

УДК 539.4

Вадим Хворостяний¹, к.т.н., ст. досл.; Микола Долгов¹, д.т.н., проф.; Світлана Тарасовська¹, к.т.н., ст. досл.; Наталія Немерцева², Андрій Кравчук¹, к.т.н., ст. досл.; Максим Цисар¹, к.т.н.; Володимир Бодунов¹

¹Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Україна

²ТОВ «СНОК ЛТД», Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТРИВАЛОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ІОННОГО ОБМІНУ НА ГРАНИЦЮ МІЦНОСТІ ФЛОАТ-СКЛА В УМОВАХ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ЗГИНУ

Анотація. Проведено комплексне експериментальне дослідження закономірностей впливу тривалості технологічної операції іонного обміну на границі міцності листового флоат-скла. Експериментальна частина дослідження була реалізована на зразках у формі квадратних пластин із номінальною товщиною 8,0 мм, які випробували методом осесиметричного згину з використанням подвійного співвісного кільця. Це дозволило забезпечити рівномірний розподіл напружень у центральній зоні зразка та мінімізувати вплив крайових дефектів на кінцевий результат. На основі отриманих експериментальних даних встановлено залежність характеристик міцності матеріалу від тривалості операції іонного обміну. Визначено, що максимальні значення міцності флоат-скла досягаються для тривалості обробки впродовж 24 годин, оскільки саме такий часовий інтервал забезпечує формування оптимального профілю наведених напружень стиску та достатню глибину проникнення модифікованого шару в структуру скла. Одержані результати мають практичну цінність для розробки енергоефективних режимів зміцнення скляних виробів, що працюють в умовах підвищених експлуатаційних навантажень

Ключові слова: флоат-скло, технології зміцнення, іонний обмін, границя міцності, осесиметричний згин.

Vadym Khvorostianyi¹, Ph.D., Senior Researcher; Mykola Dolgov¹, D.Sc., Prof.; Svitlana Tarasovska¹, Ph.D., Senior Researcher; Natalia Nemertseva², Andriy Kravchuk¹, Ph.D., Senior Researcher; Maksym Tsysar¹, Ph.D.; Volodymyr Bodunov

STUDY OF THE EFFECT OF THE DURATION OF THE ION EXCHANGE PROCESS ON THE STRENGTH OF FLOAT GLASS UNDER AXISYMMETRIC BENDING CONDITIONS

Abstract. A complex experimental study was performed to determine the influence of the ion exchange process duration on the strength of float glass sheets. The experimental stage of the research was realised on specimens in the form of square plates with a nominal thickness of 8.0 mm, which were tested by the axisymmetric bending technique using a double coaxial ring. This allowed for a uniform stress distribution in the central zone of the specimen and minimised the influence of edge defects on the final result. Using the experimental data obtained, the dependence of the strength characteristics of the material on the ion exchange duration was established. It was determined that the maximum strength of float glass is achieved for a processing duration of 24 hours, as this time period ensures the creation of an optimal profile of induced compressive stresses and sufficient penetration depth of the modified layer into the glass structure. The results obtained are of practical importance for the development of power-efficient strengthening conditions for glass components that are operated under conditions of increased service loads

Keywords: float glass, strengthening techniques, ion exchange, strength limit, axisymmetric bending.

Сучасним та високоефективним методом хімічного зміцнення скла є іонний обмін, який дозволяє суттєво зменшити негативний вплив наявних у приповерхневому шарі технологічних тріщиноподібних дефектів внаслідок створення напружень стиску, що блокують їх розвиток під дією зовнішнього навантаження. Основними факторами іонного обміну є температура процесу, його тривалість та концентрація іонів у сольовій ванні. Відомо, що збільшення температури та часу іонного обміну зумовлює зростання глибини модифікованого шару скла і зменшення величини напруження стиску [1]. Попри значну кількість досліджень у цій галузі, пошук оптимальних параметрів іонного обміну для флоат-скла різної товщини залишається актуальним. Це необхідно для досягнення таких показників як глибина зміцненого шару та напруження стиску, які забезпечать максимальну міцність матеріалу та довговічність елементів конструкцій із скла.

За літературними даними для зразків скла великих товщин під час іонного обміну застосовують температурний режим в діапазоні від 390...410 до 425...500 °C, а час технологічного процесу може становити від 6 до 24 годин. При цьому зазвичай глибина модифікованого шару скла складає 24...51 мкм, а найбільші значення 56...90 мкм. Рівень залишкових напружень стиску в зміцненому іонним обміном склі може досягати 600 МПа, а середнє значення границі міцності визначається в досить широких межах від 141 до 984 МПа [2]. Водночас відмічається значний розкид експериментальних результатів. В роботах [3, 4] показано, що підвищення тривалості проведення іонного обміну є причиною виникнення неоднорідних профілів напружень в іонно-обмінних шарах скла і наявності максимуму в глибині зразка. Водночас надмірне підвищення температури та подовження тривалості витримки скла в сольовому розплаві стають лімітуючими факторами для зростання його міцності, оскільки інтенсифікують процеси релаксації напружень стиску на поверхні зразків.

Мета даного дослідження полягає у виявленні та аналізі впливу часових параметрів іонообмінного процесу на характеристики міцності листового флоат-скла. Сформовані за результатами роботи висновки слугуватимуть науково-практичною базою для подальшої оптимізації виробництва виробів зі скла. Це дозволить досягти синергетичного ефекту: суттєвого зміцнення модифікованого флоат-скла при одночасному підвищенні економічної ефективності виготовлення продукції із нього.

Експериментальні дослідження виконували на підготовлених зразках розмірами 160 мм × 160 мм × 8,0 мм методом осесиметричного згину з використанням подвійного співвісного кільця [5, 6]. Аналізували три партії зразків скла, що піддавалися іонно-обмінному зміцненню протягом $t = 6, 12$ та 24 години відповідно за постійної температури $T = 420$ °C. Значення цієї температури обиралися з міркувань мінімізації витрат електроенергії та забезпечення проведення ефективного дифузійного іонно-обмінного процесу. Випробування провели на сертифікованій сервогідравлічній установці Instron 8802 250 kN у жорсткому режимі навантаження із контрольованою швидкістю переміщення траверси 1 мм/хв. Дослідження виконані за температури $T = 15...17$ °C та відносної вологості повітря RH = 40...60 %.

Метод випробувань передбачав розміщення зразків у вигляді плоских квадратних пластин на опорному кільці радіусом a ($a = 32$ мм). Прикладення зусилля аж до моменту руйнування скла відбувалося за допомогою співвісно розташованого навантажувального кільця радіусом r_0 ($r_0 = 16$ мм). За таких співвідношень між товщиною зразка, довжиною його сторони та розмірами коаксіальних випробувальних кілець у робочій зоні зразка з площею, що окреслена розміром навантажувального кільця, створюється однорідний двовісний напружений стан. Це забезпечує розвиток усіх наявних мікротріщин чи інших дефектів тріщинуватого приповерхневого шару

скла незалежно від їх напрямку та орієнтації відносно осей зразка. Напруження, що виникають на кромках та крайовій області зразка за своєю величиною є значно меншими за ті, що діють у центральній зоні розтягу, які є визначальними за цих експериментальних умов. Визначена границя міцності скла залежить передусім саме від стану поверхні зразка. Тому цю механічну характеристику називають поверхневою міцністю плоского скла і визначають відповідно до наступного виразу [7]:

$$\sigma = \frac{3P}{2\pi \cdot h^2} \left[(1 - \mu) \frac{a^2 - r_0^2}{2a^2} \cdot \frac{a^2}{b^2} + (1 + \mu) \ln \left(\frac{a}{r_0} \right) \right] \quad (1)$$

де P – критичне значення прикладеного зусилля, що спричиняло руйнування зразка, Н; h – товщина зразка, мм; μ – коефіцієнт Пуассона; b – радіус круга, який відповідає характеристичному розміру квадратної пластини, мм.

Загальна вибірка становила 30 зразків флоат-скла, розділених на три партії (8, 11 та 11 зразків відповідно), які піддавали іонообмінному зміцненню впродовж 6, 12 та 24 годин. Після завершення випробувань проводили аналіз характеру руйнування кожної пластини зруйнованого скла для ідентифікації джерела руйнування та підтвердження його локалізації в зоні під навантажувальним кільцем. На основі аналізу локалізації центрів руйнування було виключено два результати з вибірки зразків, що пройшли іонообмінну обробку впродовж $t = 6$ годин, оскільки початок руйнування відбувся за межами зони навантаження. Аналогічно, із вибірки з часом витримки $t = 24$ години вилучено один викид, який суттєво відхилявся від загального масиву даних і не враховувався у подальших розрахунках. Характер утвореної сітки радіальних тріщин з ознаками вторинного розтріскування та відповідний ступінь фрагментації зразків чітко корелюють із визначеними значеннями границі міцності скла на розтяг в умовах згину (рис. 1).



Рисунок 1 – Фотографії зруйнованих пластин флоат-скла з іонно-обмінним зміцненням протягом $t = 12$ годин: a – зразок № 11, $\sigma = 206$ МПа; b – зразок № 4, $\sigma = 601$ МПа.

Аналіз результатів проведених досліджень показує, що для флоат-скла зразків товщиною 8 мм для отримання найбільшої міцності необхідний час технологічної операції іонного обміну становить $t = 24$ години. Саме такий час витримки зразків призводить до того, що дифузія іонів відбувається глибше в матеріал, приповерхневий модифікований шар скла стає з більш однорідними напруженнями стиску, а це своєю чергою є причиною найбільших значень границі міцності, визначеної методом осесиметричного згину. Встановлено, що середнє значення міцності у порівнянні з часом обробки 6 та 12 годин збільшилося на 18,9% та 7,2% відповідно; максимальне

значення міцності зросло більш суттєво – на 35,9% та 15,3% відповідно; мінімальне значення міцності також значно підвищилося – на 99,3% та 40,3% відповідно. Слід зазначити, що зі збільшенням часу іонного обміну розкид емпіричних результатів визначення границі міцності скла дещо зменшується. Гістограма залежності границі міцності флоат-скла від часу тривалості операції іонного обміну наведено на рис. 2.

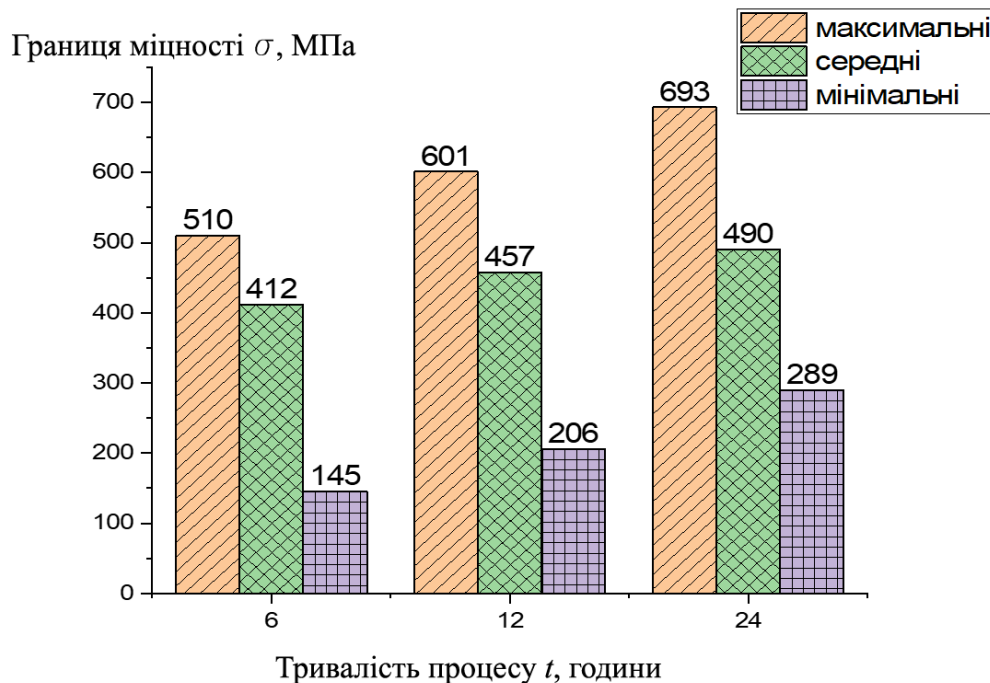


Рисунок 2 – Гістограма залежності границі міцності (максимальні, середні та мінімальні значення) флоат-скла від часу проведення іонно-обмінного процесу

Перелік посилань

1. Mognato E., Schiavonato M., Barbieri A., Pittoni M., Process influences on mechanical strength of chemical strengthened glass. *Glass Structures and Engineering*, Vol. 1, No. 1, P. 247 – 260 (2016).
2. Sglavo V. M., Chemical strengthening of soda lime silicate float glass: effect of small differences in the KNO₃ bath. *International Journal of Applied Glass Science*, Vol. 6, No. 1, P. 73 – 82 (2015).
3. Shen J., Green D. J., Prediction of stress profiles in ion exchanged glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 344, No. 1-2, P. 79 – 87 (2004).
4. Mazzoldi P. et al, Ion exchange process: history, evolution and applications. *Rivista del nuovo cemento*, Vol. 36, No. 9, P. 397 – 450 (2013).
5. Витман Ф. Ф., Пух В. П., О методе определения прочности листовых стекол. *Заводская лаборатория*, №7, С. 863 – 867 (1963).
6. EN ISO 1288-5:2022. Glass in building. Determination of the bending strength of glass – Part 5: Coaxial double-ring test on flat specimens with small test surface areas, BSI, UK (2022).
7. Müller-Braun S., Schneider J., Biaxially curved glass with large radii – determination of strength using the coaxial double ring test. *Glass Struct. Eng.*, Vol. 2, P. 121 – 131 (2017).