

АНОТАЦІЯ

Ткач Р.О. Тема дисертації «Несуча здатність та деформативність скляних багат шарових 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.

Скляні багат шарові 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 багат шарових колон, що працюють на центральний стиск та подано рекомендації щодо їх проектування, які були впроваджені на об'єктах в будівництві.

У першому розділі вибрано основні напрямки та стан наукового дослідження несучої здатності та деформативності скляних багат шарових колон. Сформовано основні задачі 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. Нійссе Р. визначив п'ять категорій скляних стиснутих колон таких як профільні, трубчасті, багат шарові, пучкові та литі. Профільні скляні колони склалися 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 крім 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 складались 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.

В 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 в 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 мікротріщинами (так звані дефекти Гріффіта), що суттєво знижували міцність скла. 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 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. Існуюча 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. Наведено 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 $h=10\text{мм}$ вкладали одну полімерну плівку марки EVASAFE товщиною $h_{\text{int}}=0.38\text{мм}$ (Bridgestone, Японія). Після цього колони нагрівались за температури $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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.

В 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 трьох точковий 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 ймовірно-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 кореляція цифрових зображень, оскільки колони деформуються в напрямку трьох осей в 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-ймовірного 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 $f_{ck,prism,5\%} = 0,72f_{ck,cube,5\%}$. Також, встановлено коефіцієнт Пуассона.

За результатами проведених експериментальних досліджень на трьох точковий згин та за допомогою статистично-ймовірного аналізу даних (двопараметричного розподілу Вейбулла) було встановлено реальне значення

модуля пружності та характеристичну міцність на розтяг при згині звичайного, термозміцненого і гартованого скла.

Наведено результатів експериментальних досліджень роботи різних типів з'єднань скла між собою. Було прийнято у скляних колонах, виготовлених у заводських умовах за допомогою триплексації, використовувати у з'єднання скла полімерну плівку EVASAFE, так як вона показала себе найкраще.

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. Даний модуль дозволяє розраховувати стержневі та пластинчасті конструкції на стійкість. Проте, дозволяє знаходити значення критичного навантаження тільки у стержневих системах. Тому модель колон – це стежень. У зв'язку із прийнятими умовами роботи зразка – модель роботи матеріалу прийнято ізотропною. Також, 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 в якій площині відбудеться втрата стійкості та її форму.

Результати дисертаційного дослідження використані на практиці при розрахунку та проектування 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 багат шарова 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. Nijse 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 $h=10$ mm (Bridgestone, Japan). After that, the columns were heated at a temperature of 130 °C 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 $f_{ck,prism,5\%} = 0,72f_{ck,cube,5\%}$. 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 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.

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 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 роботи, 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.

Відомість, 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.).