

Р. О. Ткач¹, Б. Г. Демчина¹, М. І. Сурмай¹, Л. І. Вознюк¹, Я. Немец²

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЧЕПЛЕННЯ СКЛЯНИХ ПЛАСТИН МІЖ СОБОЮ ЗА ДІЇ СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

¹ Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра будівельних конструкцій та мостів,
roman7tkach@gmail.com

² Державна вища техніко-економічна школа
ім. о. Броніслава Маркевича

© Ткач Р. О., Демчина Б. Г., Сурмай М. І., Вознюк Л. І., Немец Я., 2019

Слабким місцем будь-якої конструкції завжди є вузол з'єднання елементів. У статті наведено результати дослідження зчеплення скляних пластин, які з'єднані між собою по всій поверхні за допомогою клеючих матеріалів та виготовлених за технологією триплексування, за дії статичного навантаження. Встановлено несучу здатність та деформативність таких з'єднань. Для проведення досліджень спроектовано, виготовлено та випробувано шість серій дослідних зразків. Дослідні зразки склалися з трьох скляних пластин, товщина кожної 10 мм, з'єднаних між собою за допомогою технології триплексування та різних клеючих матеріалів. Розроблено програму експериментальних досліджень. На основі отриманих результатів проаналізовано роботу зчеплення скляних пластин та побудовано усереднений графік залежності деформацій зсуву та дотичних напружень $\tau=N/A$ для серій дослідних зразків.

Ключові слова: шари скла; триплекс; дослідний зразок; скляні пластини.

Вступ

Слабким місцем будь-якої конструкції завжди є вузол з'єднання елементів. Винятком не стали і конструкції зі скла. Проектуючи скляні несучі конструкції, необхідно розуміти, що скло є матеріалом, відносні пластичні деформації якого практично дорівнюють нулю, тобто скло є крихким матеріалом [Del Linz та ін., 2015]. Під час виробництва, монтажу або роботи елемента ризик сколу скла великий, а значить, і перерозподілу внутрішніх напружень, що призведе до миттєвого руйнування конструкції.

З'єднання скляних поверхонь є процедурою високої технічної значущості. Сьогодні найпоширенішим методом з'єднання скла є клейове з'єднання та з'єднання скла за технологією триплексування. Триплексне з'єднання полягає у тому, що між склом вкладають полімерну плівку. Матеріал плівки – це еластомер (полімер з високоеластичними властивостями у широкому температурному діапазоні). З'єднані елементи нагрівають до температури 130 °С і витримують 30 хв. Клейові з'єднання все ширше застосовують в зв'язку зі створенням високоякісних синтетичних клеїв. Порівняно з іншими способами утворення нероз'ємних з'єднань перевага клейового з'єднання полягає у можливості з'єднувати поверхні складної форми. Такі з'єднання дають змогу зберегти структуру і властивості деталей, які склеюють. Здебільшого такі з'єднання герметичні й непроникні для парів та рідин.

Огляд наукових джерел і публікацій

З'єднання є одними із найвідповідальніших частин конструкцій [Zubkov та ін., 2008; Kislyuk та ін., 2010]. Під керівництвом професора Б. Г. Демчини у Національному університеті “Львівська політехніка” в 2017 р. розпочато дослідження скляних багатошарових колон на центральний стиск [Demchyna та ін., 2018]. Разом з тим виникла необхідність визначення податливості зчеплення шарів триплексованого скла, яке набуває все ширшого застосування як конструкційний матеріал.

Архітектори Brunet & Saunier і конструкторське бюро О.Т.Н./Alto – М. Malinowski застосували під час зведення будівлі міського управління у французькому St. Germain-en-Laye в 1995 р. цікаве рішення. Вони перекрили внутрішній двір будівлі скляним дахом, спертим по контуру на скляні колони. Крок колон 5,4×5,4 м, вага, що припадає на одну колону, становила 6 т. Для втілення в життя задуманого проєкту провели натурні експерименти. В результаті випробувань отримали руйнівне навантаження величиною 46 т. Спроєктована колона мала хрестоподібний переріз габаритами 250×250 мм, висоту 3,2 м і була склеєна з трьох шарів загартованого скла. База і торець колони були поміщені в сталеві башмаки з 8-міліметровими неопреновими прокладками [Petersen та ін., 2019].

Ще одним прикладом застосування скла як конструктивного несучого елемента є скляний павільйон Talus du Temple неподалік від французького містечка Noyers (архітектор Dirk Jan Postel, 2001 р.). Павільйон розміром 5,04×5,1 м перекритий дерев'яним дахом, його стіни заввишки 2,3 м складаються з двох 10-міліметрових шарів флоат-скла. Стіни з'єднано з основою і дахом за допомогою сталевих кутників з неопреновими прокладками. Споруда за час свого існування витримала два найсильніші шторми, довівши свою міцність.

Вищенаведені приклади свідчать про можливість застосування скла як несучого елемента конструкцій [Camprone та ін., 2014; Kalamar та ін., 2015]. Однак сьогодні не існує норм, правил або методик розрахунку таких конструкцій.

Мета та завдання дослідження

Проведені дослідження ставили за мету дослідити роботу зчеплення скляних пластин, з'єднаних між собою по всій поверхні за допомогою технології триплексування та клеючих матеріалів за дії статичного навантаження.

Для досягнення поставленої мети було виконано такі завдання:

- спроєктовано та виготовлено дослідні зразки;
- розроблено програму та виконано експериментальні дослідження;
- проаналізовано міцнісні й деформативні характеристики зчеплення скла за допомогою різних матеріалів.

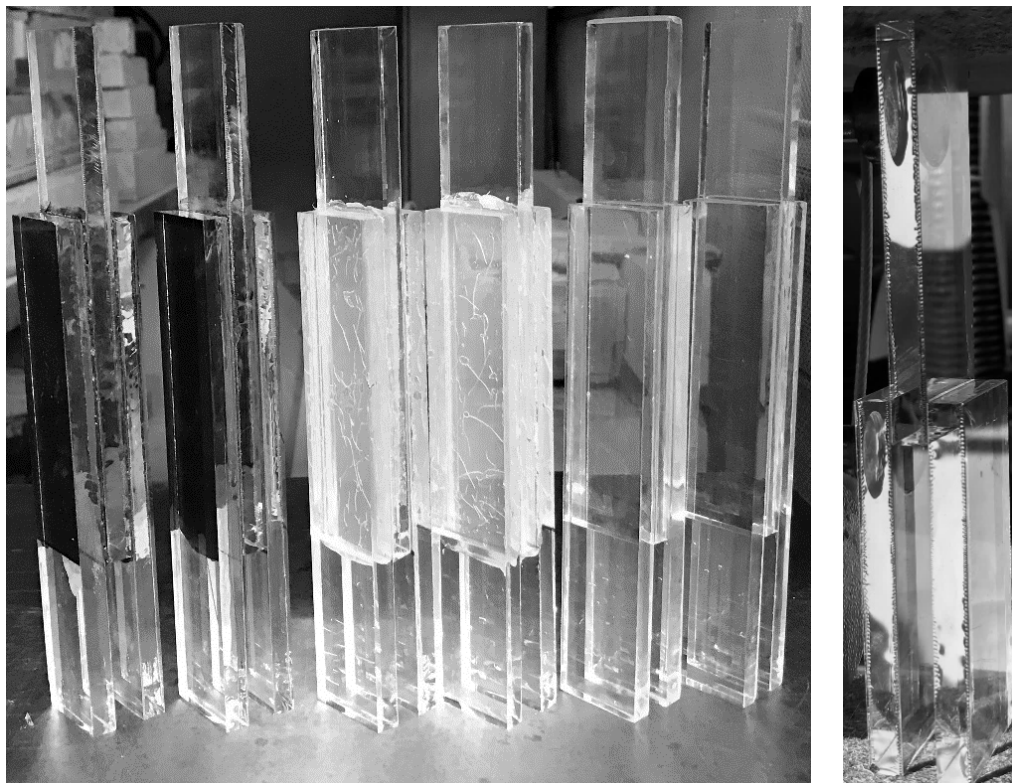
Матеріали та методика дослідження

Було виготовлено шість серій дослідних зразків із негартованого листового скла марки М4 (див. таблицю).

Дослідні зразки склалися із трьох скляних пластин, з'єднаних між собою за допомогою технології триплексування та клеючих матеріалів. Загальний вигляд дослідних зразків показано на рис. 1.

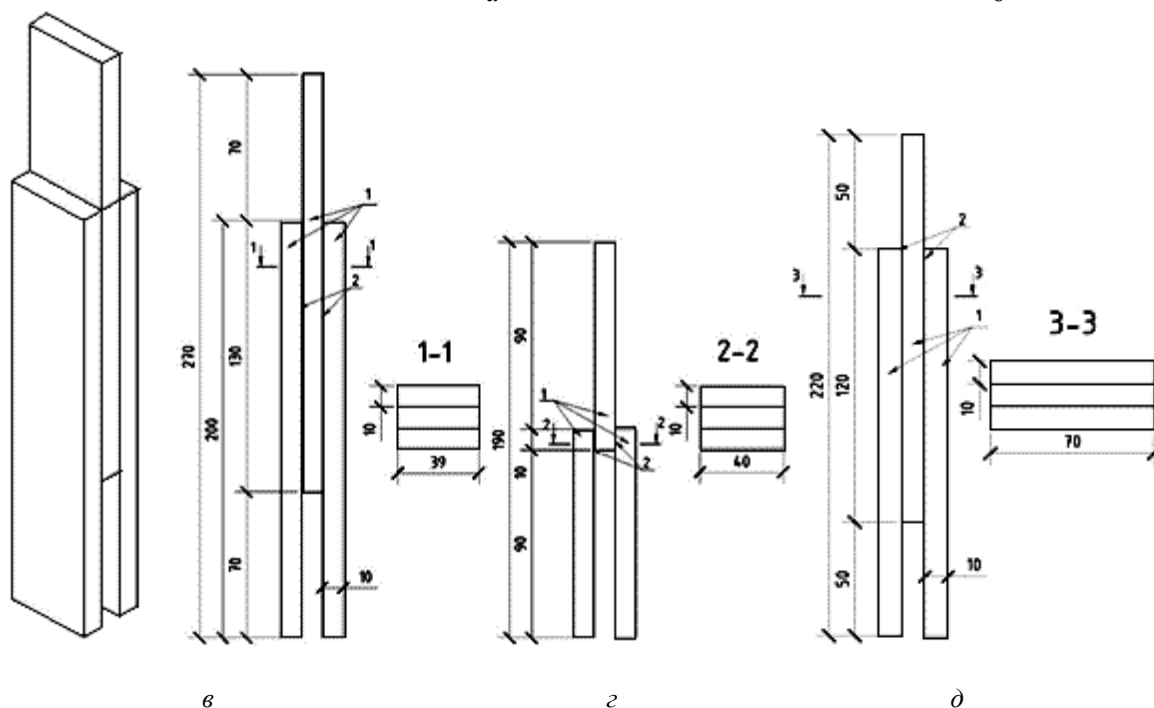
Перед склеюванням скляні пластини дослідних зразків I–V серій було очищено від бруду та знежирено. Клей наносили на всю поверхню однієї пластини, потім скляні пластини міцно з'єднували за допомогою лещат та витримували протягом 5–10 хв. Тривалість тужавіння залежала від клейових матеріалів. Тужавіння клею зразків четвертої та п'ятої серій здійснювалось під променями ультрафіолетової лампи. Пластини дослідних зразків шостої серії з'єднували за технологією триплексування, вкладаючи між пластинами полімерну плівку EVASAFE [Bridgestone, Японія], а дослідні зразки нагрівали до температури 130 °С і витримували 30 хв.

Установка для випробування складалася зі стенда для статичних випробувань конструкції на міцність (рис. 2). Зовнішнє навантаження N прикладали за допомогою гідравлічного домкрата покровою. Величина ступеня навантаження становила 1,0 кН, її контролювали за допомогою динамометра ДОСМ-3-50У для зразків I–V серій та кільцевим динамометром для зразків VI серії аж до повного руйнування дослідного зразка. На кожному ступені навантаження відбувалась витримка 10 хв, після чого виконували зчитування показів приладів.



а

б



в

з

д

Рис. 1. Загальний вигляд дослідних зразків:
 а – загальний вигляд дослідних зразків I-IV серій;
 б – загальний вигляд дослідних зразків V серії; в – конструктивна схема дослідних зразків I-IV серій; з – конструктивна схема дослідних зразків V серії; д – конструктивна схема дослідних зразків VI серії;
 1 – скляна пластина; 2 – шов зчеплення скляних пластин

Характеристики дослідних зразків

| № поз. | Серія | Марка дослідного зразка | Площа склеювання, см ² | Матеріал для з'єднання пластин | Товщина однієї пластини, мм | Характеристики скла | | |
|--------|-------|-------------------------|--|--|-----------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------------|
| | | | | | | Марка скла | Міцність на стиск, МПа | Питома вага, кг/м ³ |
| 1 | I | C3-1.1 | 50,7 | Den Braven Montagefix-AQ (колір чорний) | 10 | M4 | 700 | 2500 |
| 2 | | C3-1.2 | | | | | | |
| 3 | II | C3-2.1 | | Den Braven Zwaluw Aqua-Silicone (колір прозорий) | | | | |
| 4 | | C3-2.2 | | | | | | |
| 5 | III | C3-3.1 | | Термоклей Torrex 42E113 | | | | |
| 6 | | C3-3.2 | | | | | | |
| 7 | IV | C3-4.1 | Ультрафіолетовий клей Loxreal Engineering Adhesives UV 30-23 | | | | | |
| 8 | | C3-4.2 | | | | | | |
| 9 | V | C3-5.1 | 4 | | | | | |
| 10 | | C3-5.2 | | | | | | |
| 11 | VI | C3-6.1 | 84 | Полімерна плівка EVASAFE (Bridgestone, Японія) | | | | |
| 12 | | C3-6.2 | | | | | | |
| 13 | | C3-6.1 | | | | | | |
| 14 | | C3-6.2 | | | | | | |

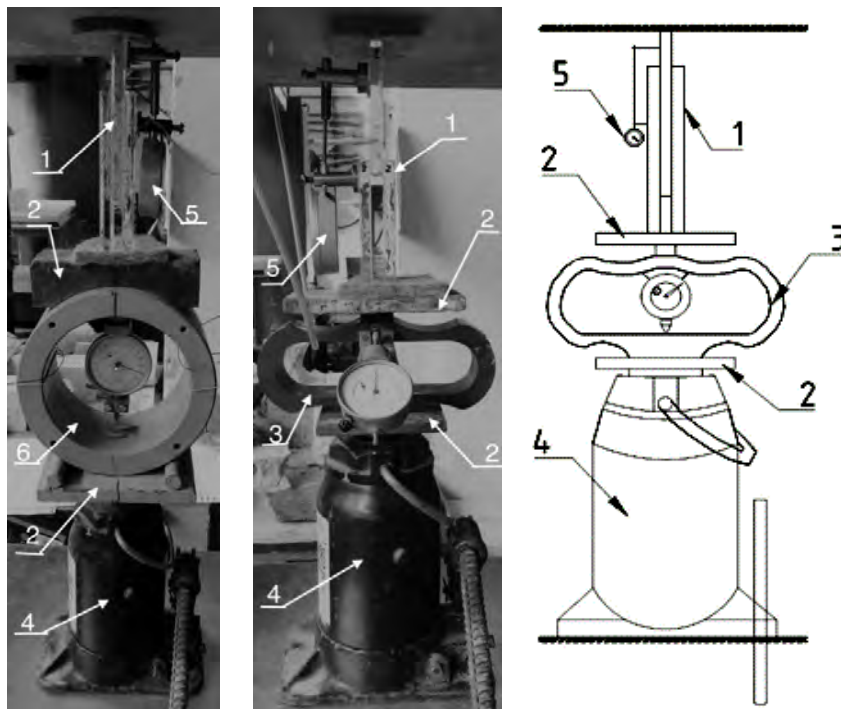


Рис. 2. Видяд випробувальної установки:

- а – загальний видяд випробувальної установки для дослідних зразків VI серії;
 б – загальний видяд випробувальної установки для дослідних зразків I–V; серії;
 в – схема випробувальної установки для дослідних зразків I–V серії; 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 розташовували вертикально. Для уникнення місцевого сколювання та руйнування скла в місцях спирання дослідного зразка на метал було вистелено повстяну прокладку. Для вимірювання абсолютних деформацій використано індикатори годинникового типу 5 з ціною поділки 0,001 мм для дослідних зразків серії IV–VI та 0,01 мм для серій I–III. Заміри абсолютних деформацій проводили аж до повного руйнування дослідних зразків серій I–V. Для VI серії дослідних зразків прилади знімали за величини навантаження 80 % від очікуваного руйнівного.

Результати досліджень

Зразки I серії зруйнувались поступово після досягнення руйнівного значення навантаження, яке становило для дослідного зразка марки СЗ-1.1 $N_{\max} = 8,82$ кН, а для зразка марки СЗ-1.2 $N_{\max} = 8,77$ кН. Характер руйнування дослідних зразків зображено на рис. 3.

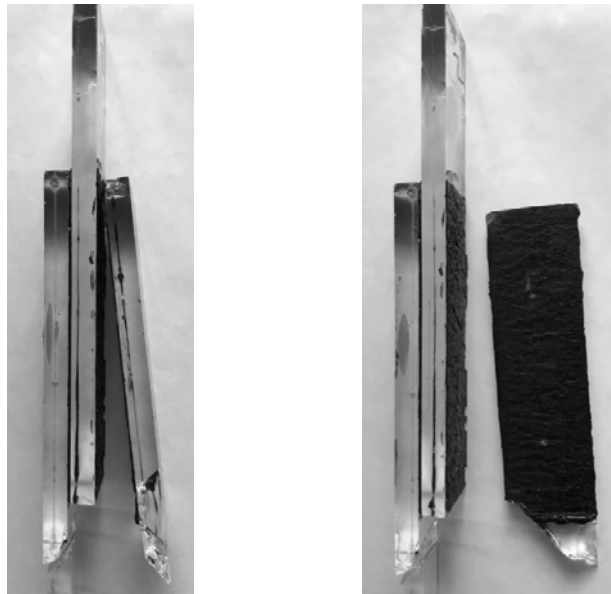
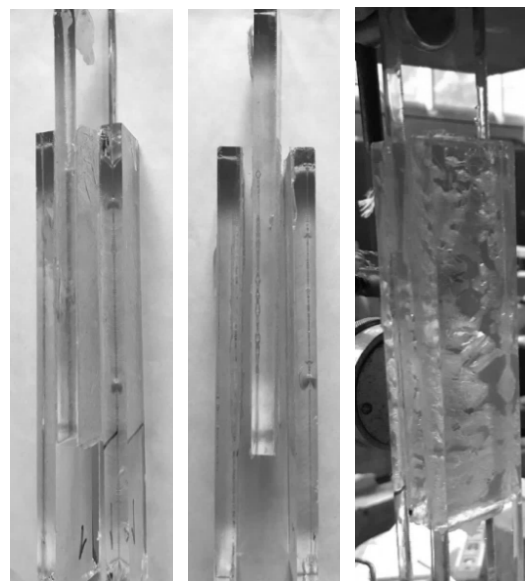


Рис. 3. Характер руйнування дослідних зразків серії I

Рис. 4. Характер руйнування дослідних зразків серії II:
 а – руйнування дослідного зразка марки СЗ-2.1;
 б – руйнування дослідного зразка марки СЗ-2.2;
 в – руйнування дослідного зразка марки СЗ-2.2 під час навантаження $N = 13,2$ кН



а

б

в

Зразки II серії зруйнувались поступово після досягнення руйнівного значення навантаження, яке становило для дослідного зразка марки СЗ-2.1 $N_{\max} = 13,13$ кН, а для зразка марки СЗ-2.2 $N_{\max} = 13,93$ кН. Характер руйнування дослідних зразків зображено на рис. 4.

Зразки III серії зруйнувались поступово після досягнення руйнівного значення навантаження, яке становило для дослідного зразка марки СЗ-3.1 $N_{\max} = 1,34$ кН та для СЗ-3.2 $N_{\max} = 1,32$ кН. Зразки I-III серії зруйнувались по шву зчеплення шарів скла. Характер руйнування дослідних зразків показано на рис. 5.

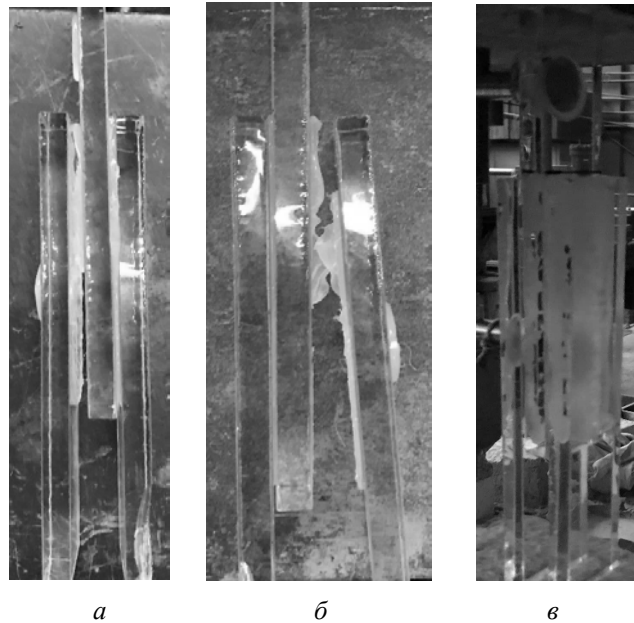


Рис. 5. Характер руйнування дослідних зразків серії III:
 а – руйнування дослідного зразка марки СЗ-3.1; б – руйнування дослідного зразка марки СЗ-3.2;
 в – руйнування дослідного зразка марки СЗ-3.2 за навантаження $N=1,2$ кН

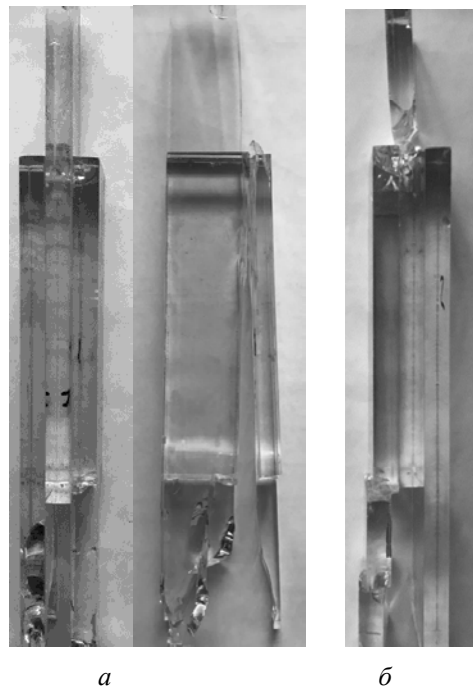


Рис. 6. Характер руйнування дослідних зразків серії IV:
 а – руйнування дослідного зразка марки СЗ-4.1; б – руйнування дослідного зразка марки СЗ-4.2

Зразки IV серії зруйнувались миттєво після досягнення руйнівного значення навантаження, яке становило для марки дослідного зразка СЗ-4.1 $N_{\max} - 32,3$ кН та для СЗ-3.2 $N_{\max} - 33,1$ кН. Деформація зсуву становила не більше ніж 0,5 мм. Дослідні зразки IV зруйнувались по скляних пластинах без руйнування швів зчеплення шарів скла. Характер руйнування дослідних зразків зображено на рис. 6.

Зразки V серії зруйнувались миттєво після досягнення руйнівного значення навантаження, яке становило для марки дослідного зразка СЗ-5.1 $N_{\max} - 9,57$ кН та для СЗ-5.2 $N_{\max} - 8,45$ кН. Деформація зсуву не перевищувала більше ніж 0,5 мм. Дослідні зразки V зруйнувались по шву зчеплення шарів скла. Характер руйнування дослідних зразків показано на рис. 7.

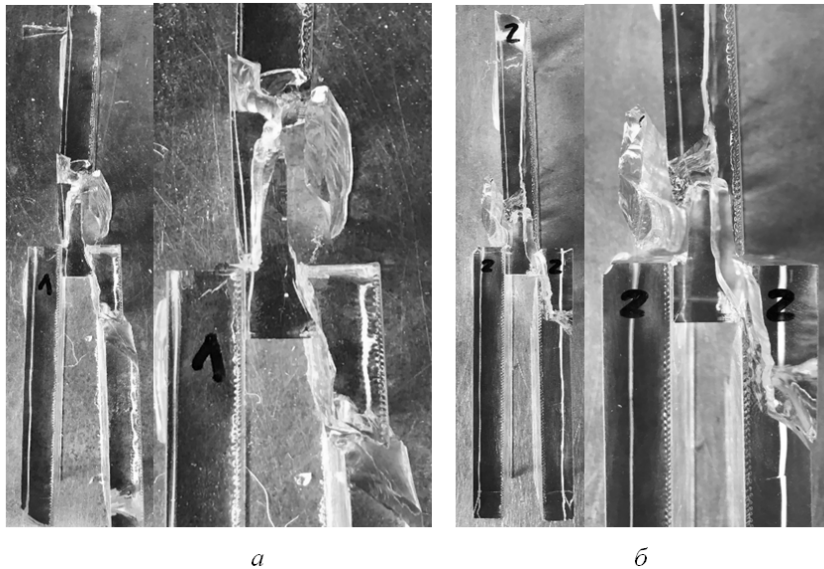


Рис. 7. Характер руйнування дослідних зразків серії V:
а – руйнування дослідного зразка марки СЗ-5.1; б – руйнування дослідного зразка марки СЗ-5.2

Зразки VI серії зруйнувались миттєво після досягнення руйнівного значення навантаження, яке становило для марки дослідного зразка СЗ-6.1 $N_{\max} - 89,09$ кН та для СЗ-6.2 $N_{\max} - 88,56$ кН. Деформація зсуву становила не більше ніж 1 мм. Дослідні зразки VI зруйнувались по скляних пластинах без руйнування швів зчеплення шарів скла. Тому міцність зчеплення шарів скла за деформації зсуву з'ясувати не вдалось. Для цього потрібно зменшити площу з'єднання скляних пластин та повторити дослід. Характер руйнування дослідних зразків зображено на рис. 8.



Рис. 8. Характер руйнування дослідних зразків серії VI

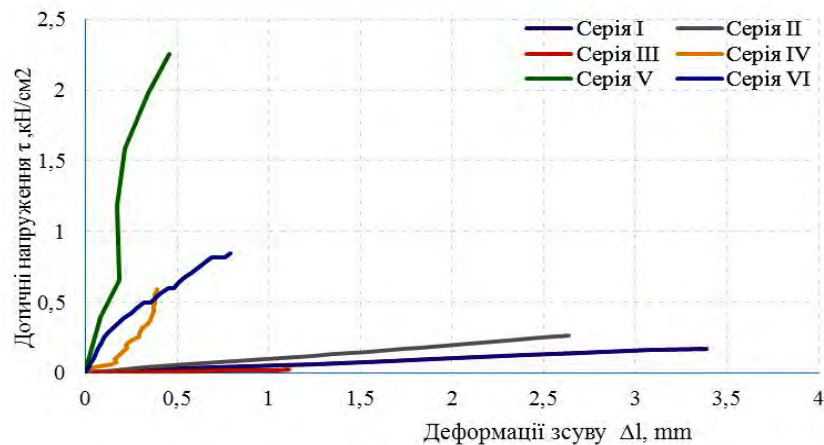


Рис. 9. Графік залежностей деформації зсуву та дотичних напружень τ

За результатами дослідження побудовано усереднений графік залежності деформацій зсуву та дотичних напружень $\tau=N/A$ для серій дослідних зразків (рис. 9).

Як бачимо з графіка, найбільші дотичні напруження у дослідних зразків V з ультрафіолетовим клеєм Loxal Engineering Adhesives UV 30-23, найбільші деформації зсуву в серії I з клеєм Den Braven Montagefix-AQ (колір чорний).

Висновки

1. Розроблено програму експериментальних досліджень, що дало змогу порівняти роботу зчеплення скляних пластин між собою за допомогою технології триплексування та клеючих матеріалів за дії статичного навантаження.
2. У дослідних зразках I–III серій руйнування відбулося поступово, тоді як руйнування серій IV–VI миттєво.
3. Доцільніше для з'єднань у несучих конструкціях зі скла використовувати технологію триплексування та ультрафіолетовий клей.

References

- Zubkov V., & Kondratieva N. (2008). Characteristics of calculation of flat glass in translucent structures, Glass performance days 2008. Conference Proceedings. New Delhi, December, pp. 27–29.
- Kislyuk Ya., Shmigel R., Savenko V., & Sukhoosov G. (2010). Efficiency of application of gluing metal joints of elements of wooden construction, New technologies in construction, vol. No. 1 (19), pp. 75–78.
- Demchyna B., Surmai M., & Tkach R. (2018). Experimental research of laminated glass column for central compression, Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic: Theory and Practice of Construction, No. 888, pp. 52–55.
- Demchyna B., Surmai M., & Tkach R. (2018). Glass column, The patent of Ukraine No. 128990, E04C 3/30, E04B 1/18, E04B 1/28, E04H 15/34, E04H 15-60, No. u201805969 statement 29.05.2018; posted 10.10.2018.
- Del Linz P., Hooper P. A., Arora H., Smith D., Pascoe L., Cormie D., Blackman B.R.K., & Dear J.P. (2015). Reaction forces of laminated glass windows subject to blast loads, Composite Structures, Vol. 131, pp. 193–206.
- Kalamar R., & Eliasova M. (2015). Load Bearing Innovative Construction from Glass, 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies. Riga, pp. 1–7.
- Petersen R., & Bagger A. (2019). Structural use of glass: Cruciform columns and glass portals with bolted connections subjected to bending, Glass performance days 2009, pp. 371–375.
- Campione G., Di Paola M., & Minafo G. (2014). Laminated Glass Members in Compression: Experiments and Modeling, Journal of Structural Engineering, No. 2, pp. 1–9.

Roman Tkach¹, Bohdan Demchyna¹, Mykhaylo Surmai¹, Leonid Vozniuk¹, Janusz Niemiec²

¹ Lviv Polytechnic National University,
Department of Building Constructions and Bridges

² State Higher Technical and Economic School.
at. Bronislav Markevich

A STUDY OF MUTUAL ADHESION OF GLASS PLATES UNDER STATIC LOADING

© Tkach R., Demchyna B., Surmai M., Voznyuk L., Niemiec J., 2019

The weak point of any structure is always the elements junction node. This article presents the results of a study of the adhesion of glass plates interconnected over the entire surface by means of adhesive materials and triplex technology under the action of static loading. The bearing capacity and deformability of such joints was established. For the research purposes there were designed, manufactured and tested six series of prototypes. The prototypes consisted of three glass plates, each 10 mm thick, interconnected by means of triplex technology and various adhesive materials. Before bonding, the glass plates of the prototypes of I–V series were cleaned of dirt and degreased. The adhesive was applied to the entire surface of one plate. Then, the glass plates were firmly interconnected with the help of the vise and held for 5–10 minutes. The curing time depended on the adhesive materials. The curing of the glue of the samples of the fourth and fifth series was done under the rays of an ultraviolet lamp. The plates of the sixth series prototypes were interconnected by triplex technology, where EVASAFE polymer film (Bridgestone, Japan) was inserted between the plates and the prototypes were heated to 130 °C and held for 30 minutes.

An experimental research program was developed. The test rig consisted of a stand for static structural strength tests. The external load N was applied by means of a hydraulic jack and was performed step by step. The magnitude of the load was 1.0 kN and was monitored using a DOSM-3-50U dynamometer for the I–V series prototypes and a ring dynamometer for the VI series prototypes until the complete destruction of the prototype. At each load stage a 10 min exposure was performed followed by gauge reading. On the basis of the obtained results, an analysis of glass plates adhesion was performed and an averaged dependency graph of shear deformations and tangent stresses $\tau = N / A$ for the series of the prototypes was constructed.

Key words: glass layers; triplex; prototype; glass plates.