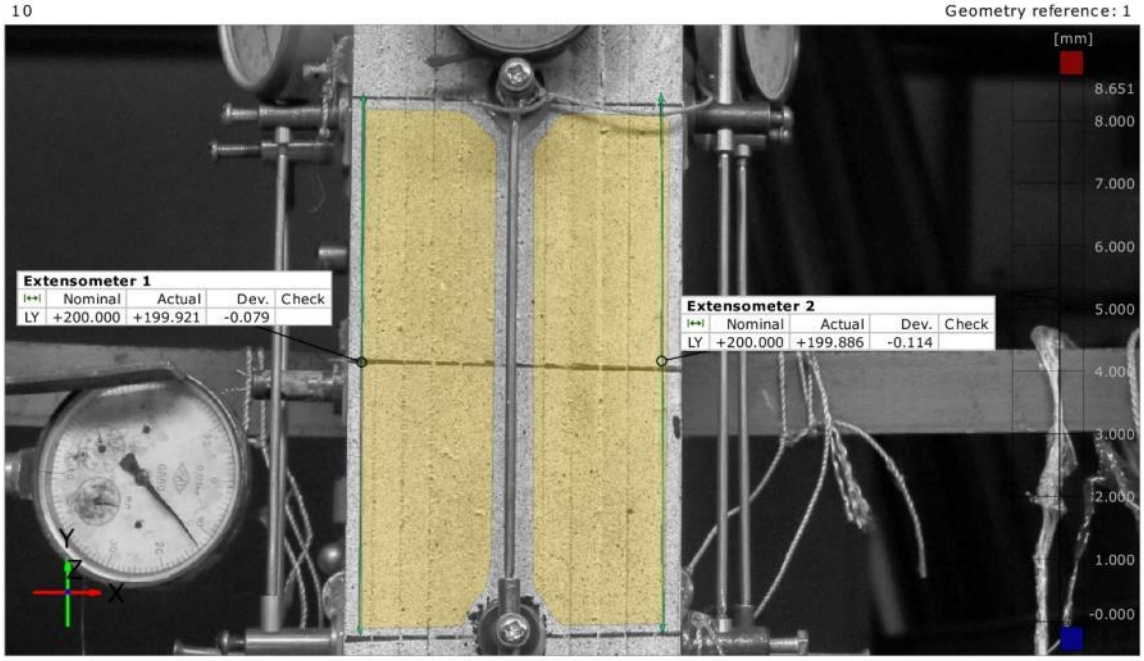
9/48

Рис. Б.9 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

10

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.921			-0.079		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.886			-0.114		

Original alignment

Length unit: mm

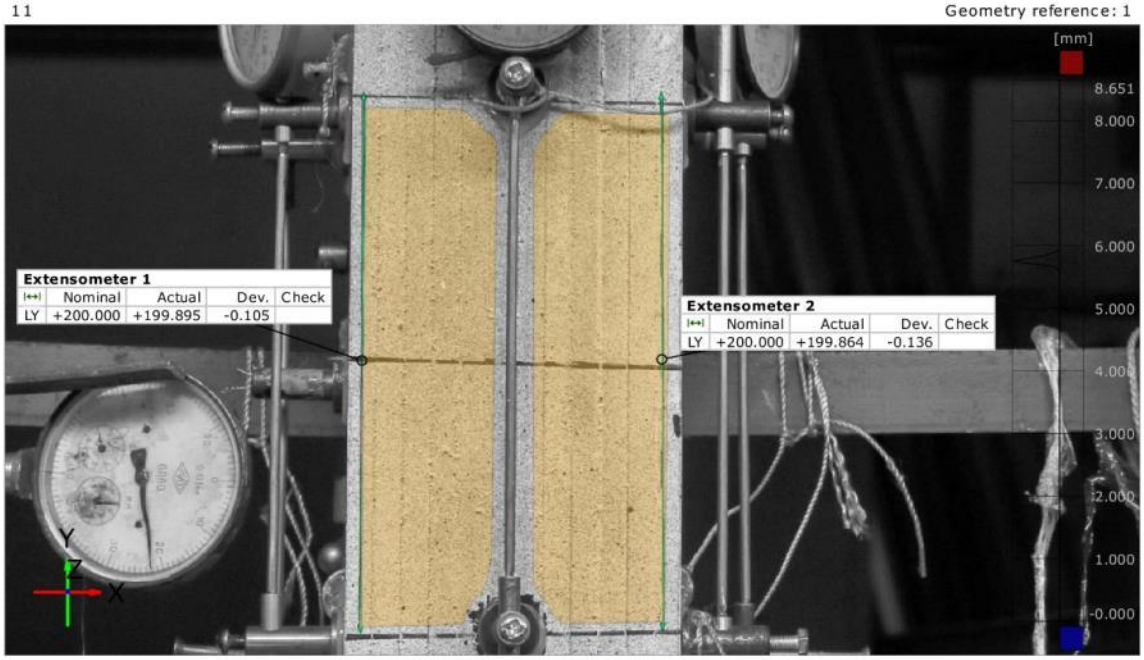
10/48

Рис. Б.10 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

11

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.895			-0.105		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.864			-0.136		

Original alignment

Length unit: mm

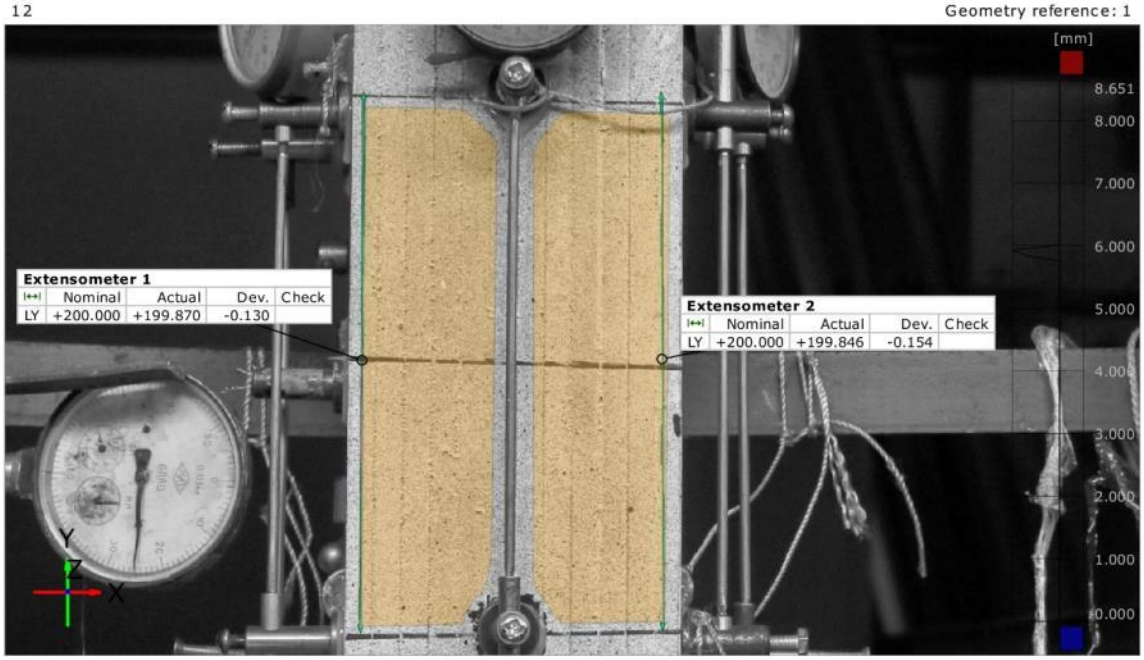
11/48

Рис. Б.11 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

12

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.870			-0.130		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.846			-0.154		

Original alignment

Length unit: mm

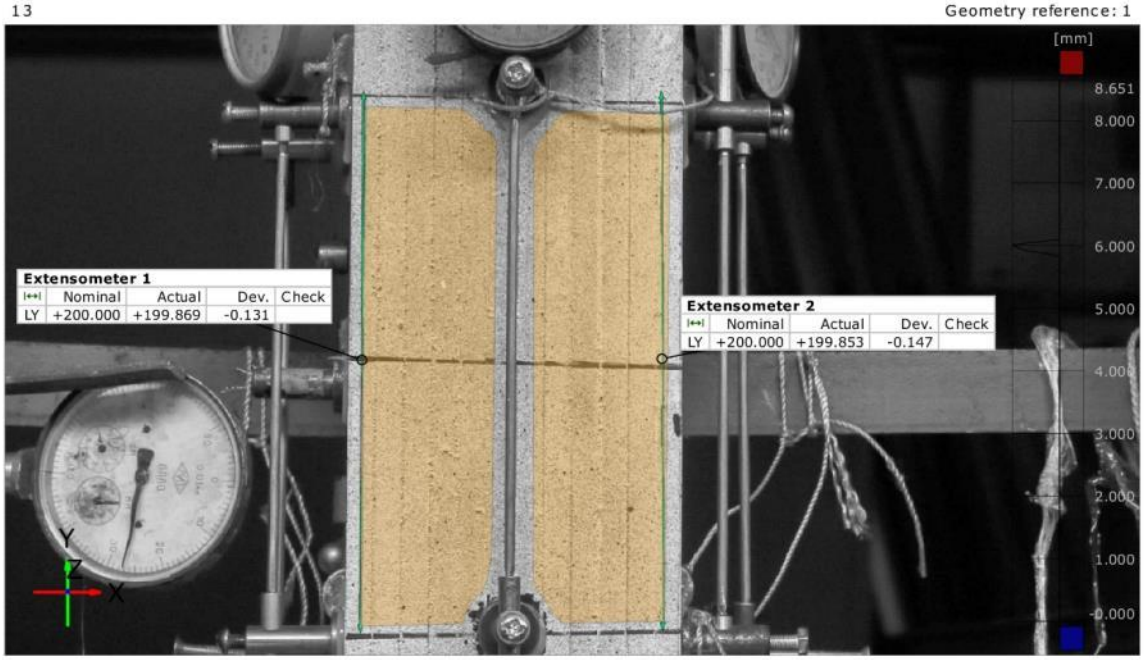
12/48

Рис. Б.12 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

13

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.869			-0.131		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.853			-0.147		

Original alignment

Length unit: mm

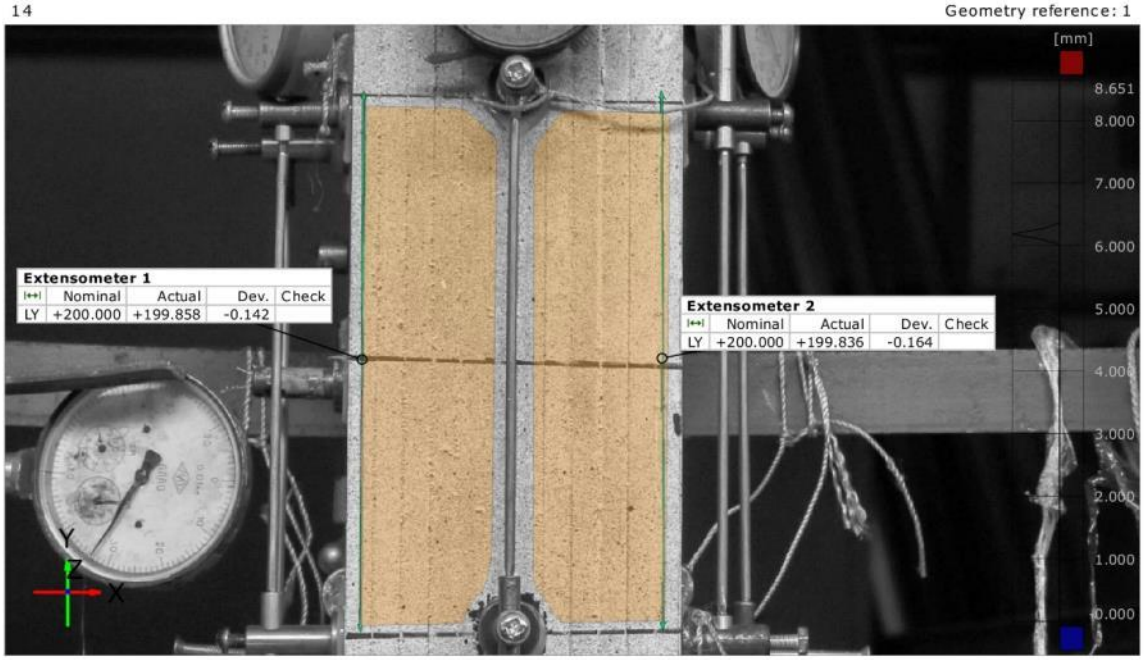
13/48

Рис. Б.13 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

14

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.858			-0.142		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.836			-0.164		

Original alignment

Length unit: mm

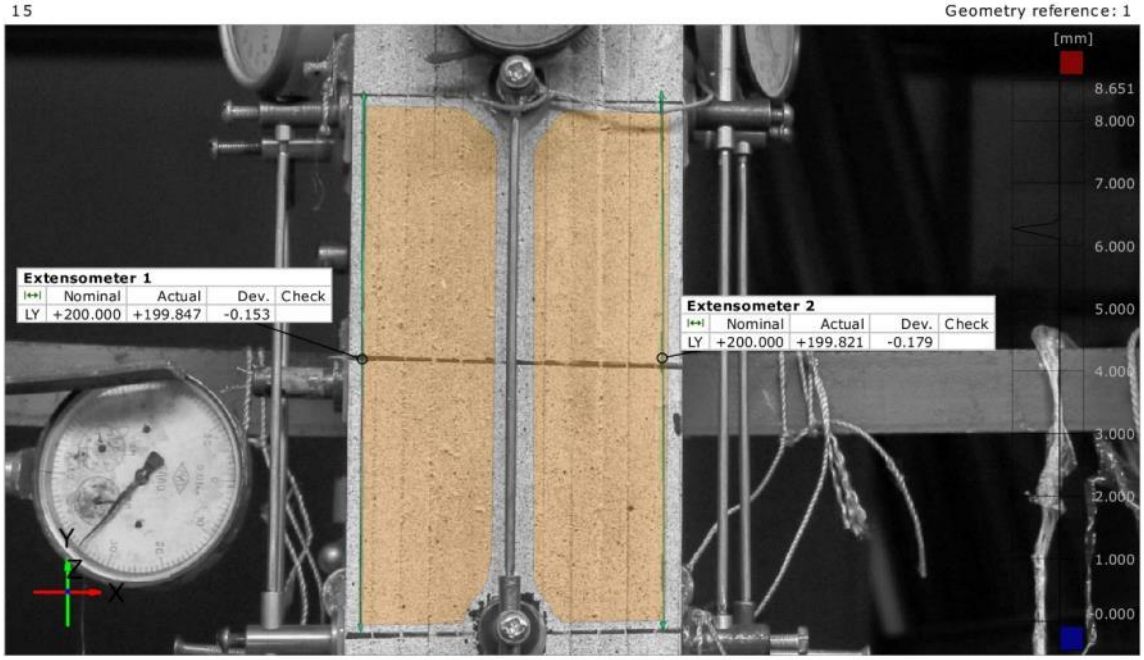
14/48

Рис. Б.14 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

15

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.847			-0.153		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.821			-0.179		

Original alignment

Length unit: mm

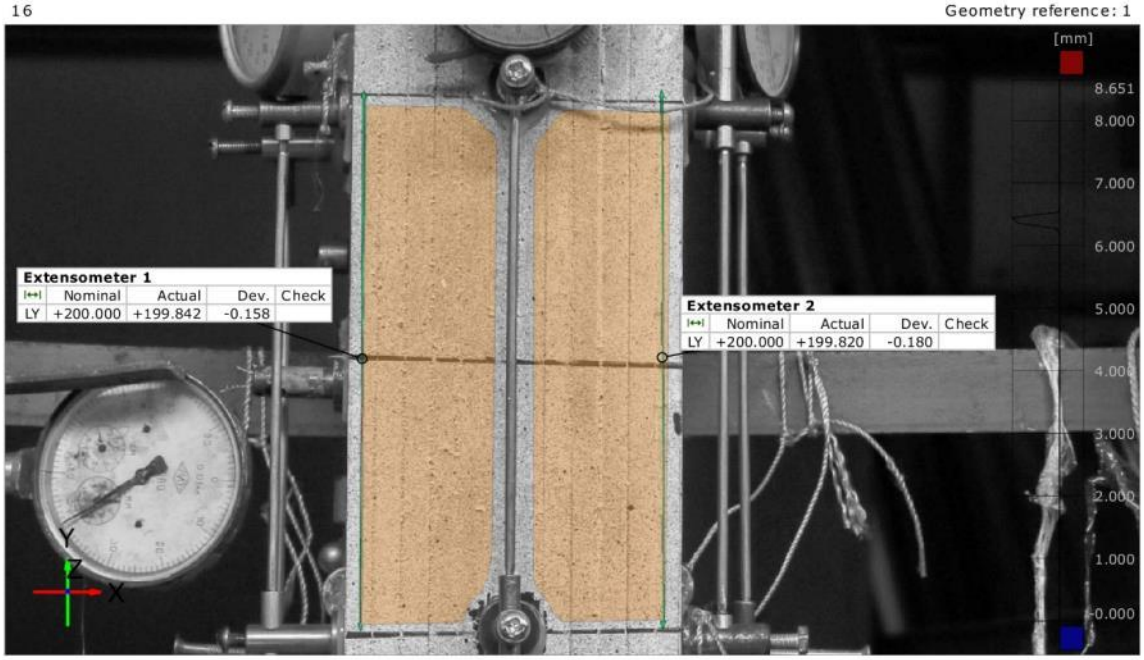
15/48

Рис. Б.15 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

16

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.842			-0.158		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.820			-0.180		

Original alignment

Length unit: mm

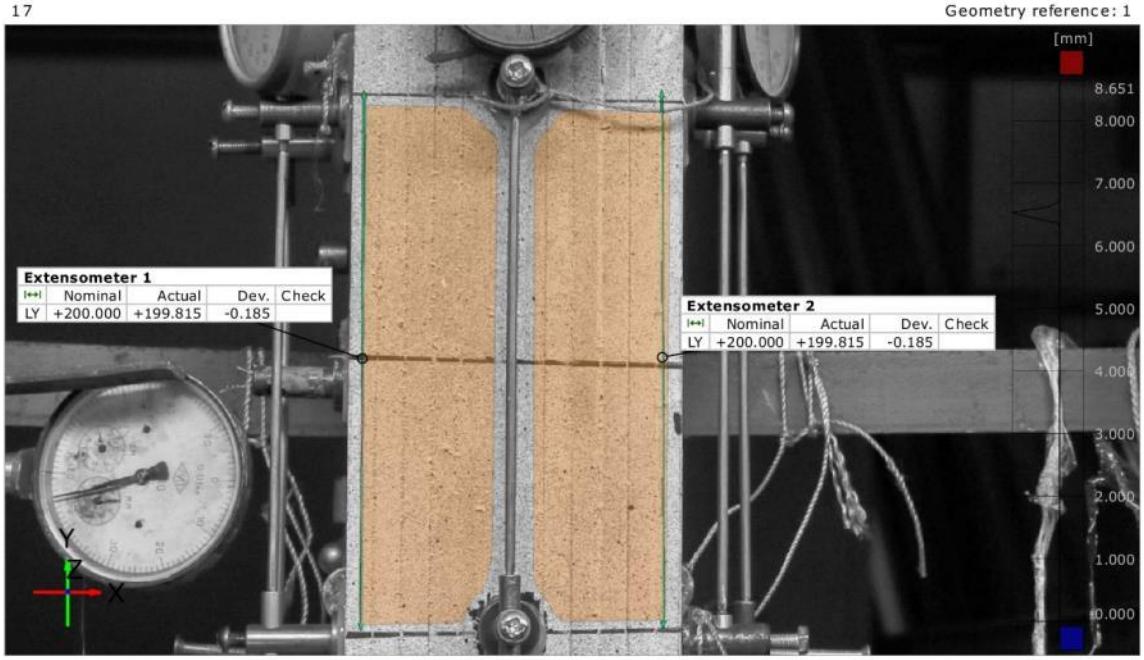
16/48

Рис. Б.16 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

17

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.815			-0.185		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.815			-0.185		

Original alignment

Length unit: mm

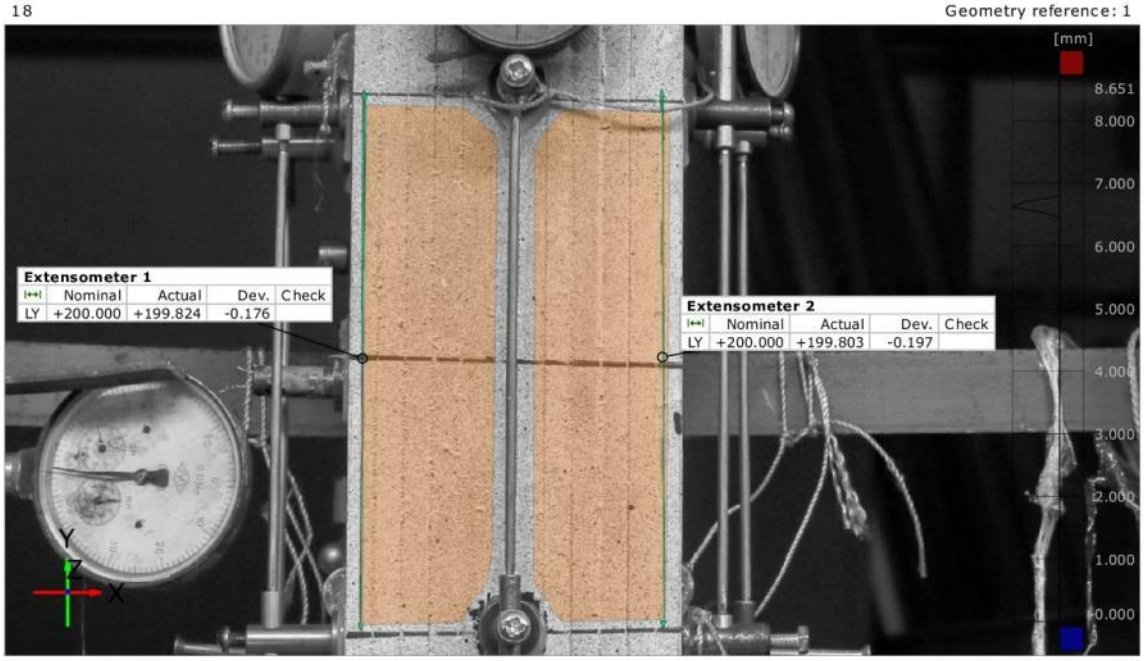
17/48

Рис. Б.17 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

18

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.824			-0.176		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.803			-0.197		

Original alignment

Length unit: mm

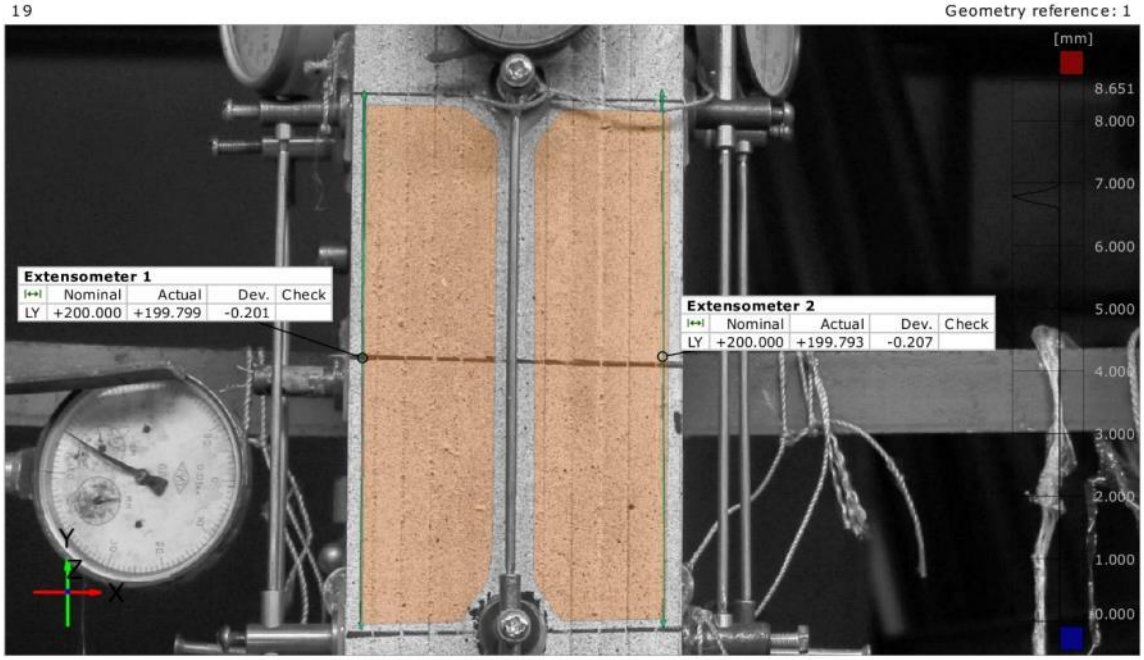
18/48

Рис. Б.18 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

19

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.799			-0.201		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.793			-0.207		

Original alignment

Length unit: mm

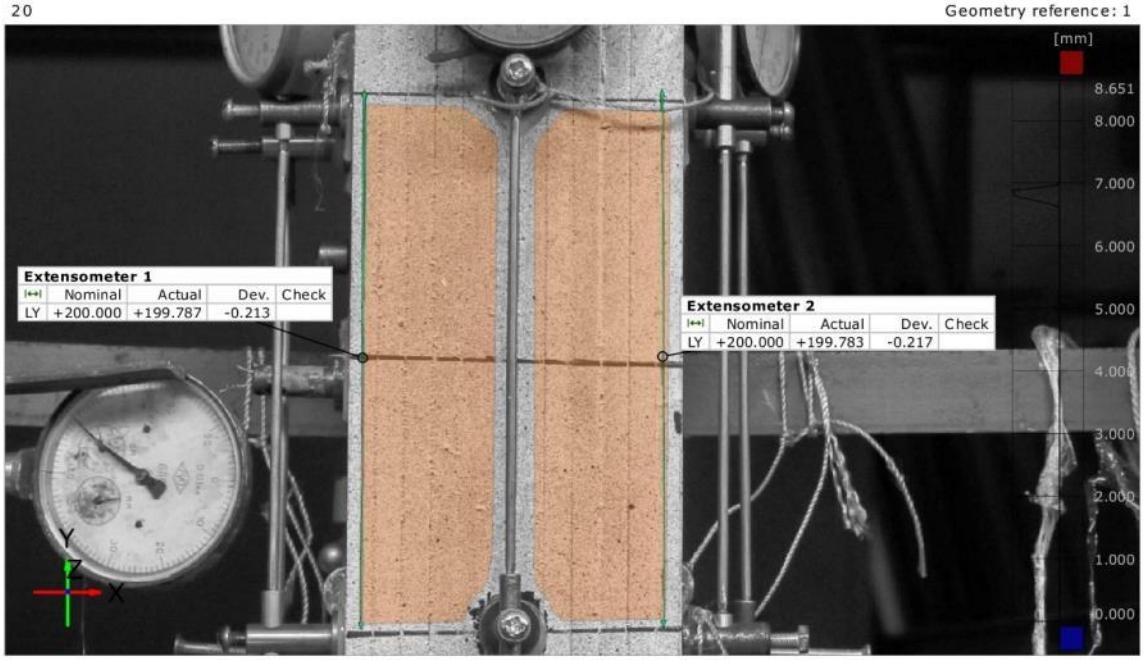
19/48

Рис. Б.19 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

20

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.787			-0.213		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.783			-0.217		

Original alignment

Length unit: mm

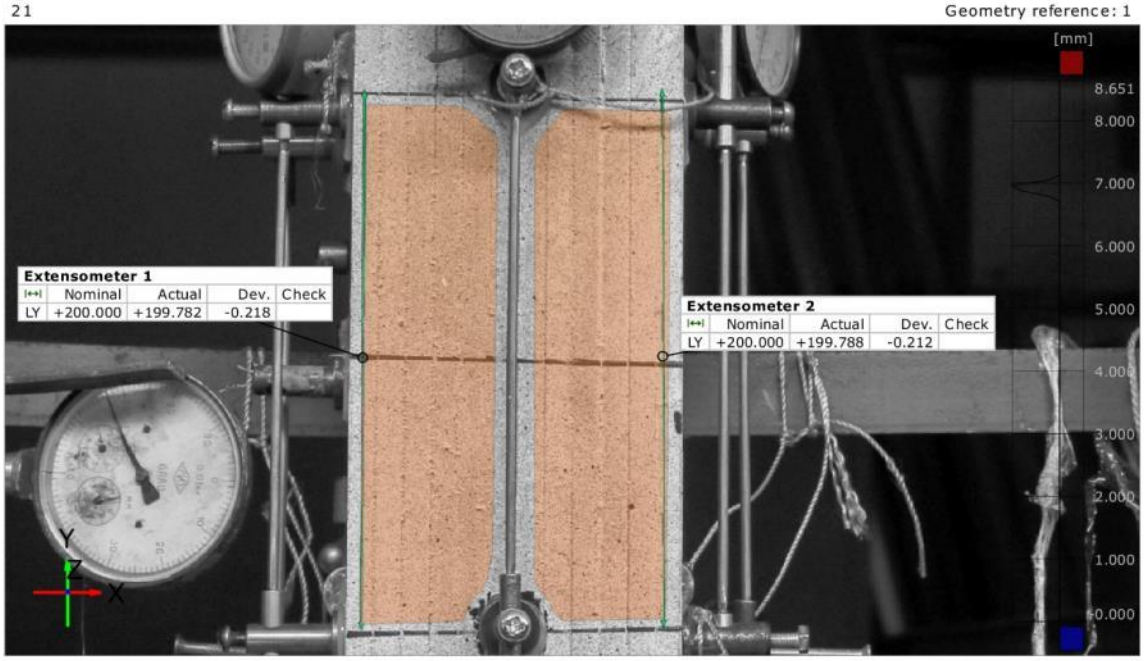
20/48

Рис. Б.20 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

21

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.782			-0.218		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.788			-0.212		

Original alignment

Length unit: mm

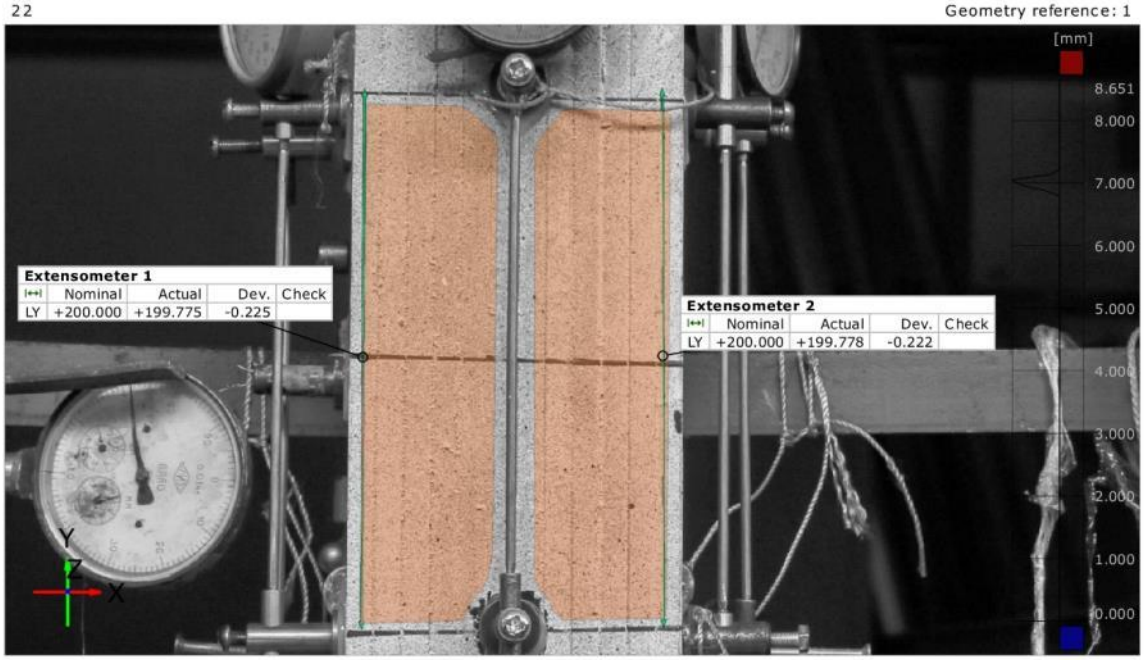
21/48

Рис. Б.21 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

22

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.775			-0.225		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.778			-0.222		

Original alignment

Length unit: mm

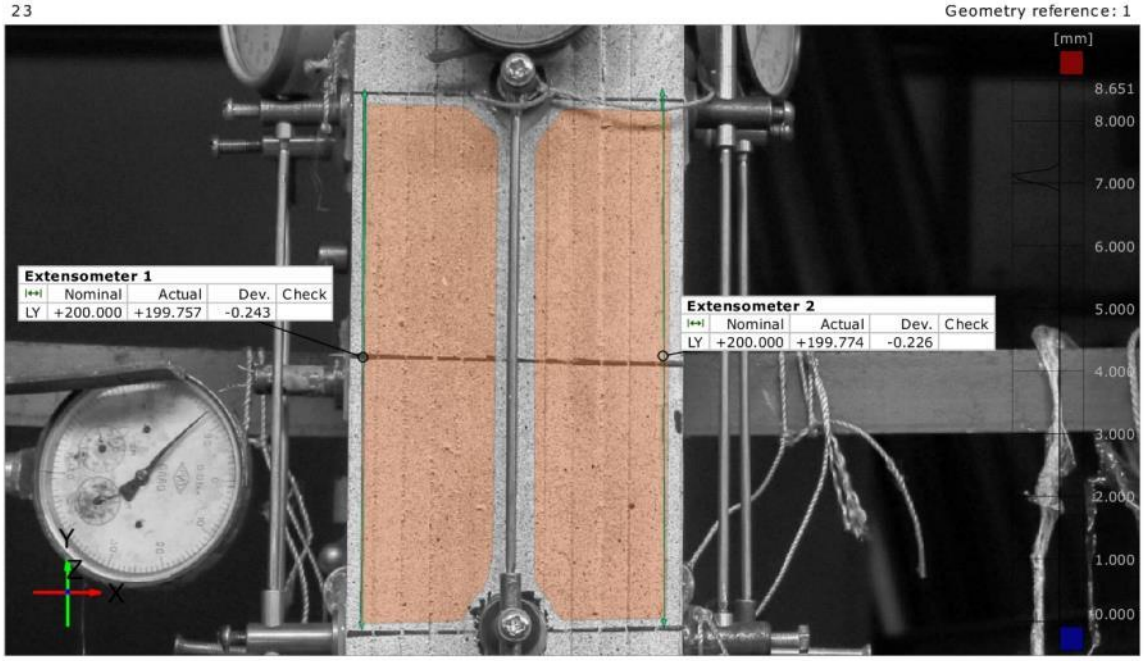
22/48

Рис. Б.22 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

23

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.757			-0.243		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.774			-0.226		

Original alignment

Length unit: mm

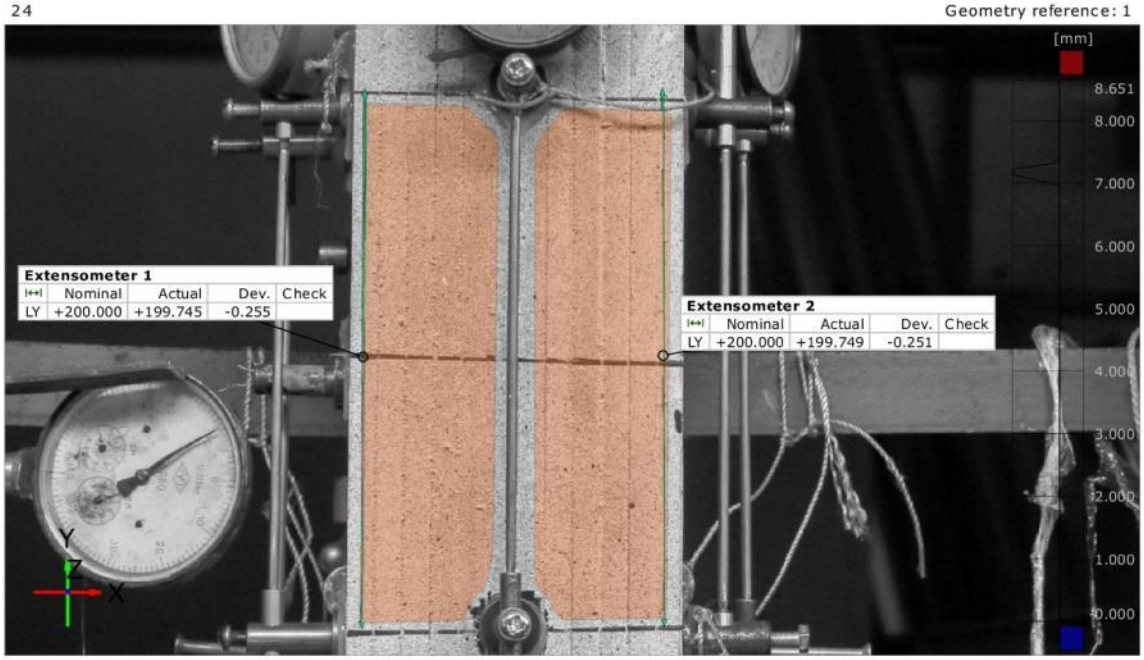
23/48

Рис. Б.23 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

24

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.745			-0.255		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.749			-0.251		

Original alignment

Length unit: mm

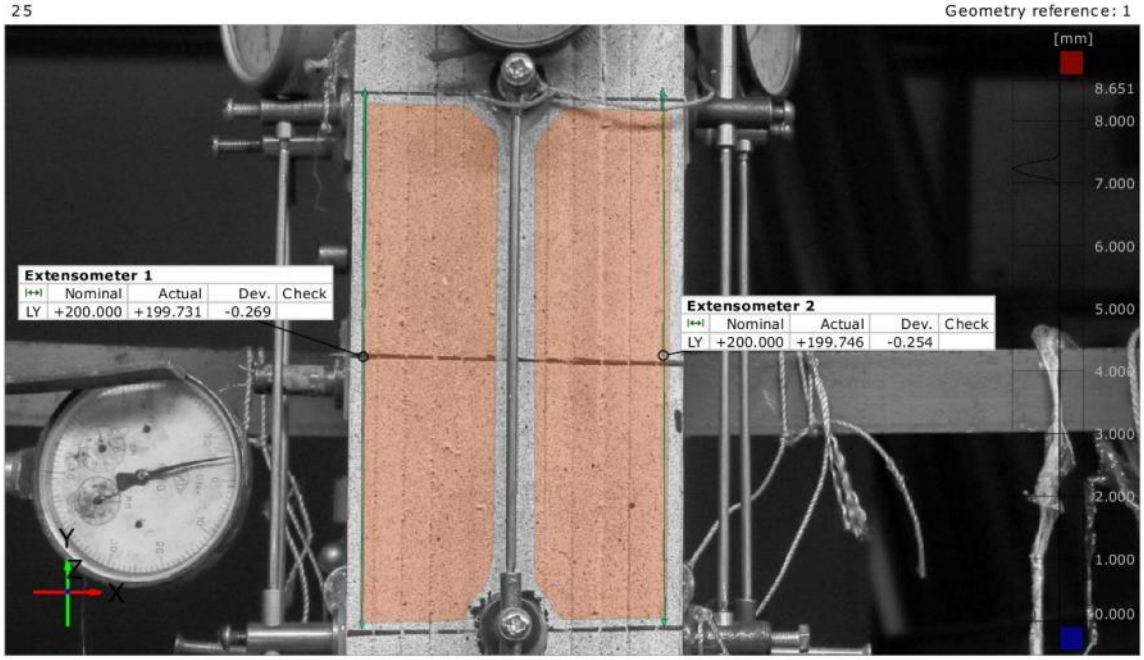
24/48

Рис. Б.24 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

25

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.731			-0.269		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.746			-0.254		

Original alignment

Length unit: mm

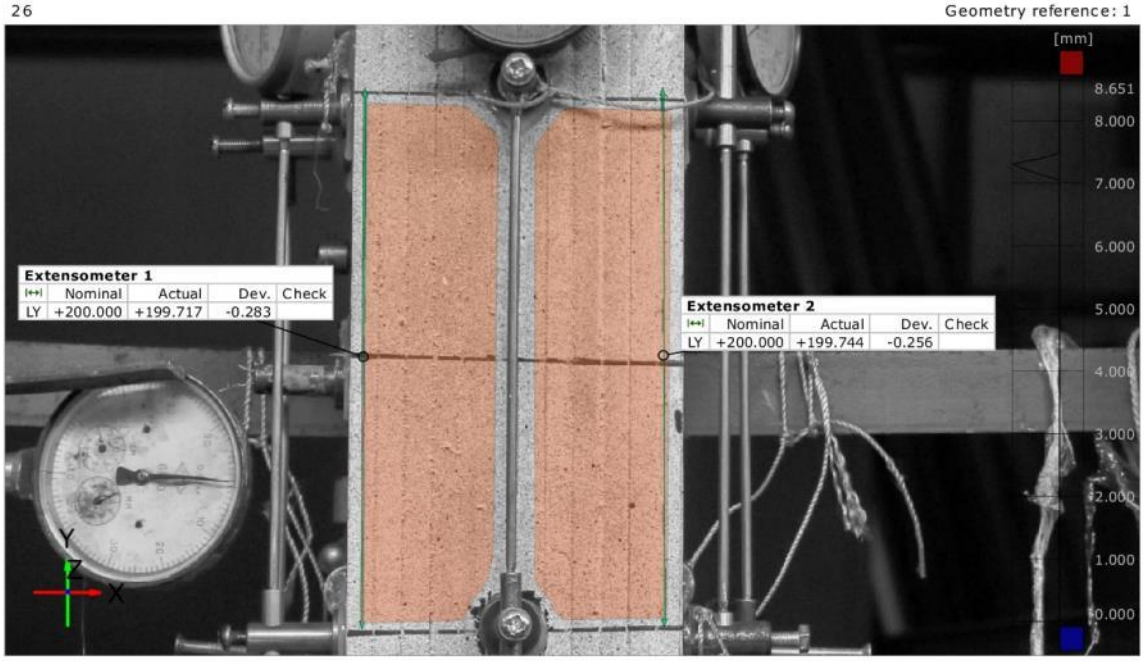
25/48

Рис. Б.25 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

26

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.717			-0.283		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.744			-0.256		

Original alignment

Length unit: mm

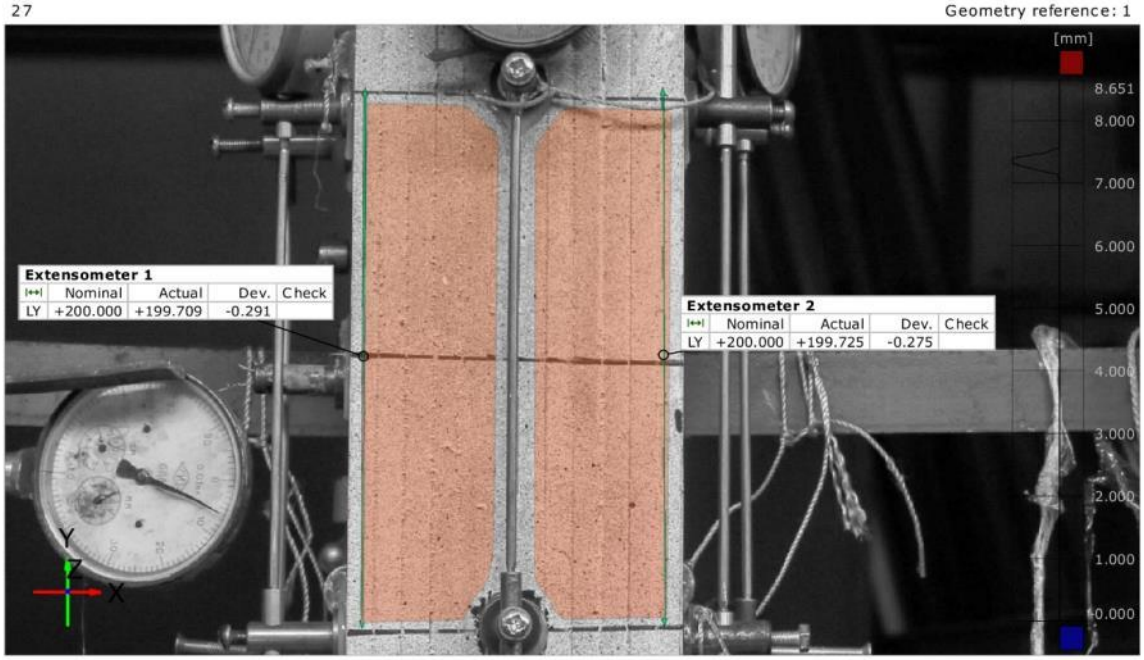
26/48

Рис. Б.26 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

27

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.709			-0.291		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.725			-0.275		

Original alignment

Length unit: mm

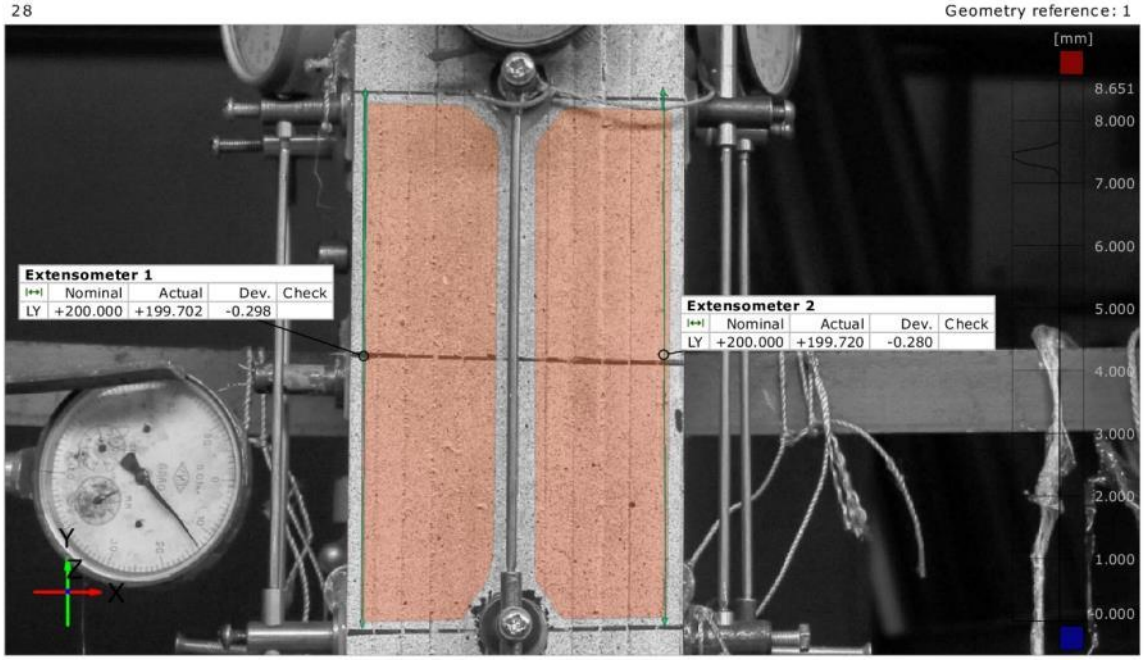
27/48

Рис. Б.27 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

28

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.702			-0.298		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.720			-0.280		

Original alignment

Length unit: mm

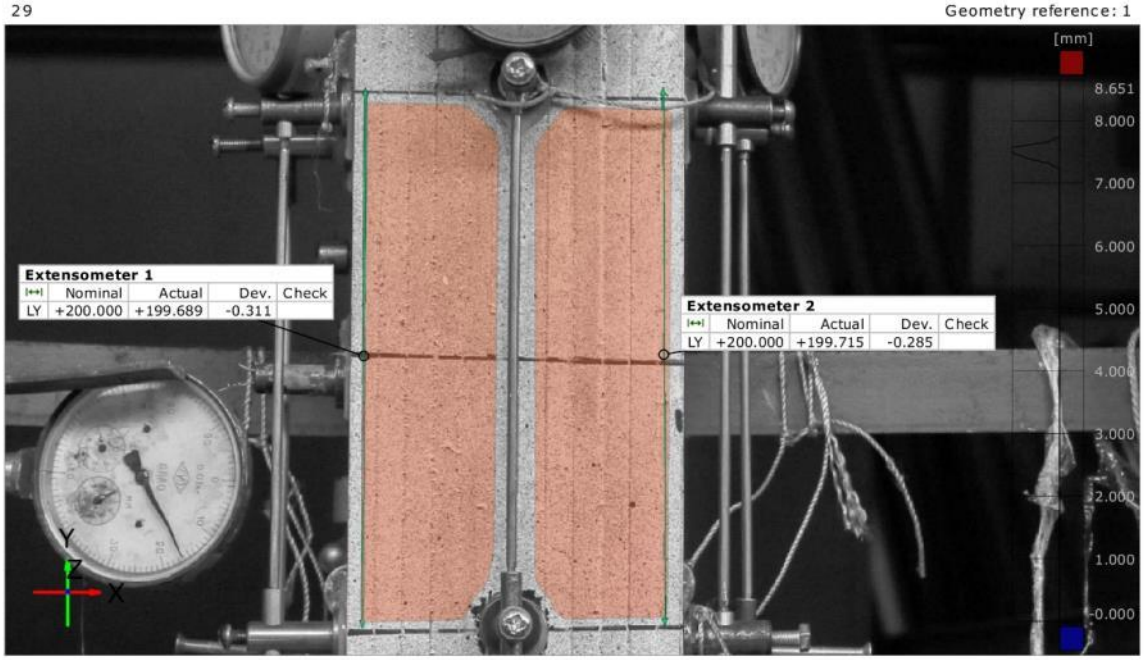
28/48

Рис. Б.28 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

29

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.689			-0.311		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.715			-0.285		

Original alignment

Length unit: mm

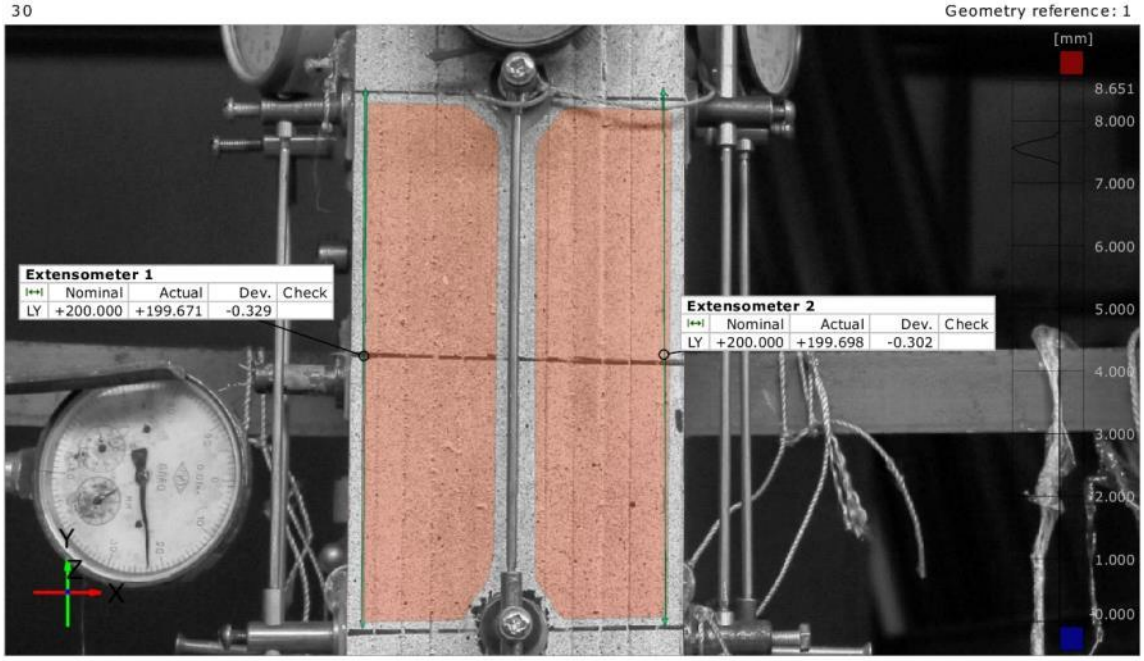
29/48

Рис. Б.29 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

30

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.671			-0.329		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.698			-0.302		

Original alignment

Length unit: mm

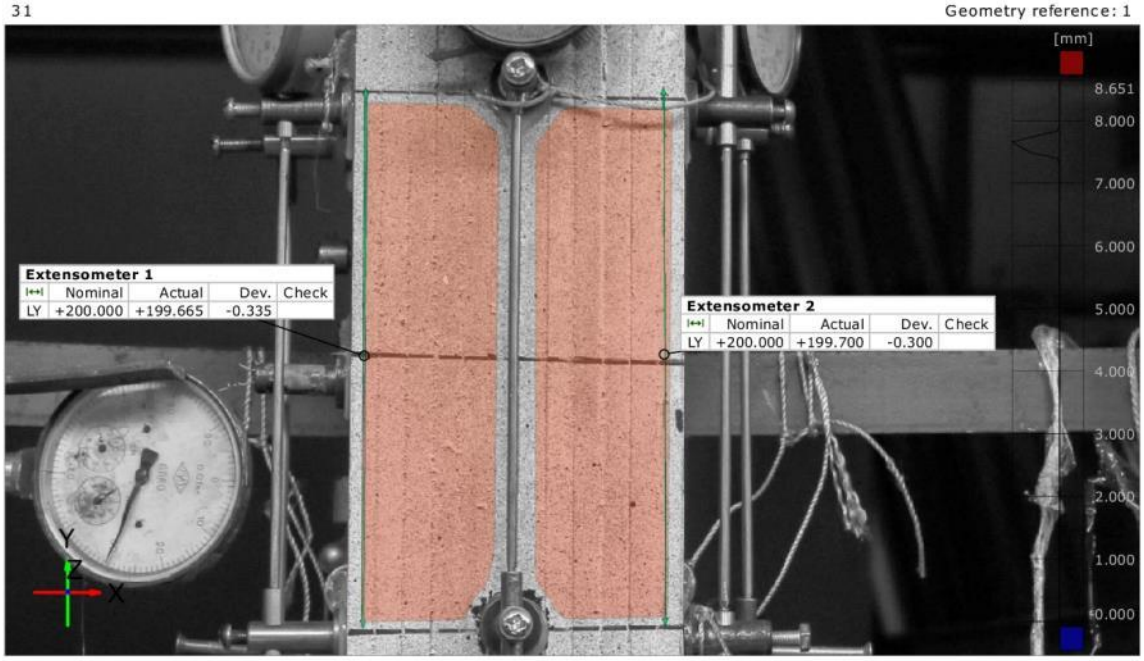
30/48

Рис. Б.30 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

31

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.665			-0.335		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.700			-0.300		

Original alignment

Length unit: mm

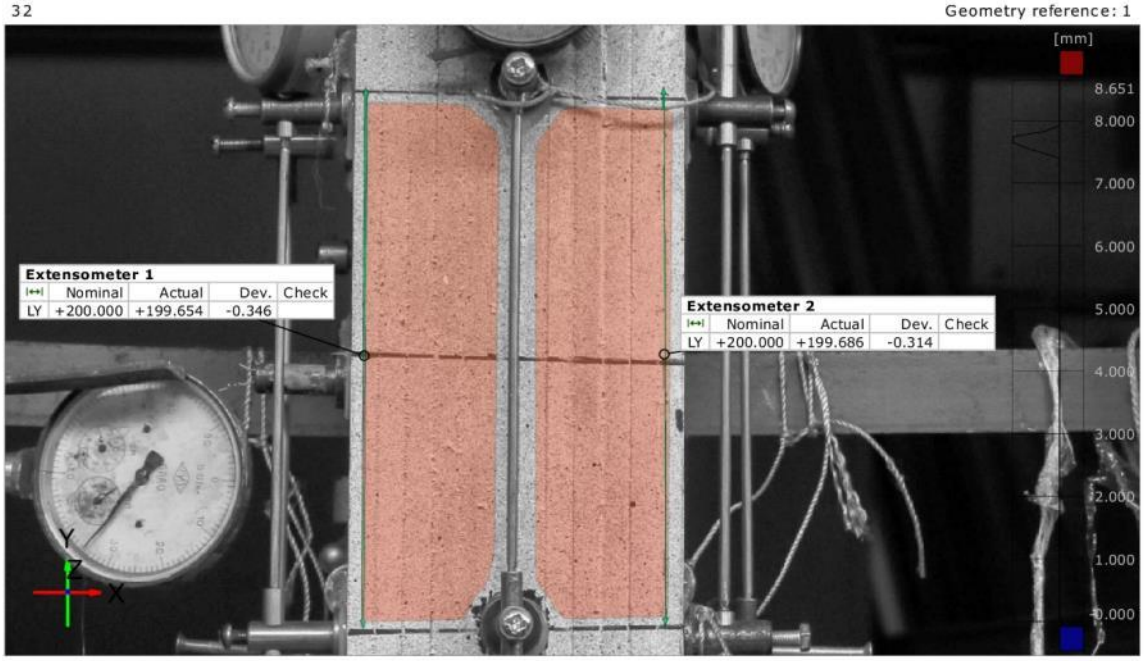
31/48

Рис. Б.31 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

KC-6.2.1(120x70)

32

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.654			-0.346		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.686			-0.314		

Original alignment

Length unit: mm

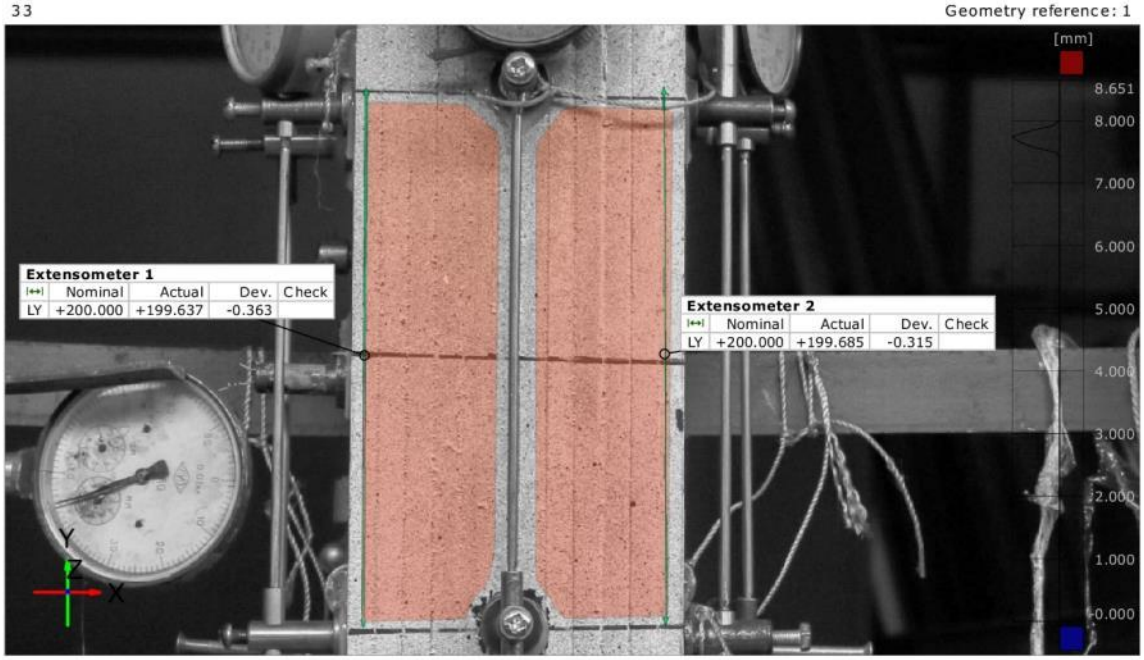
32/48

Рис. Б.32 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

33

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.637			-0.363		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.685			-0.315		

Original alignment

Length unit: mm

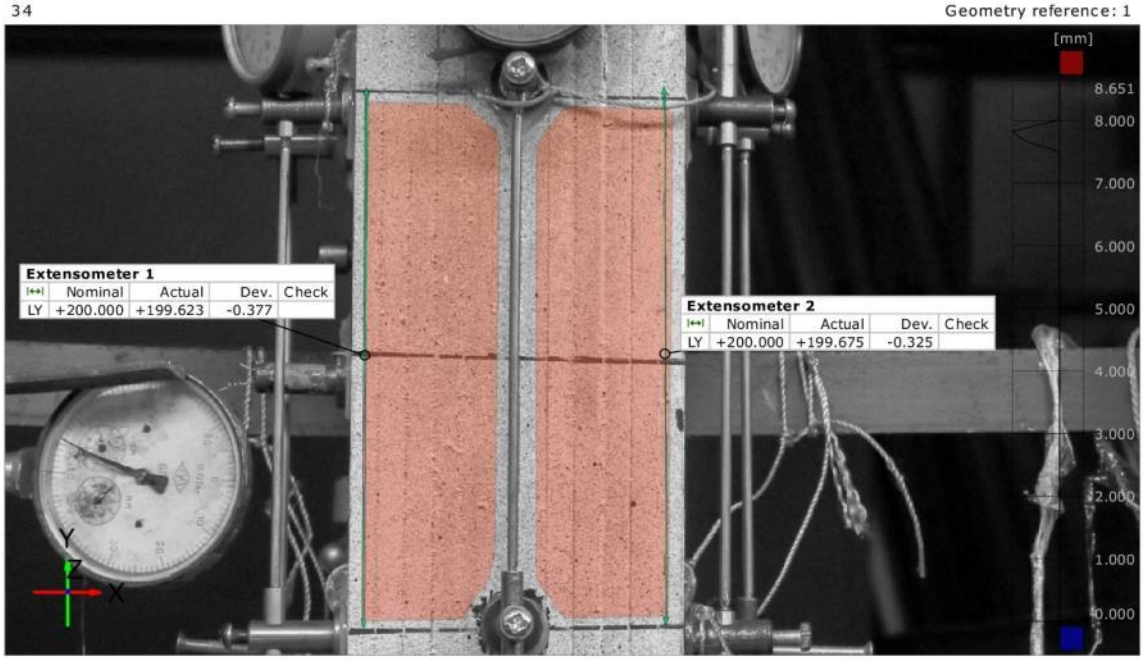
33/48

Рис. Б.33 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

34

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.623			-0.377		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.675			-0.325		

Original alignment

Length unit: mm

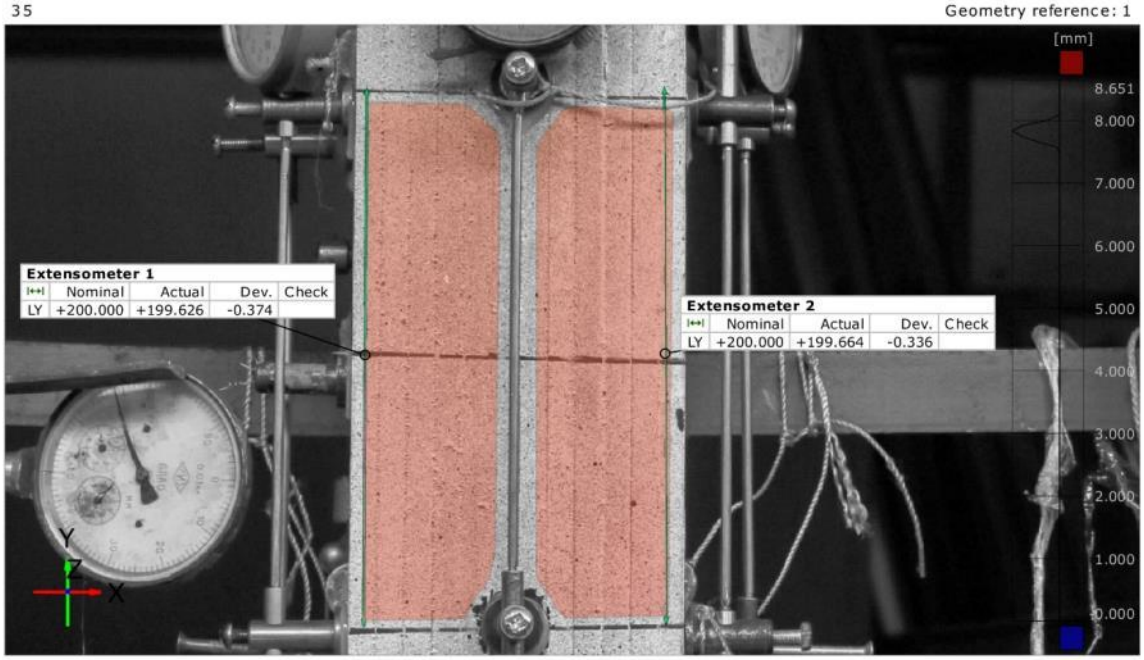
34/48

Рис. Б.34 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

35

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.626			-0.374		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.664			-0.336		

Original alignment

Length unit: mm

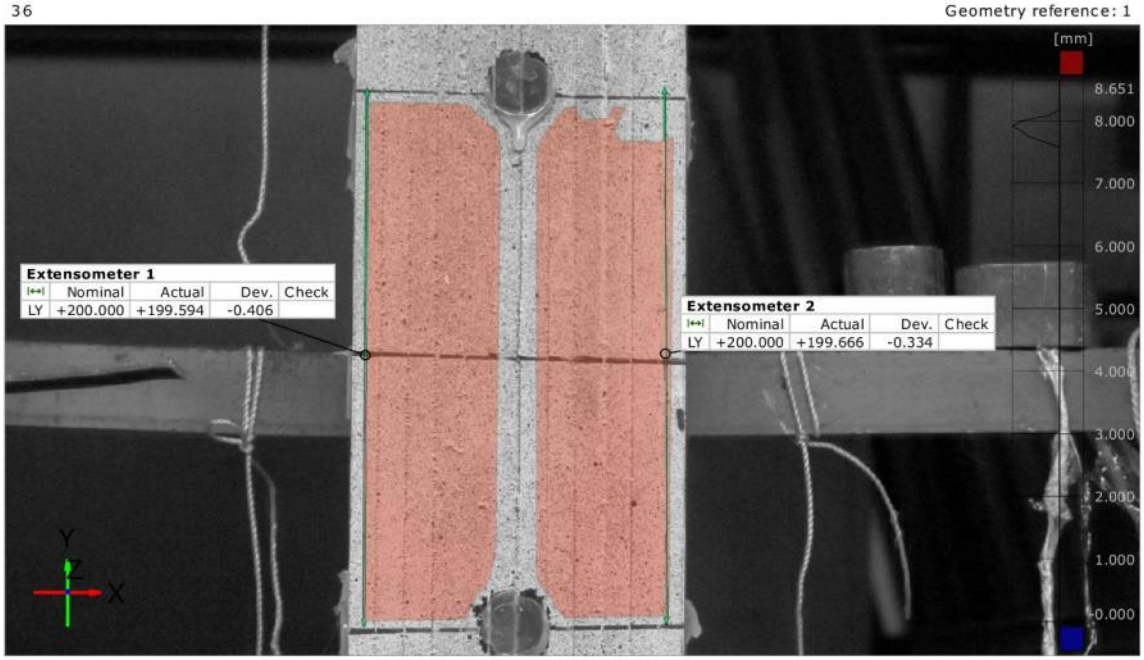
35/48

Рис. Б.35 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

KC-6.2.1(120x70)

36

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.594			-0.406		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.666			-0.334		

Original alignment

Length unit: mm

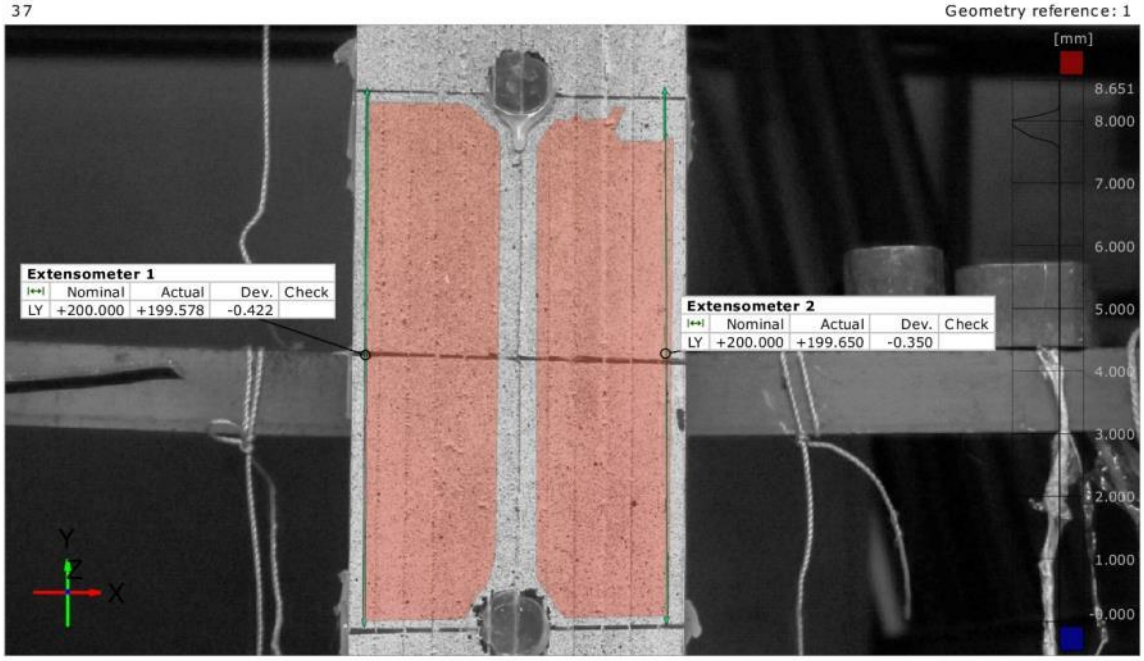
36/48

Рис. Б.36 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

KC-6.2.1(120x70)

37

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.578			-0.422		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.650			-0.350		

Original alignment

Length unit: mm

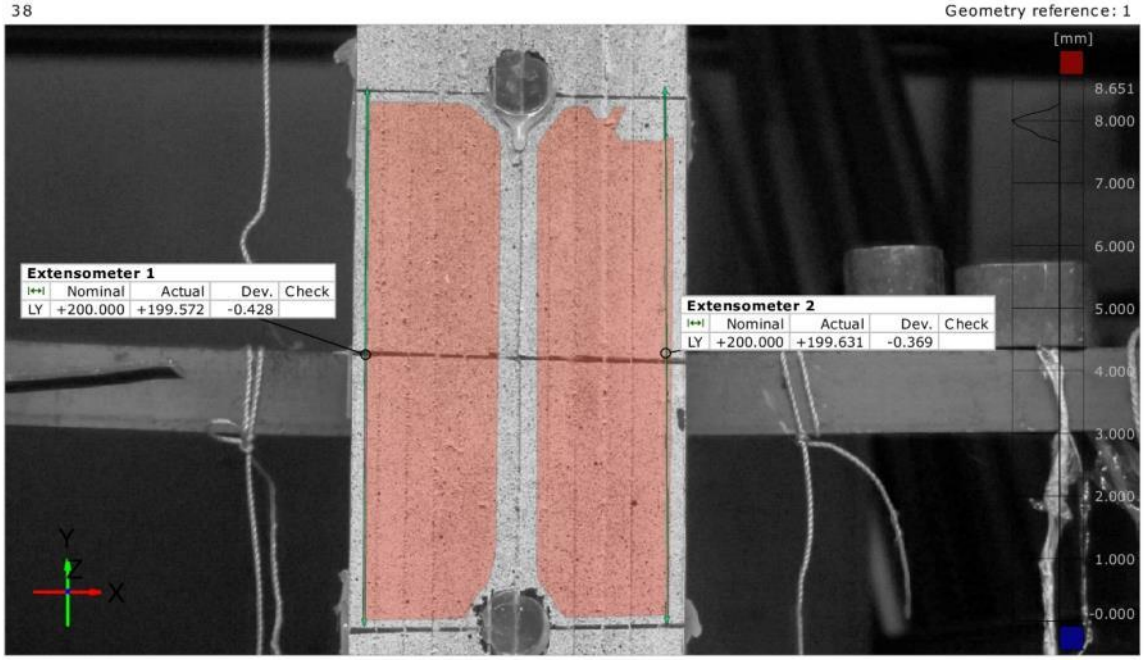
37/48

Рис. Б.37 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

38

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.572			-0.428		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.631			-0.369		

Original alignment

Length unit: mm

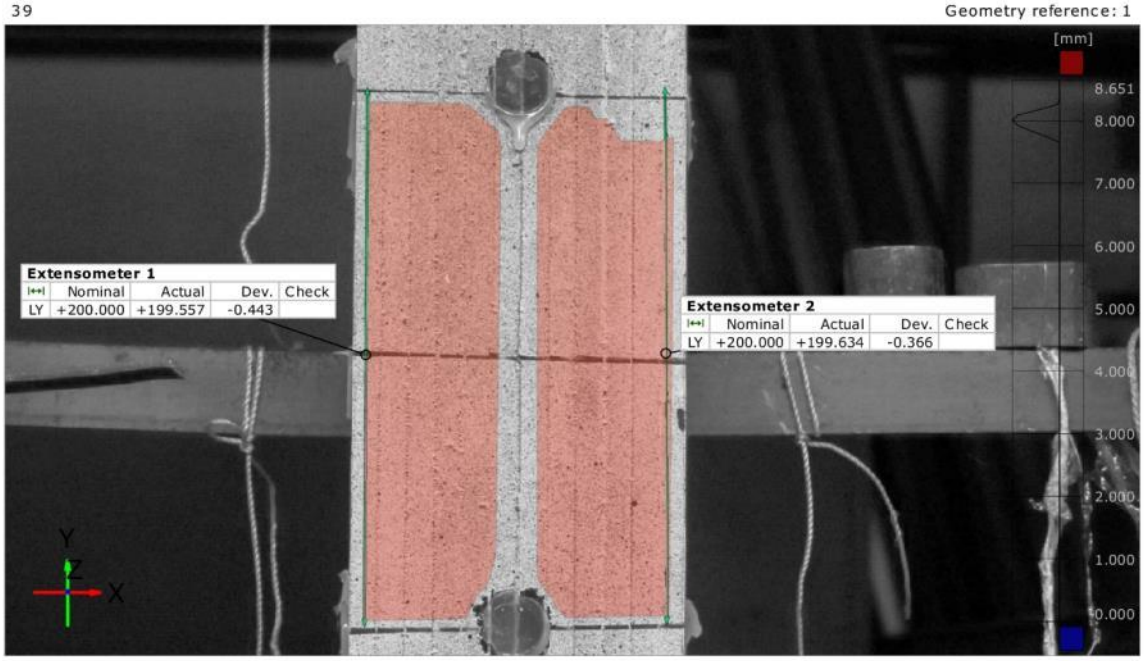
38/48

Рис. Б.38 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

39

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.557			-0.443		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.634			-0.366		

Original alignment

Length unit: mm

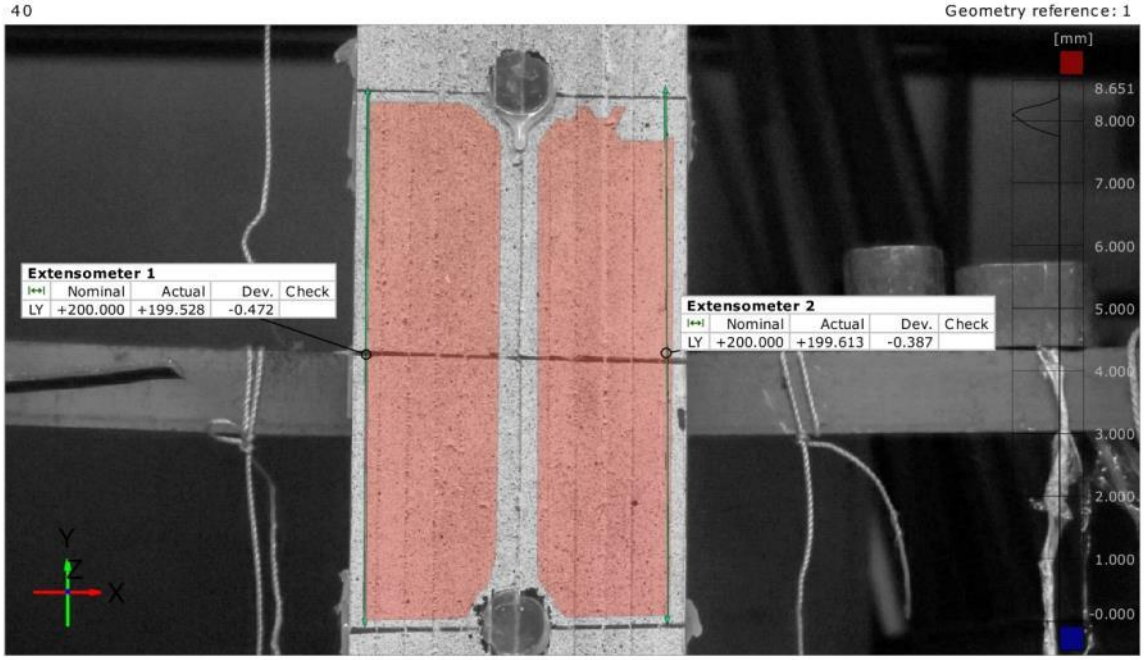
39/48

Рис. Б.39 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

40

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.528			-0.472		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.613			-0.387		

Original alignment

Length unit: mm

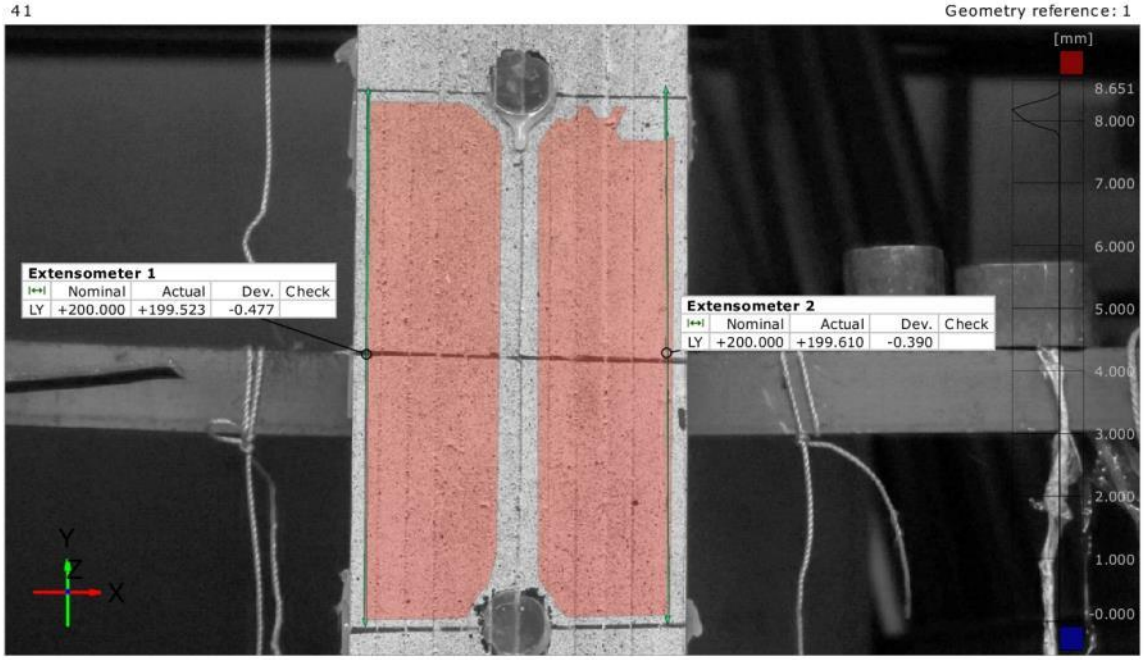
40/48

Рис. Б.40 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

41

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.523			-0.477		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.610			-0.390		

Original alignment

Length unit: mm

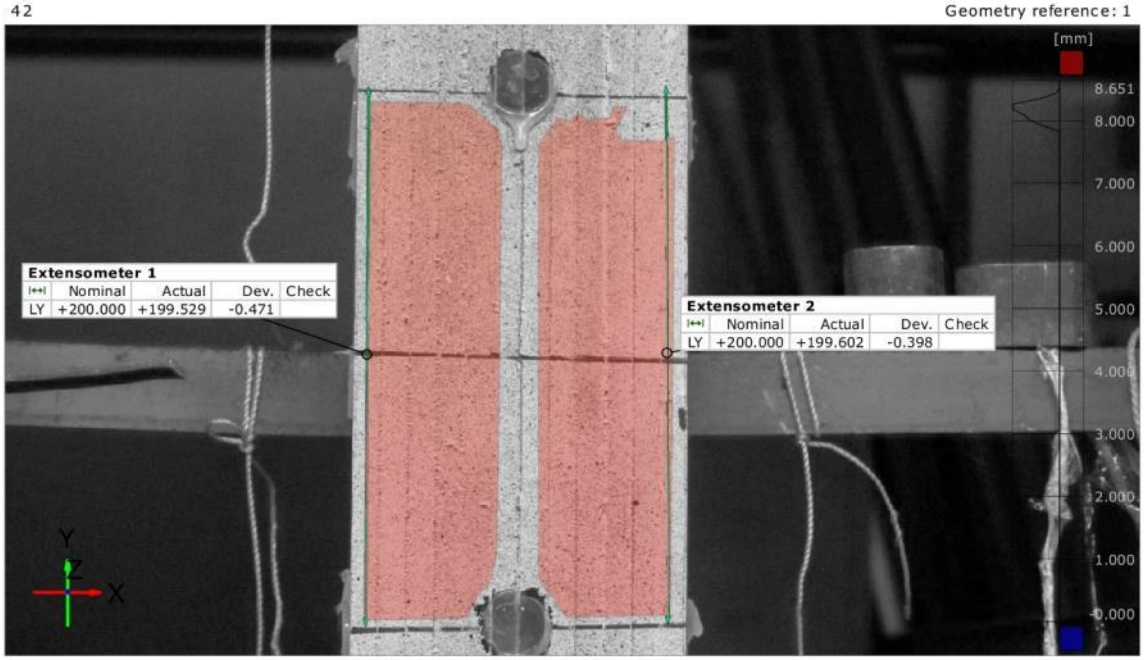
41/48

Рис. Б.41 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

KC-6.2.1(120x70)

42

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.529			-0.471		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.602			-0.398		

Original alignment

Length unit: mm

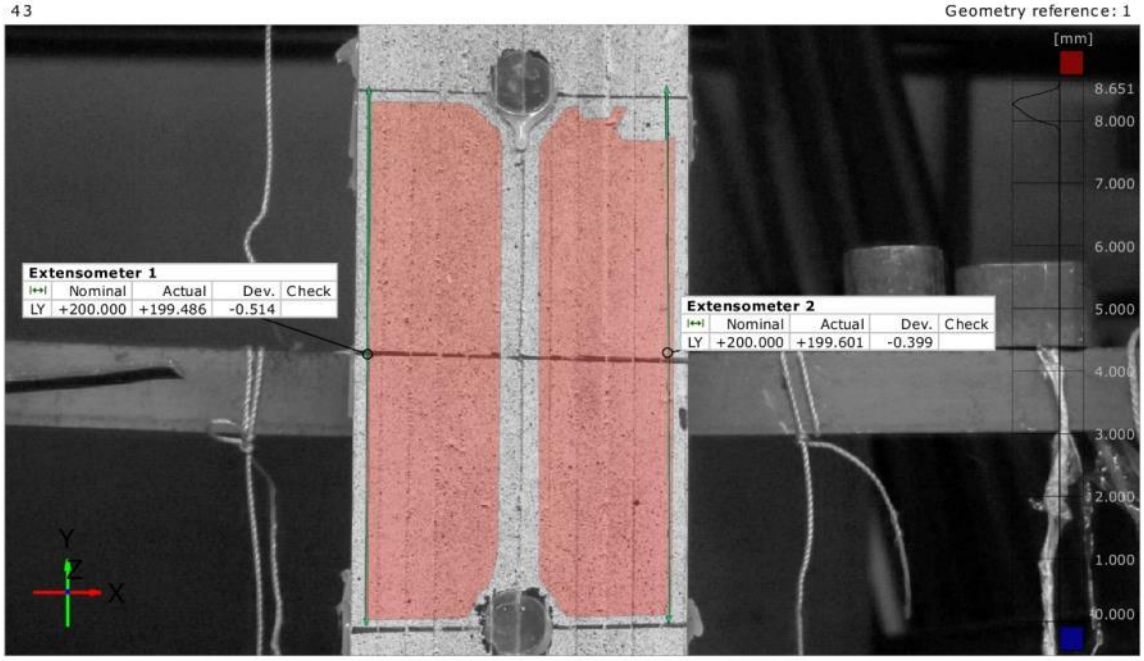
42/48

Рис. Б.42 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

43

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.486			-0.514		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.601			-0.399		

Original alignment

Length unit: mm

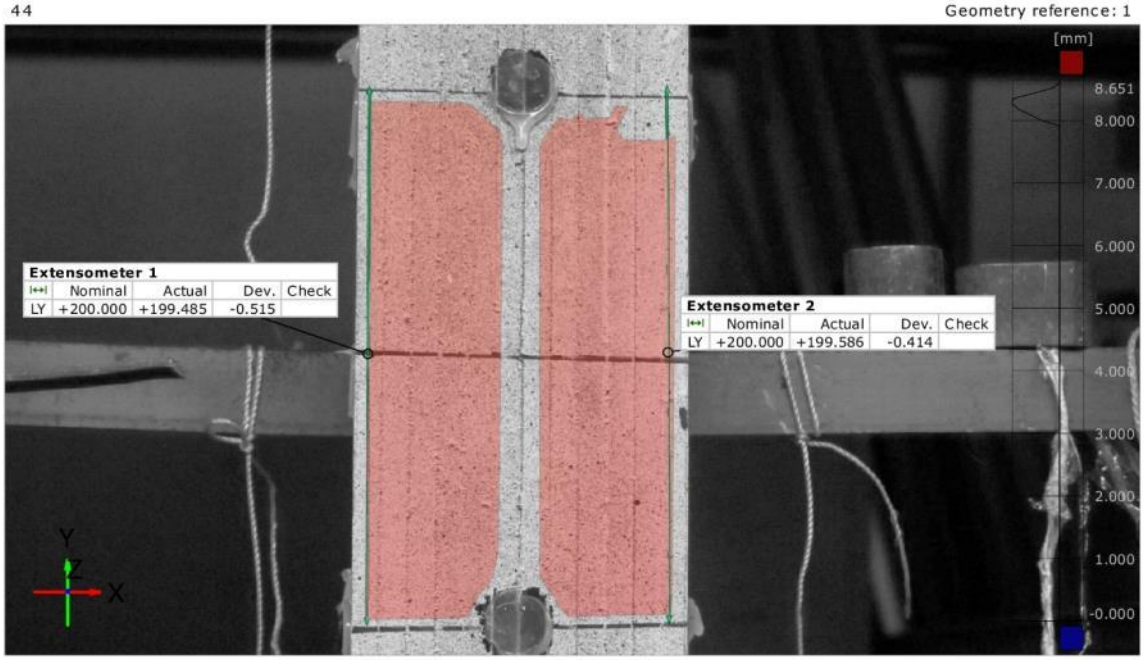
43/48

Рис. Б.43 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

44

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.485			-0.515		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.586			-0.414		

Original alignment

Length unit: mm

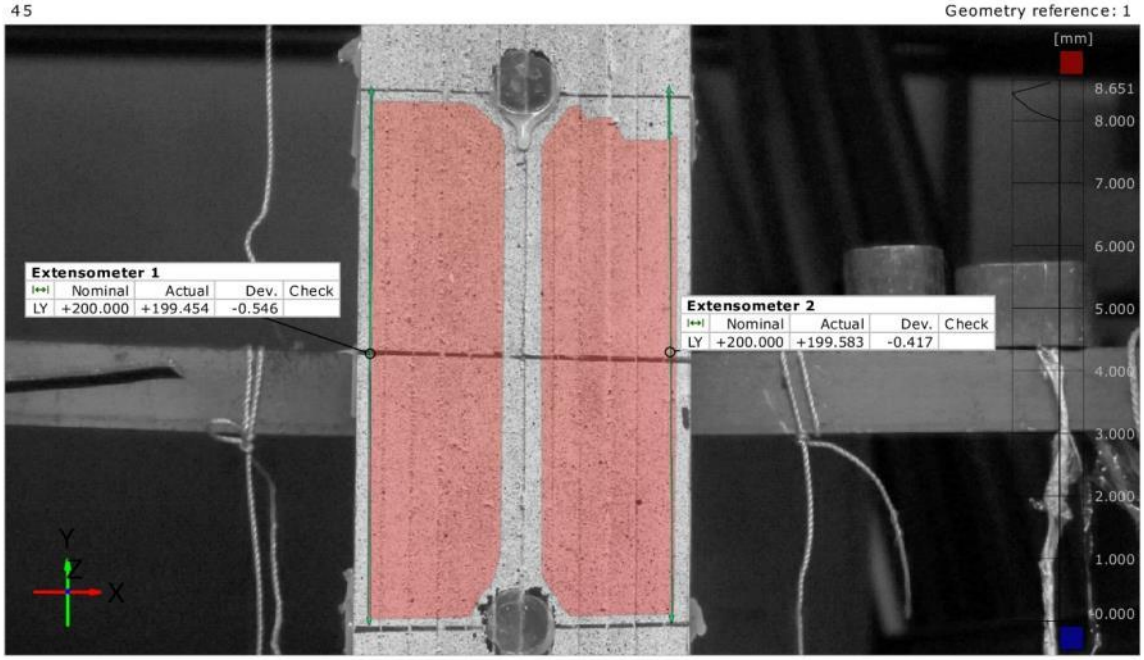
44/48

Рис. Б.44 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

45

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.454			-0.546		
Extensometer 2		LY	+200.000	+199.583			-0.417		

Original alignment

Length unit: mm

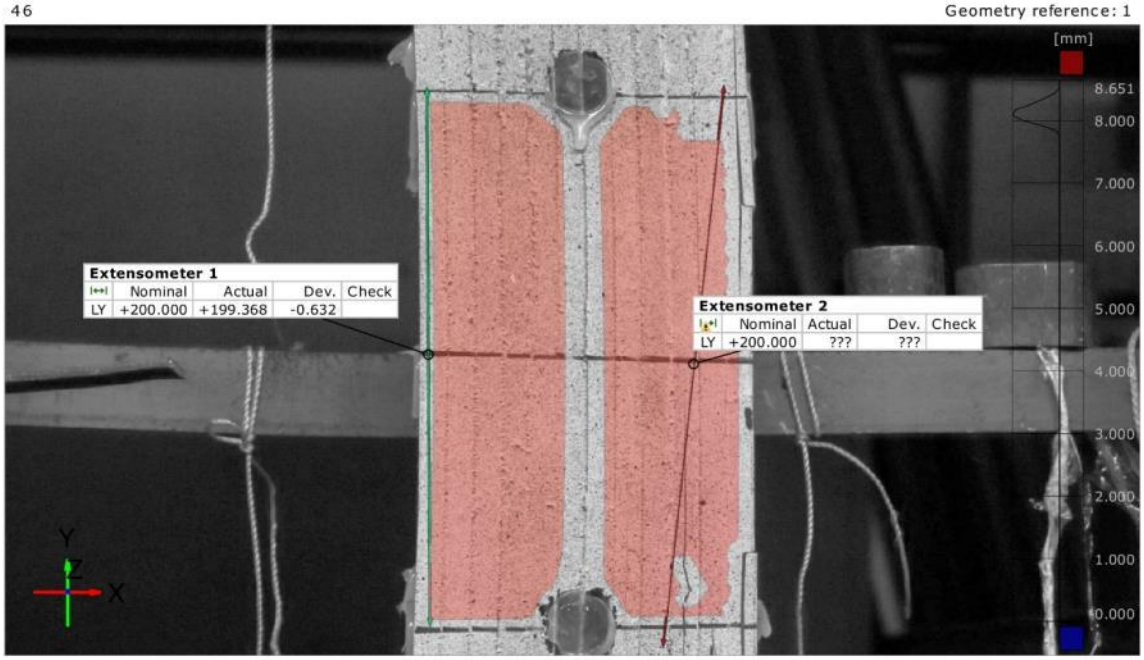
45/48

Рис. Б.45 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

46

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.368			-0.632		
Extensometer 2		LY	+200.000	???			???		

Original alignment

Length unit: mm

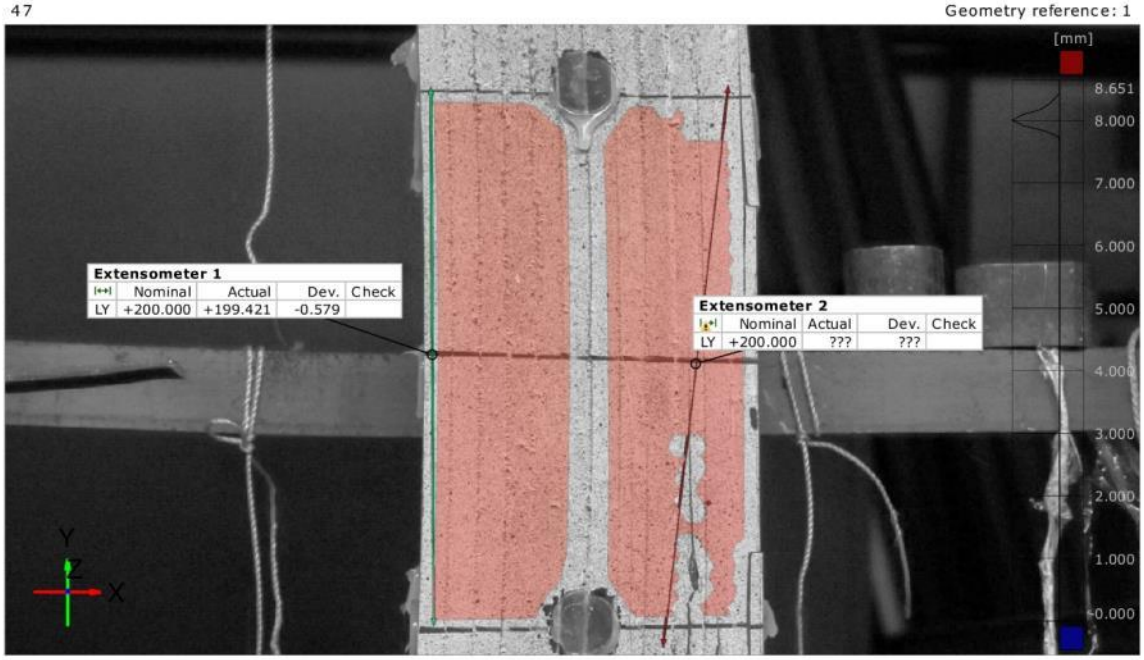
46/48

Рис. Б.46 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

КС-6.2.1(120x70)

47

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.421			-0.579		
Extensometer 2		LY	+200.000	???			???		

Original alignment

Length unit: mm

47/48

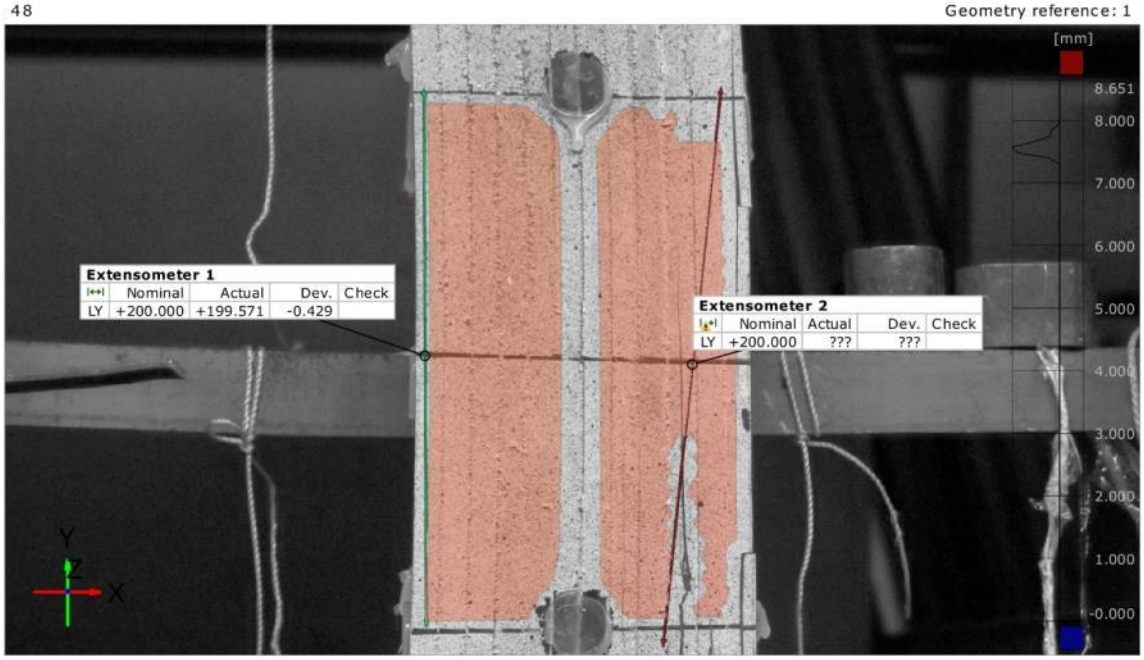
Рис. Б.47 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

Generated with GOM Correlate 2019

КС-6.2.1(120x70)

48

Geometry reference: 1



Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Extensometer 1		LY	+200.000	+199.571			-0.429		
Extensometer 2		LY	+200.000	???			???		

Original alignment

Length unit: mm

48/48

Рис. Б.48 Протоколи випробувань скляних багатошарових колон методом двовимірної кореляції цифрових зображень марки КС-6.2.1

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

2. Surmai M., Tkach R., Analysis of strength and deformativity of glass plate joints under static loading, *Technology audit and production reserves*, № 2/1(52), 2020. P38-41. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.202735. *Особистий внесок здобувача: дослідження міцності та деформативності з'єднань скляних пластин за дії статичного навантаження, проведення експерементальних випробувань, аналіз наукових результатів.*

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

3. Демчина Б. Г., Сурмай М. І., Ткач Р. О., Експериментальне дослідження скляних багатошарових колон на центральний стиск, *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва.* Львів: НУЛП, 2018. №888. С52-58. (НМБД: Index Copernicus). *Особистий внесок здобувача: дослідження несучої здатності скляних багатошарових колон на центральний стиск І серії дослідних зразків, проведення експерементальних випробувань, аналіз наукових результатів.*

4. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О., Шидловський Я.М., Експериментальне дослідження багатошарових скляних колон квадратного перерізу, *Наука та будівництво, 4 (18)| 2018*, С74-80. (НМБД: Index Copernicus). *Особистий внесок здобувача: дослідження несучої здатності та деформативності скляних багатошарових колон квадратного перерізу ІІІ серії*

дослідних зразків, проведення експерементальних випробувань, аналіз наукових результатів.

5. 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, CrossRef, Index Copernicus, Scilit та ін.). .). *Особистий внесок здобувача: проведення аналізу використання методу двовимірної кореляція цифрових зображень в дослідженнях скляних колон, проведення експерементальних випробувань, аналіз наукових результатів.*

6. Demchyna B., Surmai M., Tkach R., The experimental study of glass multilayer columns using digital image correlation, *Archives of Materials Science and Engineering* 96/1 (2019) 32-41. DOI:10.5604/01.3001.0013.1990. (НМБД: Scopus, Directory of Open Access Journals, Index Copernicus, Scirus та ін.). *Особистий внесок здобувача: апробація методики проведення досліджень скляних багатошарових колон за допомогою кореляції цифрових зображень, проведення експерементальних випробувань, аналіз наукових результатів.*

Тези доповідей за темою дисертаційної роботи на міжнародних конференціях:

1. 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 несучих будівельних конструкцій зі скляного триплексу, аналіз останніх досліджень і публікацій по даній темі.*

2. 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: дослідження та порівняння результатів несучої здатності скляних*

багатошарових колон на центральний стиск I та II серії дослідних зразків, проведення експеременталь них випробувань, аналіз наукових результатів.

3. Surmai M., Tkach R., An analysis of experimental study of glass multilayer columns made of thermally strengthened glass, *Scientific Collection «InterConf»,* (39): with the Proceedings of the 8 th International Scientific and Practical Conference, Science and Practice: Implementation to Modern Society, December 26-28, 2020. Manchester, Great Britain, P1770-1773. *Особистий внесок здобувача: дослідження несучої здатності та деформативності скляних багатошарових колон виготовлених із термозміцненого скла, проведення експеременталь них випробувань, аналіз наукових результатів.*

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

1. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О. (2018), «Скляна колона», Патент України на корисну модель №128990, E04C 3/30, E04B 1/18, E04B 1/28, E04H 15/34, E04H 15 -60, заява № u201805969 від 29.05.2018, опубліковано 10.10.2018, бюл. №19/2018. *Особистий внесок здобувача: патентний пошук, розробка конструкції скляної колони.*

2. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О. (2019), «Спосіб випробовування скляної колони», Патент України на корисну модель №134878, G01N 3/10, заява № u201812746 від 21.12.2018, опубліковано 10.06.2019, бюл. №11. *Особистий внесок здобувача: патентний пошук, розробка способу випробовування скляної колони.*

3. Демчина Б.Г., Сурмай М.І., Ткач Р.О., Осадчук Т.Ю. (2020), «Зразок для випробування зчеплення пластин між собою», Патент України на корисну модель №140007, G01N 3/08, заява № u201905744 від 27.05.2019, опубліковано 10.02.2020, бюл. №3. *Особистий внесок здобувача: патентний пошук, розробка конструкції дослідного зразока для випробування зчеплення пластин між собою.*

Відомості, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

Основні результати дисертаційної роботи були обговорені та оприлюднені на:

8-у міжнародному молодіжному науковому форумі “Litteris et Artibus” (м. Львів, 22-24 листопада 2018 р., НУЛП);

XVII міжнародній науковій конференції «Актуальні проблеми цивільної та екологічної інженерії» (м. Львів, 11-13 вересня 2019 р., НУЛП);

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

VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Science and practice: implementation to modern society» (м. Манчестер, Великобританія, 26-28 грудня 2020р.);

Наукових семінарах Національного університету «Львівська політехніка» кафедри «Будівельні конструкції та мости» (2017 – 2020 рр.).