

МІЦНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ БАГАТОШАРОВИХ СКЛЯНИХ ПЛИТ З РІЗНИХ ТИПІВ СКЛА, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ НА ЗГИН

Демчина Б.Г., д.т.н., професор,
Осадчук Т.Ю., аспірант,
Демчина Х.Б., к.т.н., асистент,
Національний університет «Львівська політехніка»
osadchuktaras92@gmail.com

Анотація. Проведено експериментальні дослідження багатошарових скляних плит, виготовлених із звичайного та гартованого скла. Схема випробування відповідала роботі вільно опертих по чотирьох кутах багатошарових скляних плит, які працювали на згин від локального навантаження посередині. Представлено результати експериментальних досліджень згідно з прийнятою схемою випробування. Подано графіки залежності прогинів від навантажень та графіки розподілу деформацій по товщині дослідних зразків для відповідних рівнів навантаження. Проаналізовано характер руйнування багатошарових скляних плит, виготовлених із різних типів скла.

Ключові слова: скло конструкційне, скляні багатошарові плити, випробування на згин, несуча здатність, прогини, деформації.

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ СТЕКЛЯННЫХ ПЛИТ ИЗ РАЗНЫХ ТИПОВ СТЕКЛА, РАБОТАЮЩИХ НА ИЗГИБ

Демчина Б.Г., д.т.н., профессор,
Осадчук Т.Ю., аспирант,
Демчина Х.Б., к.т.н., ассистент,
Национальный университет «Львовская политехника»
osadchuktaras92@gmail.com

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования многослойных стеклянных плит, изготовленных из обычного и закаленного стекла. Схема испытания отвечала работе свободно опирающихся по четырем углам многослойных стеклянных плит, которые работали на изгиб от локальной нагрузки посередине. Представлены результаты экспериментальных исследований согласно принятой схеме испытания. Подано графики зависимости прогибов от нагрузок и графики распределения деформаций по толщине опытных образцов для соответствующих уровней нагрузок. Проанализирован характер разрушения многослойных стеклянных плит, изготовленных из различных типов стекла.

Ключевые слова: стекло конструктивное, стеклянные многослойные плиты, несущая способность, прогибы, деформации.

BENDING STRENGTH AND DEFORMABILITY OF MULTILAYERED GLASS PLATES WITH DIFFERENT TYPES OF GLASS

Demchyna B., Doctor of Engineering, Professor,
Osadchuk T., postgraduate student
Demchyna K., PhD, Assistant,
Lviv Polytechnic National University
osadchuktaras92@gmail.com

Abstract. The results of experimental researches of freely supported multilayered glass

plates, which work on bending under loading on the local area in the middle of plates are presented in this article. Bending tests were performed on the samples of constant thicknesses and using of the outer layer in tension zone with heat-strengthened glass and additional reinforcement. The glass plates were laminated each to other with EVASAFE interlayer polymer films (Bridgestone). Tests were conducted in order to evaluate the bending properties of multilayered glass plates. Flexural parameters, strength and deformation capacity (deformability), are considered. Bending strength of test units and their deflection at a given load are shown in load-deflection curves. The strain distribution of test specimens are plotted in strain profile along the cross section at height of each plate. The fracture pattern of multilayered glass plates is analyzed. The mechanical behavior of laminated glass for structural applications are examined.

Keywords: structural glass, multilayered (laminated) glass plates (laminates), bending tests, strength, deformations, strains.

Вступ (постановка проблеми). Скляні конструкції, в тому числі плитні, можуть використовуватись не тільки у елементах фасадного скління, але й у якості несучих конструкцій. Їх переваги порівняно з аналогічними конструкціями з інших матеріалів – це: екологічність, енергоефективність, освітленість, добрі звукоізоляційні властивості, здатність витримувати різного роду експлуатаційні навантаження (механічні, кліматичні тощо). Прозорість дозволяє застосовувати такі конструкції відповідно до сучасних архітектурних рішень, враховуючи, одночасно, естетичність та біологічну стійкість. Багатошарові скляні плити забезпечують збільшення візуального простору на оглядових майданчиках і перекриттях, а також сприяють раціональнішому використанню природнього освітлення через панорамні покриття.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану багатошарових скляних конструкцій за допомогою методу кінцевих елементів представлено для:

- скляних смуг (панелей) на циліндричний згин (І. Іванов, 2011) [1];
- багатошарових скляних плит та панелей за допомогою 4-х точкового тесту на згин (Г. Молнар, 2012) [2]; (Л. Шабле, 2013 та 2017) [3, 4];
- одно- та багатошарових скляних плит, опертих по контуру та по окремих гранях, на дію поперечного навантаження (А. Земанова, 2015) [5];
- багатошарових скляних плит під впливом динамічного навантаження, зокрема закріпленої по кутах багатошарової скляної балюстради на падіння кулі та закріпленої по контуру плити на удар гирі (М. Фрілінг, 2013)[6];
- багатошарових скляних плит, опертих по контуру, різної геометрії, під впливом рівномірного тиску для симуляції вітрового навантаження (М. Ель-Шамі, 2010 та 2015) [7, 8];
- у випадку проектування скляної підлоги майданчика «Grand Canyon Skywalk» для огляду Великого каньйону (Беннісон, 2007) [9].

Натурні дослідження, описані в роботах багатьох авторів, стосувались таких дослідних зразків:

- скляних смуг (панелей) на трьох точковий згин (І. Іванов, 2011) [1];
- багатошарових скляних плит та панелей за допомогою 4-х точкового тесту на згин (Г. Молнар, 2012) [2]; (Л. Шабле, 2013 та 2017) [3, 4]; (Т. Серафінавічюс, 2013) [10];
- монолітних і багатошарових скляних плит різної геометрії, опертих по контуру, на дію рівномірного тиску (М. Ель-Шамі, 2010) [7].
- багатошарових скляних плит, опертих по контуру, під дією рівномірно розподіленого навантаження (С.В.Г. Валлабхан, 1993) [11].

Аналітичні методи розрахунку багатошарових скляних конструкцій, представлені у ряді досліджень, – це:

- метод «ефективної товщини» (А. Земанова, 2015) [5], а також рівняння та таблиці для підбору багатошарових скляних балок і плит при різних умовах закріплення і типах навантаження, в тому числі, у випадку плити, опертої по кутах, під дією рівномірно-розподіленого навантаження (Л. Галуппі, 2012 та 2013) [12-15];

– діаграми для підбору розмірів плит окремих товщин з певними плівками для заданих умов швидкості навантаження та температури у випадку багатошарових скляних плит, опертих по контуру, під дією рівномірного тиску, а також діаграми згідно з нормами ASTM E 1300 (С. Беннісон, 2001, 2002 та 2007) [16, 17, 9];

– критерії та табличний метод одночасного проектування та вибору матеріалів для багатошарових скляних плит, опертих по контуру під дією рівномірно розподіленого навантаження (П. Форбоці, 2014) [18].

У проаналізованій літературі роботи з експериментальних досліджень міцності на згин багатошарових скляних плит під дією локального статичного навантаження посередині плит, не виявлено.

Мета та завдання. Мета – дослідити скляні багатошарові плити, оперті по чотирьох кутах, які працюють на згин від локального навантаження посередині плит для встановлення прогинів та деформацій скла.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

1) виконати експериментальні дослідження багатошарових скляних плит, опертих по чотирьох кутах, які працюють на згин під дією статичного навантаження, прикладеного через штамп посередині плит;

2) виконати фіксацію прогинів та деформацій дослідних зразків;

3) провести аналіз отриманих даних.

Об'єкти та методи дослідження. Для проведення експериментів за технологією триплексування були виготовлені дослідні зразки-близнюки багатошарових скляних плит з розмірами в плані 500×500 мм різних серій залежно від типу шарів скла та наявності армування. На рис. 1 представлено конструкцію характерних плит з кожної серії дослідних зразків-близнюків. Плита марки ПСБ – 1.6 складалася із трьох шарів звичайного скла (рис. 1, а), плита марки ПСБ – 2.2 – із нижнім гартованим склом та двома верхніми шарами із звичайного скла (див. рис. 1, б), плита марки ПСБ – 3.1 – аналогічно плиті марки ПСБ – 1.6 з додатковим використанням підсилюючої тканини із однонаправлених вуглецевих волокон SikaWrap – 230 С між нижнім та середнім шарами звичайного скла (див. рис. 1, в), плита марки ПСБ – 3.2 виготовлялася аналогічно плиті марки ПСБ – 2.2 з додатковим використанням тканини SikaWrap – 230 С між нижнім гартованим шаром скла та середнім шаром із звичайного скла (див. рис. 1, г). Для міжшарового ламінування плит використовувалася плівка типу EVASAFE (Bridgestone, Японія).

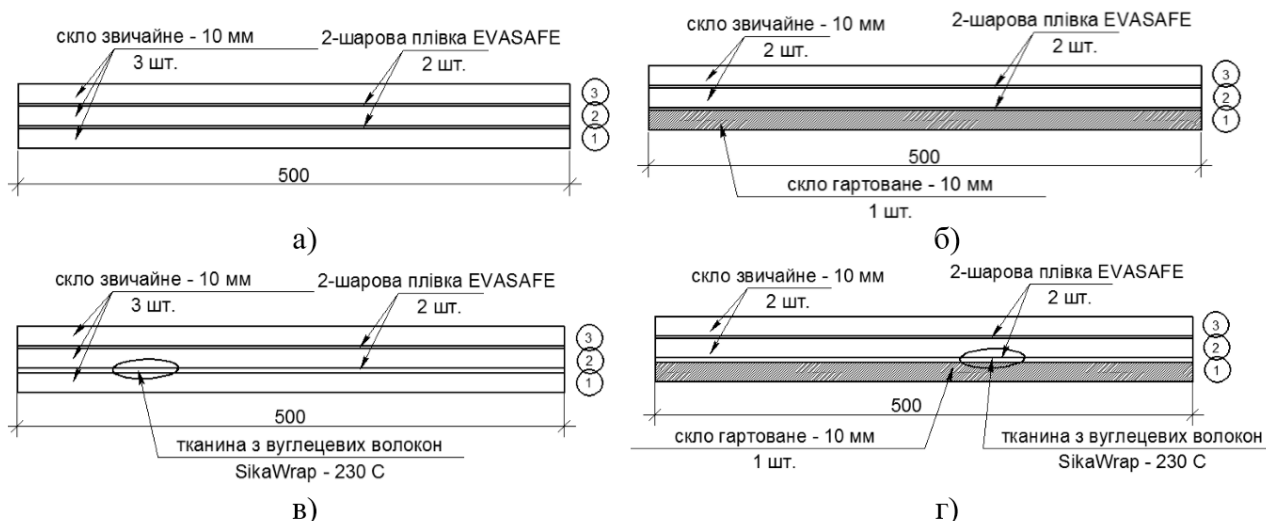


Рис. 1. Експериментальні зразки плит:

а – марки ПСБ – 1.6; б – марки ПСБ – 2.2; в – марки ПСБ – 3.1; г – марки ПСБ – 3.2

Схема випробування відповідала методиці дослідження на згин скляних багатошарових плит, вільно опертих по чотирьох кутах, описаній в попередніх публікаціях [19, 20]. Для заміру вертикальних переміщень (прогинів) використовувались годинникові мікроіндикатори з ціною

поділки 0,001 мм – для верхньої (Пв-1, Пв-2) та нижньої (Пн-1) поверхонь плит, відповідно (рис. 2). Деформації скла замірялись мікроіндикаторами у двох взаємно-перпендикулярних напрямках у верхній (Ів-1, Ів-2) та нижній зонах (Ін-1, Ін-2) та на діагоналі (Ів-3) зверху плит.

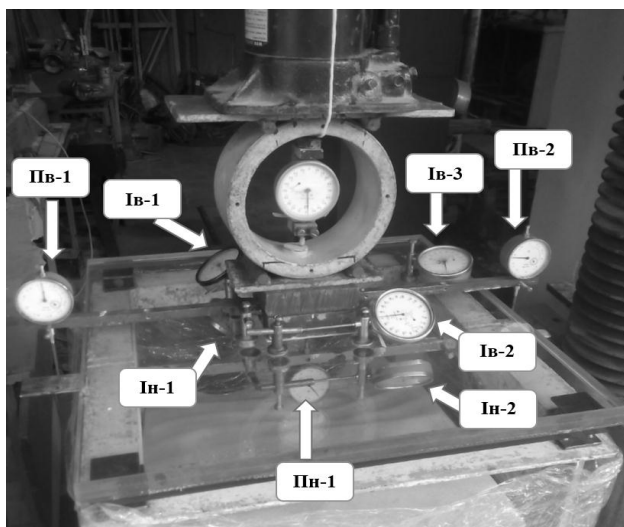


Рис. 2. Вигляд установки для випробування

Навантаження прикладалося через металевий штамп розмірами 100×100 мм посередині плит ступенями по 0,5-1кН з витримкою 5 хв. та фіксувалося за допомогою тарованого динамометра, який встановлювався між штампом та гідравлічним домкратом.

В процесі досліджень велися записи показів динамометра та мікроіндикаторів до моменту руйнування плит.

Результати досліджень. Вигляд плит після випробувань показано на рис. 3. Руйнування шарів плит із звичайного скла характеризувалося утворенням хрестоподібних тріщин. Гартоване скло у нижній зоні плит руйнувалося із утворенням дрібних частинок. Після руйнування усіх шарів, цілісність плит забезпечувалася полімерними плівками.

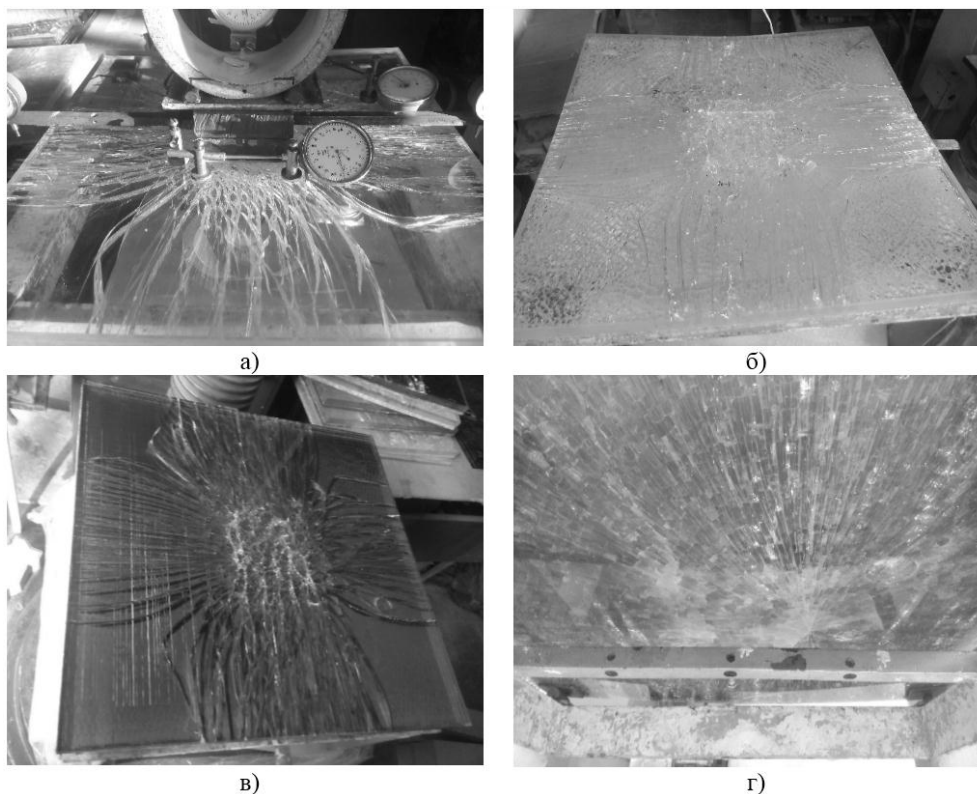


Рис. 3. Вигляд плит після руйнування: а – марки ПСБ – 1.6 (зверху); б – марки ПСБ – 2.2 (зверху); в – марки ПСБ – 3.1 (зверху); г – марки ПСБ – 3.2 (знизу)

Послідовність руйнування шарів скла у плитах різних типів була наступною:

- у плитах марок ПСБ – 1.6 та ПСБ – 3.1 з усіма шарами із звичайного скла першим руйнувався нижній шар, далі – середній, після чого – верхній шар;
- у плитах марок ПСБ – 2.2 та ПСБ – 3.2 з гартованим склом у нижній зоні першим руйнувався середній шар, далі – верхній, і тільки потім – нижній шар.

Графіки наростання прогинів плит в процесі експерименту показані на рис. 4.

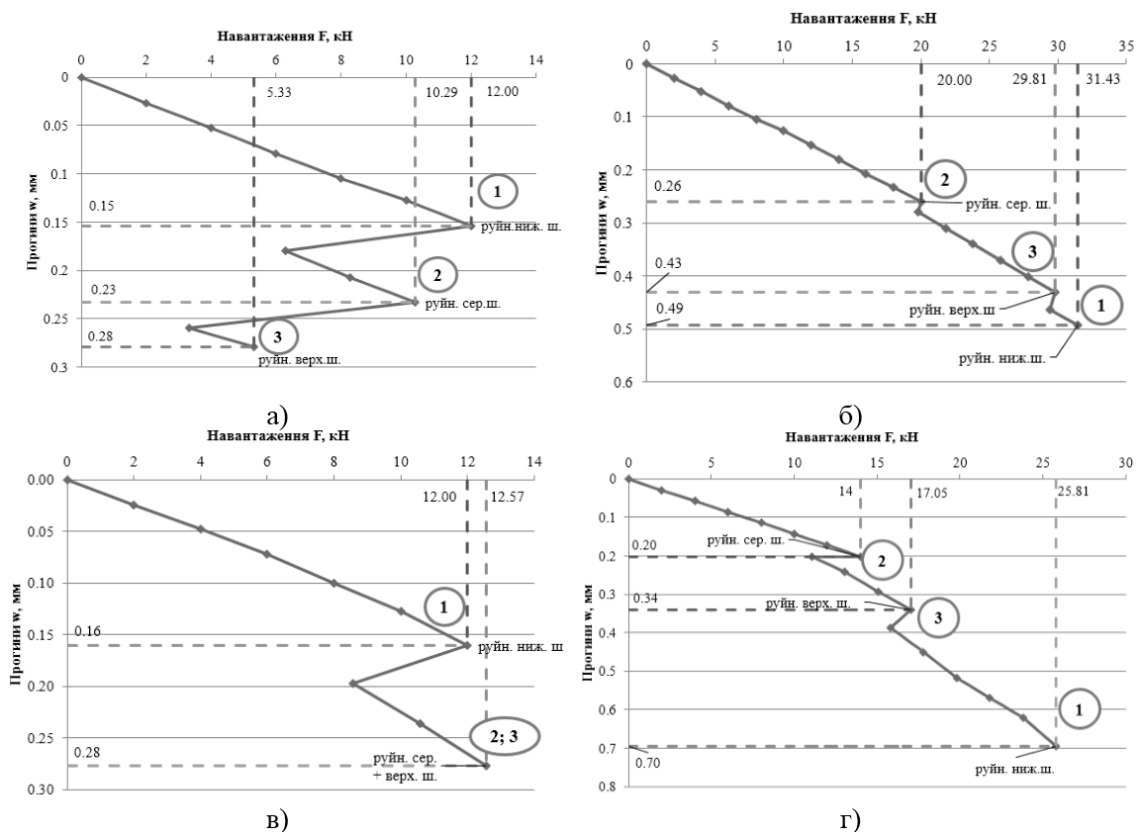


Рис. 4. Графіки залежності прогинів від навантажень для дослідних плит:
 а – марки ПСБ – 1.6; б – марки ПСБ – 2.2; в – марки ПСБ – 3.1; г – марки ПСБ – 3.2
 1, 2, 3 – нумерація шарів плит (рис. 1)

Як видно з рис. 4, для усіх плит руйнування кожного з шарів спричиняло падіння показів динамометра. Після попереднього зменшення рівня навантаження внаслідок руйнування певного шару скла, далі навантаження продовжувало зростати до руйнування наступного шару або досягнення максимального навантаження. При цьому, прогини зростали постійно.

Для плит з трьома шарами із звичайного скла використання вуглецевої тканини компанії Sika, у плиті марки ПСБ – 3.1 забезпечило більшу несучу здатність, у порівнянні з плитою ПСБ – 1.6. Для плит із нижнім гартованим склом (ПСБ – 2.2, ПСБ – 3.2) таке армування сприяло більшим значенням експериментальних прогинів в момент руйнування останнього шару на користь ПСБ – 3.2.

Плити марок ПСБ – 2.2 та ПСБ – 3.2 із гартованим шаром скла внизу, показали вищий рівень руйнуючих навантажень та прогинів для останнього шару у порівнянні з плитами марок ПСБ – 1.6 та ПСБ – 3.1, що склались із трьох шарів звичайного скла.

За результатами досліджень були отримані значення відносних деформацій у верхній та нижній зонах плит. Відповідні графіки розподілу деформацій по товщині дослідних зразків для відповідних рівнів навантаження представлено на рис. 5. Покази мікроіндикаторів у верхній зоні (Ів-1, Ів-2) показали деформації стиску, а у нижній зоні (Ін-1, Ін-2) – деформації розтягу.

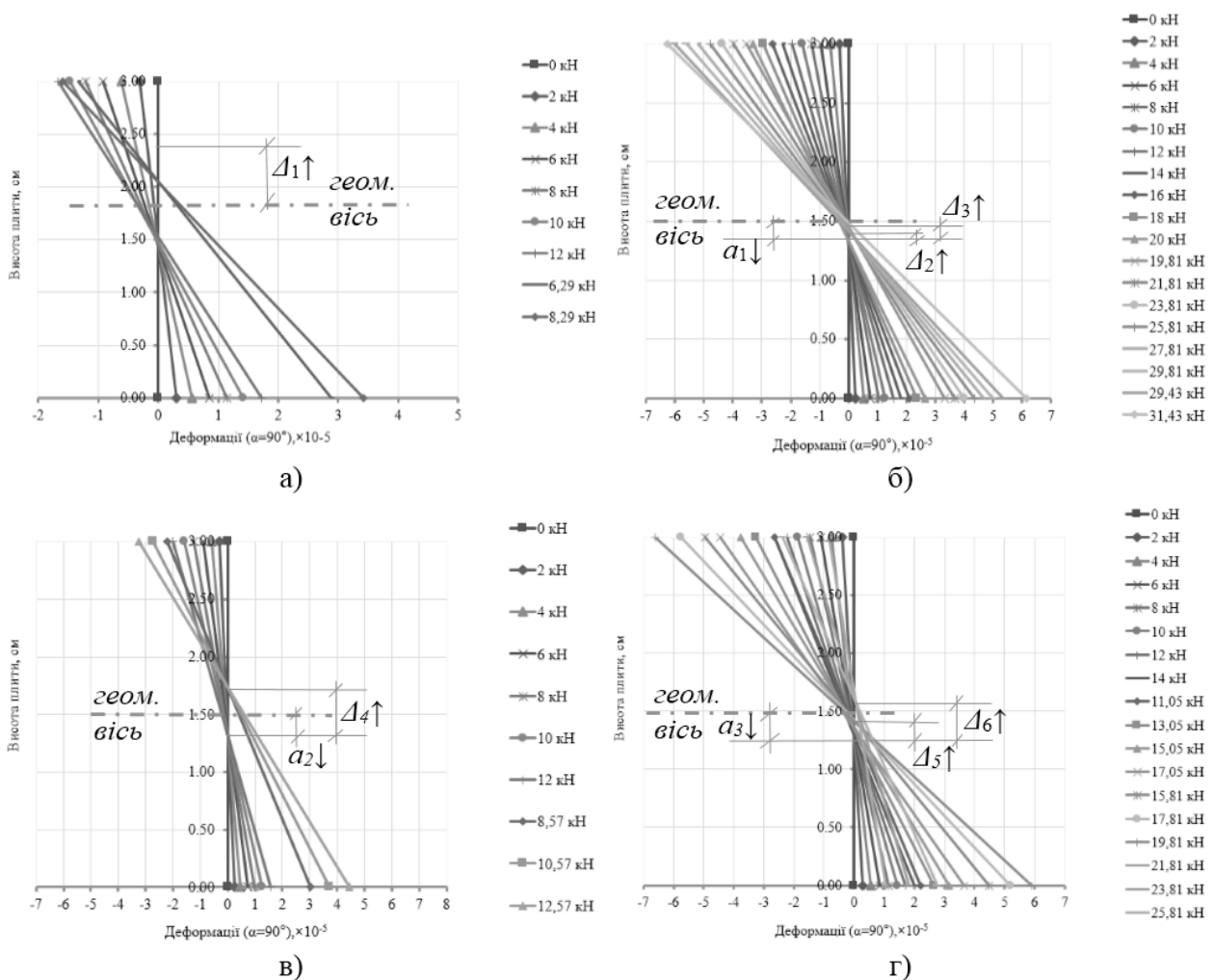


Рис. 5. Графіки залежності прогинів від навантажень для дослідних плит:
 а – марки ПСБ – 1.6; б – марки ПСБ – 2.2; в – марки ПСБ – 3.1; г – марки ПСБ – 3.2
 $a_1 \dots a_3$ – віддалі від геометричної осі перерізу до точки нульових деформацій для відповідних марок плит
 $\Delta_1 \dots \Delta_6$ – зміщення точки нульових деформацій для відповідних марок плит
 $\uparrow \downarrow$ – напрямок зміщень величин a та Δ

Для плити марки ПСБ – 1.6 із трьох шарів із звичайного скла точка нульових деформацій знаходилася по центру поперечного перерізу плити. Використання нижнього шару із гартованого скла в плиті марки ПСБ – 2.2 та підсилюючої тканини Sika в плиті марки ПСБ – 3.1, а також їх поєднання у нижній зоні в плиті марки ПСБ – 3.2, зумовили зміщення точок нульових деформацій вниз від геометричної осі поперечного перерізу плит на віддалі a_1 , a_2 та a_3 , аналогічно до перерізів з армуванням, як у залізобетонних плитах. Руйнування кожного шару скла характеризувалося підняттям точки нульових деформацій в напрямку стиснутої зони, що відповідало поступовому зменшенню робочого перерізу плит. Відповідні зміщення: Δ_1 – для плити марки ПСБ – 1.6, Δ_2 та Δ_3 – для плити марки ПСБ – 2.2, Δ_4 – для плити марки ПСБ – 3.1, Δ_5 та Δ_6 – для плити марки ПСБ – 3.2.

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами виконаних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Отримано результати експериментальних досліджень багатошарових скляних плит, опертих по чотирьох кутах, що працюють на згин від зосередженого навантаження посередині.
2. Картина руйнування плит відповідала хрестоподібному характеру утворених тріщин для звичайного скла та утворенню дрібних частинок для гартованого скла. На відміну від плит з трьома шарами із звичайного скла, які руйнувались поступово від нижнього до верхнього шарів, плити із гартованим склом внизу руйнувались за схемою середній-верхній-нижній шари.

3. Використання нижнього шару плит із гартованого скла забезпечило більшу несучу здатність та більші максимальні прогини у момент руйнування останнього шару у порівнянні із плитами з трьома шарами із звичайного скла.

4. Використання підсилюючої тканини із однонаправлених вуглецевих волокон SikaWrap – 230 C у якості армування нижнього розтягнутого шару показало у момент руйнування останнього шару збільшення несучої здатності для звичайних плит та збільшення максимальних прогинів для плит з гартованим нижнім склом.

Перспективою подальших досліджень є експериментальні дослідження на міцність та деформативність багатшарових скляних плит з різним розміщенням по висоті шару гартованого скла.

Література

1. Ivanov I. Computational models of laminated glass plate under transverse static loading [Electronic resource] / I. Ivanov, D. Velchev, T. Sadowski, M. Kneč // Altenbach H. Shell-Like Structures / H. Altenbach, V. Eremeyev. — Berlin, 2011. — Vol. 15. — P. 469-490. — Available from https://www.research-gate.net/publication/225870830_Computational_Models_of_Laminated_Glass_Plate_under_Transverse_Static>Loading

2. Molnar G. Finite element analysis of laminated structural glass plates with polyvinyl butyral (PVB) interlayer [Electronic resource] / G. Molnar, L. Vigh, G. Stocker, L. Dunai // Periodica Polytechnica Civil Engineering. — 2012. — № 56. — P. 35-42. — Available from https://www.researchgate.net/publication/257650562_Finite_element_analysis_of_laminated_structural_glass_plates_with_polyvinyl_butyral_PVB_interlayer

3. Šāble L. Evaluation of Glass in Design of Load Bearing Structures [Electronic resource] / L. Šāble, K. Kalniņš // Civil Engineering '13 : 4th International Scientific Conference : Proceedings, 16-17 May 2013, Jelgava, Latvia. — 2013. — P. 46-52. — Available from http://lufb.llu.lv/conference/Civil_engineering/2013/partI/Latvia_CivilEngineering2013Vol4PartI.pdf#page=48

4. Sable L. Correlation between Numerical and Experimental Tests of Laminated Glass Panels with Visco-elastic Interlayer [Electronic resource] / L. Sable, E. Skukis, G. Japins, K. Kalnins // Procedia Engineering. — 2017. — № 172. — P. 945-952. — Available from https://www.researchgate.net/publication/313886291_Correlation_between_Numerical_and_Experimental_Tests_of_Laminated_Glass_Panels_with_Visco-elastic_Interlayer

5. Zemanová A. Finite element model based on refined plate theories for laminated glass units [Electronic resource] / A. Zemanová, J. Zeman, M. Sejnoha // Latin American Journal of Solids and Structures. — 2015. — Vol.12, № 6. — P. 1158-1181. — Available from <http://www.scielo.br/pdf/lajss/v12n6/1679-7825-lajss-12-06-01158.pdf>

6. Fröling, M. Strength Design Methods for Glass Structures [Electronic resource] / M. Fröling // Department of Construction Sciences, Lund University. — 2013. — Available from <https://lup.lub.lu.se/search/ws/files/3905499/4076692.pdf>

7. El-Shami M. Structural behavior of architectural glass plates [Electronic resource] / M. El-Shami, Y. Ibrahim, M. Shuaib // World Pumps. — 2010. — № 49. — P. 339-348. — Available from https://www.researchgate.net/publication/251659751_Structural_behavior_of_architectural_glass_plates

8. El-Shami M. Structural behavior of window laminated glass plies using new interlayer materials [Electronic resource] / M. El-Shami, S. Mahmoud // Journal of King Saud University, Engineering Sciences. — 2015. — Available from https://www.researchgate.net/publication/286903566_Structural_behavior_of_window_laminated_glass_plies_using_new_interlayer_materials

9. Bennison S. J. Designing the Grand Canyon's new laminated glass walkway [Electronic resource] / S. J. Bennison, F. Serruys // Proceedings of Glass Performance Days, June 2007, Tampere. — 2007. — P. 333-335 — Available from http://www.sun-tec.ch/downloads/gpd07_bennison.pdf

10. Serafinavicius T. Long-term laminated glass four point bending test with PVB, EVA and SG interlayers at different temperatures [Electronic resource] / T. Serafinavicius, J-P. Lebet, C. Louter, T. Lenkimas, A. Kuranovas // 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013, Procedia Engineering. – 2013. – № 57. – P. 996-1004 – Available from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581300859X>
11. Vallabhan, C. V. G. Analysis of laminated glass units / C. V. G. Vallabhan, Y. C. Das, M. Magdi, M. Asik, , J. R. Bailey // Journal of Structural Engineering. – 1993. – Vol. 119, № 5. – P. 1572–1585.
12. Galuppi L. The effective thickness of laminated glass plates [Electronic resource] / L. Galuppi, G. Royer Carfagni // Journal of Mechanics of Materials and Structures. – 2012. – № 7. – P. 375-400. – Available from https://www.researchgate.net/publication/276942348_The_effective_thickness_of_laminated_glass_plates
13. Galuppi L. Multilayered laminated glass: a sandwich structure with shear compliant cores. Simple modeling via a variational approach [Electronic resource] / L. Galuppi, G. Royer Carfagni. – 2013. – Available from http://www.aimeta.dicam.unibo.it/sites/www.aimeta.dicam.unibo.it/files/static/www.aimetatorino2013.it/cdrom/cdrom_pdf_fullpaper/001490011301.pdf
14. Galuppi L. Practical expressions for the design of laminated glass [Electronic resource] / L. Galuppi, G. Manara, G. Royer Carfagni // Composites Part B: Engineering. – 2013. – Vol. 45, Issue 1. – P. 1677-1688. – Available from https://www.researchgate.net/publication/235686037_Practical_expressions_for_the_design_of_laminated_glass
15. Galuppi L. The effective thickness of laminated glass: Inconsistency of the formulation in a proposal of EN-standards [Electronic resource] / L. Galuppi, G. Royer Carfagni // Composites Part B: Engineering. – 2013. – Vol. 55. – P. 109-118. – Available from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836813002795>
16. Bennison S. Strength of Laminated Safety Glass [Electronic resource] / S. Bennison, C. Smith, A. Van Duser, A. Jagota // Glass Processing Days, 18-21 June 2001, Tampere, Finland. – 2001. – Available from http://glasslaminatingsolutions.kuraray.com/fileadmin/user_upload/technical_information/downloads/whitepapers/strength_of_laminated_safety_glass.pdf
17. Bennison S. J. Structural performance of laminated glass made with a "stiff" interlayer [Electronic resource] / S. J. Bennison, C. Smith, A. Van Duser, A. Jagota // ASTM Special Technical Publication. – 2002. – P. 57-65. – Available from http://glasslaminatingsolutions.kuraray.com/fileadmin/user_upload/technical_information/downloads/whitepapers/structural_performance_of_laminated_glass_made_with_a_stiff_interlayer.pdf
18. Foraboschi P. Optimal design of glass plates loaded transversally / P. Foraboschi // Materials & Design (1980-2015). – 2014. – Vol. 62 – P. 443-458.
19. Демчина Б. Г. Дослідження міцності багатошарових скляних плит, які працюють на згин від зосередженого навантаження штампом / Б. Г. Демчина, Т. Ю. Осадчук // Будівельне виробництво: міжвідомчий науково–технічний збірник. – К.: НДІБВ, 2016. – № 60/2016. – С. 58–63.
20. Демчина Б. Г. Дослідження деформацій багатошарових скляних плит за допомогою кореляції цифрових зображень / Б. Г. Демчина, Т. Ю. Осадчук // Комунальне господарство міст. Серія : Технічні науки та архітектура, 2017. – Вип. 134. – С. 153-163.

Стаття надійшла 23.10.2017