

Конструкційна міцність термічно зміцненого скла

Ю. М. Родічев,^{a,1} Ф. А. Веср^b, О. Б. Сорока^a, О. А. Шабетя^a

^a Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

^b Дельфтський технічний університет, Дельфт, Нідерланди

¹ gum@ipp.kiev.ua

Розглянуто визначальні фактори конструкційної міцності термічно зміцненого скла. За допомогою лазерного інтерферометра Scalp 4 експериментально отримано залишкові напруження в різних частинах поверхні зразків термічно зміцнених HS- та FT-стекло. Визначено розподіл залишкових напружень по площі зразків. Установлено, що стандартні методи виробничого контролю ступеня загартування, які передбачають визначення напружень стиску лише у декількох точках, дозволяють приблизно оцінити середній рівень наведених залишкових напружень у скляних елементах конструкцій і не визначають їх реальне значення біля місць руйнування. Обґрунтовано необхідність застосування методик більш детального виробничого контролю залишкових напружень для отримання їх статистичного розподілу та оптимізації режимів термічного зміцнення згідно із спеціальними вимогами до будівельного скління і виробів нової техніки. Аналіз досліджень, пов'язаних із визначенням "ефекту зміцнення" при термічній обробці скла, показав, що він перевищує рівень залишкових напружень. Через статистичну природу міцності скла та залишкових напружень визначення емпіричного коефіцієнта, який традиційно враховує підвищення вкладу залишкових напружень у величину міцності термічно зміцненого скла, зумовлено значними труднощами. На основі вибірок значень границі міцності при згині скла у вихідному та термічно зміцненому стані методами математичної статистики визначено розрахунковий розподіл величин напружень, які характеризують ефект зміцнення. Досліджено вплив комбінації термічного зміцнення та травлення на характеристики міцності скла. Установлено, що підвищення міцності скла і виробів із нього, зміцнених за комбінованими технологіями, супроводжується суттєвим збільшенням розкиду величин границі міцності, а вплив комбінованої обробки на границю міцності скла є неадитивним.

Ключові слова: конструкційна міцність, термічне зміцнення, HS- і FT-стекла, вихідна міцність, залишкові напруження, травлення, комбіноване зміцнення.

Вступ. Скло як конструкційний матеріал набуло широкого застосування в будівництві, авіаційній і транспортній промисловості та у виробках нової техніки, що працюють в екстремальних умовах. Принциповими відмінностями скла від інших конструкційних матеріалів є його лінійно-пружний характер деформування, крихке руйнування та значно більший опір руйнуванню при дії напружень стиску, ніж напружень розтягу. Ці особливості визначали традиційні і перспективні сфери застосування скла. В Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України під керівництвом академіка Георгія Степановича Писаренка було створено напрямок наукових досліджень конструкційної міцності скла для елементів конструкцій, що працюють в екстремальних умовах. При цьому виходили з концепції, що "... стосовно класу крихких матеріалів типу скла та ситалів, що мають, на відміну від такого традиційного матеріалу, як сталь, ряд специфічних особливостей, при визначенні конструкційної міцності має бути накладено суттєве обмеження, обумовлене тим, що може йтися про конструкційні елементи, які в процесі експлуатації підлягають напруженням стиску" [1]. Така постановка питання передбачала, що внаслідок крихкості та низької міцності скла в умовах розтягу і надзвичайно високої міцності при стисканні його застосування як специфічного конструкційного матеріалу є перспек-

тивним для таких інженерних конструкцій, де за рахунок умов експлуатації та комплексу спеціальних технічних рішень забезпечено роботу при напруженнях стиску. Цю ідею було ефективно реалізовано при створенні різного роду оболонок для глибоководних технічних засобів, що працюють при високому всебічному гідростатичному тиску. Локальна міцність таких виробів у місцях дії значних напружень розтягу, зокрема в області з'єднань, забезпечувалась за допомогою методів термічного зміцнення й іонного обміну, в основі яких лежить використання високої міцності скла при стисканні для стримання росту поверхневих тріщин шляхом утворення залишкових напружень стиску високого рівня.

Розвиток наукових основ конструкційної міцності крихких матеріалів призвів до розширення області їх застосування, прогресу в сфері технологій виготовлення, зміцнення флоат скла і крупногабаритних виробів із нього та до фундаментальних досягнень у проектуванні світлопрозорих архітектурних споруд, авіаційного, транспортного скління, а також інших виробів, які експлуатуються в умовах, коли напруження розтягу при статичному і динамічному навантаженні є невід'ємною частиною їх напруженого стану. За цих умов необхідно враховувати наступні особливості скла як конструкційного матеріалу: його граничний стан є набагато чутливішим до мікроскопічних дефектів типу тріщин на поверхні, ніж до внутрішніх дефектів; внаслідок гранично низького рівня тріщиностійкості ($K_{Ic} = 0,5...0,7 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) критичний розмір дефектів для скляних конструкцій може становити 20...30 мкм, що на декілька порядків менше за розміри критичних тріщин у металевих конструкціях; характеристики міцності змінюються в широкому інтервалі (для технічного скла у вихідному стані границя міцності при згині може становити 10...200 МПа, для термічно зміцненого скла – 70...300 МПа); результати випробувань скла на міцність в умовах згину та розтягу є статистично неоднорідними; на відміну від більшості конструкційних матеріалів, для скла неможливо за допомогою поправкових коефіцієнтів визначити величину конструкційної міцності та гарантувати її введенням коефіцієнта запасу міцності, якщо за базове значення характеристики міцності використовувати дані виробника або довідкової літератури. Таким чином, для скла відсутні гарантовані виробниками значення характеристик конструкційної міцності, і питання забезпечення надійності і ресурсу конструкцій вирішуються спеціалістами різних галузей промисловості в залежності від сфери застосування.

Ефективними методами підвищення міцності скла є зменшення дефектності поверхневого шару шляхом механічної обробки і травлення та наведення залишкових напружень стиску в поверхневому шарі за рахунок термічної обробки й іонного обміну. Незважаючи на хороші результати при зміцненні скла за технологією іонного обміну, термічна обробка залишається основним методом забезпечення міцності і ресурсу архітектурного скла, авіаційного скління та виробів для екстремальних умов експлуатації. Принциповим для широкого застосування і підвищення надійності технічного скла у будівельних конструкціях та виробах нової техніки в складних і екстремальних умовах експлуатації є освоєння технологій термічного зміцнення флоат скла на основі спеціалізованого обладнання для ефективного поточного виробництва.

Актуальними проблемами розвитку технологій термічного зміцнення виробів із скла є забезпечення заданого рівня міцності та характеру руйнування в залежності від умов експлуатації. Міцність інтенсивно загартованого FT-скла регламентується стандартом EN 12150-2:2004 [2] на рівні не менше ніж 120 МПа. При руйнуванні багат шарових конструкційних елементів із такого скла через високий рівень внутрішніх напружень розтягу і значне накопичення при навантаженні енергії пружного деформування утворюються малі за розмірами уламки шарів скла, що призводить до втрати оптичних властивостей скління та деградації його міцності (рис. 1). Границя

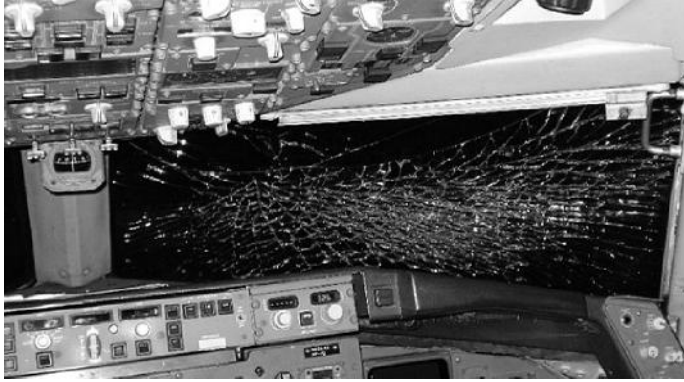


Рис. 1. Руйнування загартованого FT-скла.

міцності HS-скла, зміцненого за менш інтенсивними режимами термообробки, повинна становити не менше 70 МПа. Значно менший рівень внутрішніх напружень розтягу призводить до того, що елементи з такого скла руйнуються шляхом утворення сітки невеликої кількості повільно зростаючих тріщин та уламків значно більших розмірів, ніж FT-скла. При цьому, на відміну від інтенсивно загартованого скла, зберігається прозорість порушених багатошарових блоків будівельного й авіаційного скління та підвищується їх залишкова (“post fracture”) міцність на стадії руйнування певної частини шарів скла у складних та екстремальних умовах експлуатації [3]. Рис. 2 ілюструє характер довготривалого втомного руйнування обігрівного шару з HS-скла багатошарового авіаційного блоку з рівнем залишкових напружень стиску, необхідним для збереження його прозорості у складних умовах експлуатації. Дослідження умов руйнування термозміцнених елементів зі скла показали, що під впливом технологічних і конструкційних факторів фактичний значення міцності таких елементів зі скла можуть бути значно меншими або вищими, ніж ті, що є в стандартах та технічних вимогах до виробів нової техніки.

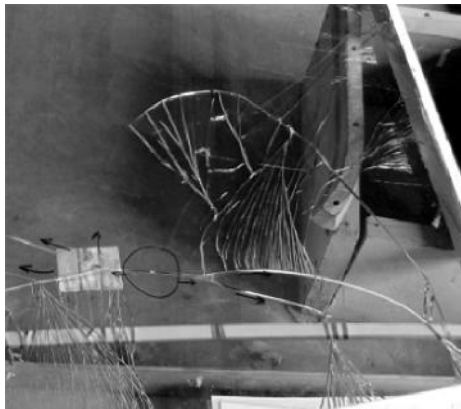


Рис. 2. Збереження прозорості HS-скла.

У табл. 1 наведено параметри міцності вихідного та термічно зміцненого за режимами з різною інтенсивністю загартування будівельного скла, отримані на основі узагальнення даних випробувань на чотириточковий згин за стандартом [2] зразків товщиною 4–12 мм, довжиною 1100 мм і шириною 350 мм із 15 ліній термічного зміцнення архітектурного скла [4, 5]. Довжина робочої зони чистого згину становить

Міцність термічно зміцненого та флоат скла

Параметри міцності при згині, МПа	Термозміцнене скло (HS)	Загартоване скло (FT)
Вихідна міцність σ_0	64 (40...80)	
Залишкові напруження σ^{res}	48 (35...60)	95 (80...110)
Міцність при згині після термічної обробки σ^{ts}	120 (80...165)	175 (110...240)

Примітка. У дужках наведено інтервал значень σ^{res} і σ^{ts} .

200 мм. Поверхневі залишкові напруження стиску σ^{res} визначали з використанням лазерного вимірювача GASP відповідно до [2] у п'яти місцях – у центрі та на чотирьох кутах зразків на відстані від краю 50 мм. Для отримання рівня залишкових напружень HS-скла 35...60 МПа необхідно застосовувати менш інтенсивні режими охолодження у порівнянні з FT-склом. Але результати випробувань показали надто високе середнє значення границі міцності при згині – 120 МПа при мінімальному – 80 МПа. Найвищий рівень міцності термічно зміцненого скла стандартами не обмежується. Максимальне значення границі міцності при згині для HS-скла сягає 165 МПа. Такий рівень є занадто високим і наближається до середнього рівня загартованого скла, що призводить до його неприпустимо дрібної фрагментації. Тому задача більш детального, порівняно зі стандартом [2], контролю рівня залишкових напружень у конструкційних елементах із HS-скла, до яких висуваються спеціальні вимоги щодо міцності і прозорості, є актуальною.

Аналіз причин руйнування термічно зміцненого скла показує, що експлуатаційні пошкодження поверхні, недостатня міцність, порушення умов експлуатації та екстремальні режими термосилового навантаження можуть призвести до передчасного і непередбачуваного руйнування авіаційного й інших видів скління. Наприклад, неконтрольоване збільшення рівня загартування може бути причиною не тільки втрати прозорості, а й недостатньої ударної стійкості захисного скла при багаторазовому навантаженні. Рис. 3 ілюструє характер руйнування кулестійкого скління при застосуванні оптимальних режимів термічної обробки HS-скла. Механічна поведінка броньованого блоку із загартованого скла, отриманого за режимом інтенсивного загартування, відрізняється надто малими розмірами уламків та недостатньою ударною стійкістю (рис. 4). Після першого ударного навантаження прозорість блоку втрачається. Проблематичною стає стійкість при наступному випробуванні.



Рис. 3. Руйнування захисного блоку з HS-скла.

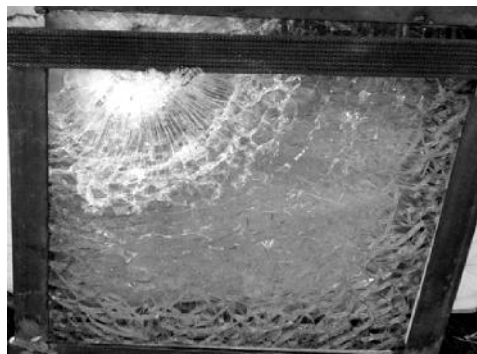


Рис. 4. Захисний блок з FT-скла.

Таким чином, важливим є забезпечення заданого рівня міцності та прогноз роботоздатності елементів конструкцій з термічно зміцненого скла. Ці питання для архітектурного скла протягом багатьох років вивчаються та вирішуються в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України у науковому співробітництві з Дельфтським технічним університетом (далі – TU Delft) [6, 7]. При цьому розглядається ряд аспектів щодо реального вкладу визначальних, із точки зору конструкційної міцності, технологічних факторів, а саме: міцність вихідного скла; зміна фізико-механічних властивостей його поверхневих шарів в умовах термічного зміцнення; рівень залишкових напружень, наведених при термічному зміцненні; статистичний розподіл цих характеристик, а також характер та рівень дефектності скла у вихідному стані і після термічної обробки, які досі вивчено недостатньо.

Метою роботи є дослідження впливу визначальних факторів на міцність термічно зміцненого скла та розробка підходів до оцінки ефекту зміцнення на основі інструментального вимірювання залишкових напружень і врахування зміни опору напруженням розтягу за рахунок особливостей фізико-механічного стану поверхневого шару обробленого скла.

Залишкові напруження у загартованому і термозміцненому склі. Їх визначення за традиційними підходами передбачає встановлення границі міцності при згині σ^{ts} термічно зміцненого скла на основі двох осереднених параметрів – границі міцності скла σ_0 у вихідному стані і рівня залишкових напружень стиску σ^{res} – за рівнянням

$$\sigma^{ts} = \sigma_0 + k\sigma^{res}, \quad (1)$$

де k – емпіричний коефіцієнт, що враховує вплив інших ефектів термічної обробки скла і формування залишкових напружень у залежності від конструкції та технічного рівня обладнання для термічного зміцнення скловиробів.

Міцність скла у вихідному стані контролюється шляхом випробування на згин зразків скла з урахуванням умов експлуатації та впливу технологічних факторів на ступінь дефектності поверхні виробів. Значно складнішим є питання контролю рівня залишкових напружень σ^{res} і оцінки значення коефіцієнта k для гарантування певного рівня міцності та характеру руйнування термічно зміцнених виробів за режимами обробки HS- і FT-скла в умовах виробництва.

Сучасні стандартні методи виробничого контролю ступеню загартування, які передбачають контроль напружень стиску лише у декількох точках, дають досить приблизну оцінку середнього рівня наведених залишкових напружень у скляних елементах конструкцій і не визначають реального значення напружень стиску σ^{res} біля джерел руйнування – мікротріщин на поверхні скла з урахуванням статистичного розподілу локальних напружень на поверхні елементів за різних режимів їх термічного зміцнення [5, 6, 8].

Фактичний рівень і особливості залежності статистичного розподілу локальних напружень стиску на різних ділянках поверхні термічно зміцненого скла від режимів термічної обробки визначали за допомогою розробленої у TU Delft методики експериментального дослідження залишкових напружень на спеціальних зразках із використанням лазерного інтерферометра Scalp 4 (рис. 5).

Для визначення компонентів двовісного напруженого стану та оцінки їх неоднорідності напруження вимірювали в поздовжньому σ_l^{res} і поперечному σ_t^{res} напрямках орієнтації головки вимірювача. Досліджували зразки інтенсивно загартованого FT-скла розміром $600 \times 400 \times 5$ мм і термозміцненого HS-скла розміром $800 \times 600 \times 4, 6, 8, 10$ та 12 мм. Вимірювання проводили в клітинках розміром 100×100 мм, на які було розбито пластини.



Рис. 5. Вимірювання залишкових напружень стиску σ^{res} у пластині термічно зміцненого скла оптично-поляризаційним методом із застосуванням лазерного інтерферометра Scalp 4.

Установлено значну неоднорідність рівня напружень стиску як для FT-скла, так і для HS-скла (рис. 6). Імовірнісний графік статистичного розподілу Вейбулла залишкових напружень у зразку FT-скла наведено на рис. 6,а. Значення залишкових напружень інтенсивно загартованого скла знаходяться в діапазоні 28,0...112 МПа, їх середнє значення складає 77,8 МПа. Для HS-скла діапазон залишкових напружень для об'єднаної вибірки зразків товщиною 4–12 мм становить 28,4...73,5 МПа (рис. 6,б).

Величини мінімальних та максимальних напружень для термічно зміцненого скла різної товщини, виміряні в поздовжньому σ_l^{res} і поперечному σ_t^{res} напрямках, приведено в табл. 2. Отримано, що середнє значення залишкових напружень $\bar{\sigma}^{res}$ HS-скла є досить стабільним для скла різної товщини.

Представлені на рис. 6,а експериментальні залежності Вейбулла для залишкових напружень FT- і HS-скла є мультимодальними і складаються з трьох частин. Для інтенсивно загартованого FT-скла нижня частина експериментальної кривої відповідає напруженням загартування, що є меншими за 70 МПа, середня – 70...87 МПа, верхня – > 90 МПа. Для HS-скла нижня частина кривої відповідає напруженням < 45 МПа, середня – 45...60 МПа, верхня – > 60 МПа (рис. 6,б).

Для забезпечення надійності елементів більш значимою є нижня частина кривих, яка може бути використана для прогнозування мінімального необхідного рівня залишкових напружень при заданій малій довірчій імовірності руйнування скла.

Для HS-скла довірчій імовірності 0,01 відповідає залишкове напруження стиску $\sigma_{0,01}^{res} = -35$ МПа, що становить близько 70% середнього значення. Для FT-скла $\sigma_{0,01}^{res} = -30$ МПа, що складає приблизно 40% середнього значення. Важливо зазначити, що для обох режимів термічного зміцнення мінімальні значення експериментально отриманих залишкових напружень практично збігаються. Це свідчить, що підвищення інтенсивності процесу загартування не виключає імовірності отримання низьких значень напружень загартування, що може бути пов'язано з технологічними недоліками та недостатнім контролем технічного стану відповідних елементів обладнання.

Таким чином, результати ретельного вимірювання залишкових напружень для обох режимів термічного зміцнення показали, що за відсутності їх постійного виробничого контролю промислове обладнання не забезпечує однорідності розподілу ступеня загартування в окремих локальних ділянках поверхні деталей, а стандартна методика визначення цих напружень за EN нормами дає недостовірну оцінку ступеня зміцнення деталей з листового скла.

Т а б л и ц я 2

Екстремальні напруження для HS-скла різної товщини

Товщина зразка, мм	$\sigma_{l \min}^{res}$, МПа	$\sigma_{l \max}^{res}$, МПа	$\sigma_{t \min}^{res}$, МПа	$\sigma_{t \max}^{res}$, МПа	$\bar{\sigma}^{res}$, МПа
4	37,1	68,4	28,4	64,4	48,7
6	41,4	67,7	31,0	75,3	48,2
8	44,0	64,5	43,1	66,7	52,2
10	29,6	61,5	38,7	61,3	47,1
12	33,4	56,1	35,7	63,6	45,5
Об'єднана вибірка	29,6	68,4	28,4	75,3	48,3

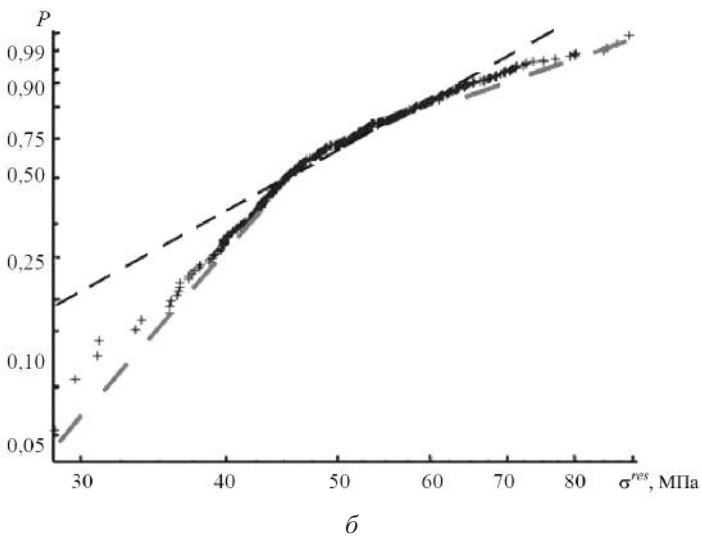
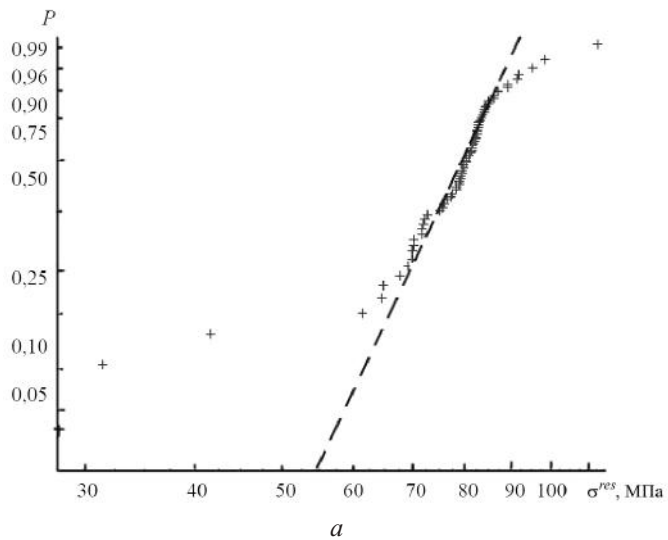


Рис. 6. Мультимодальні залежності Вейбулла для FT- (а) і HS-стекло (б).

Ефект зміцнення скла. Міцність термічно зміцненого скла відповідно до рівняння (1) розглядається як сума опору матеріалу дії напружень розтягу за відсутності залишкових напружень та ефекту зміцнення при термічній обробці і формуванні залишкових напружень загартування σ^{res} . При цьому за характеристику опору матеріалу дії напружень розтягу за відсутності залишкових напружень приймають результати випробувань на міцність вихідного скла до загартування σ_0 . Середнє значення міцності скла після термічної обробки розглядається як сума середньоарифметичних величин вихідної міцності та залишкових напружень. Додатковий вплив від термічної обробки та утворення залишкових напружень певного рівня враховуються експериментально визначеним коефіцієнтом k (1). За результатами випробувань промислового термозміцненого і загартованого скла (табл. 1) та отриманими лінійними залежностями для оцінки середнього рівня його міцності при згині σ_{mean}^{ts} після термозміцнення або загартування на основі середнього рівня міцності у вихідному стані σ_{0mean} було запропоновано експериментально обґрунтоване рівняння [4], що відповідає прямій 1 на рис. 7:

$$\sigma_{mean}^{ts} = 64 + 1,21\sigma^{res}. \quad (2)$$

У цьому рівнянні ефект зміцнення за середніми показниками визначається складовою $1,21\sigma^{res}$, де 1,21 є значенням коефіцієнта k .

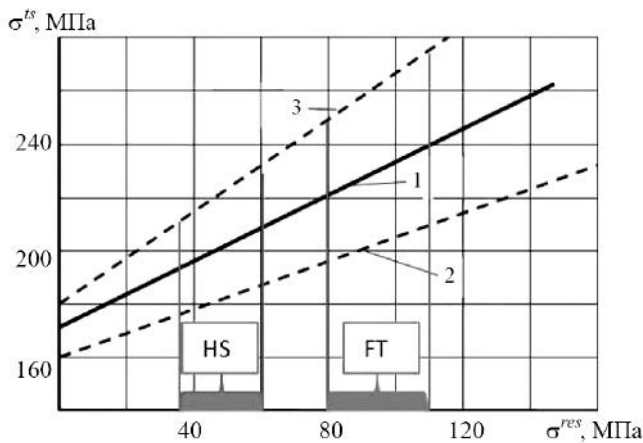


Рис. 7. Експериментальна залежність границі міцності термічно зміцненого скла за режимами HS- ($\sigma^{res} = 35 \dots 60$ МПа) та FT-скла ($\sigma^{res} = 80 \dots 110$ МПа) від залишкових напружень σ^{res} .

Для врахування розкиду результатів випробувань великої кількості зразків різної товщини, отриманих на обладнанні багатьох підприємств, було визначено нижню і верхню границі експериментальних даних, апроксимованих прямими 2 та 3 (рис. 7), які описуються рівняннями

$$\sigma_{min}^{ts} = 40 + 0,9\sigma^{res}; \quad (3)$$

$$\sigma_{max}^{ts} = 80 + 1,8\sigma^{res}, \quad (4)$$

де мінімальне значення міцності скла при згині у вихідному стані сягає 40 МПа, максимальне – 80 МПа. Величина коефіцієнта k , що враховує вплив інших технологічних факторів термічної обробки на міцність термічно зміцненого скла, не є постійною і збільшується удвічі від 0,9 для мінімальних значень імовірності руй-

нування (мінімальний рівень міцності) до 1,8 для максимального рівня імовірності руйнування скловиробів. Коефіцієнт k є вагомим показником якості технологій виробництва загартованого і термозміцненого скла, а також виробів зі спеціальними вимогами щодо рівня залишкових напружень і характеру руйнування склоелементів. Тому визначення цього параметра є актуальним для вдосконалення технологій зміцнення конструкційних елементів зі скла і підвищення ефективності виробів для нової техніки, призначеної для складних та екстремальних умов навантаження.

Для оцінки впливу масштабного фактора та контролю залишкових напружень на механічну поведінку термозміцнених і загартованих елементів із листового скла проводили випробування на поперечний чотириточковий згин зразків товщиною 10 мм типу пластин (300×100 мм), виготовлених з одного листа скла із застосуванням якісного шліфування та полірування краю на спеціалізованому автоматичному обладнанні за промисловими режимами механічної обробки. Зразки випробовували у вихідному відпаленому стані, після термозміцнення та загартування. Малі розміри зразків забезпечують більш однорідний розподіл напружень стиску. Тому їх рівень контролювали у центрі робочої частини кожного зразка приладом Scalp 3. Відстань між нижніми опорами була 270 мм, між верхніми – 90 мм. Результати випробувань показано на рис. 8.

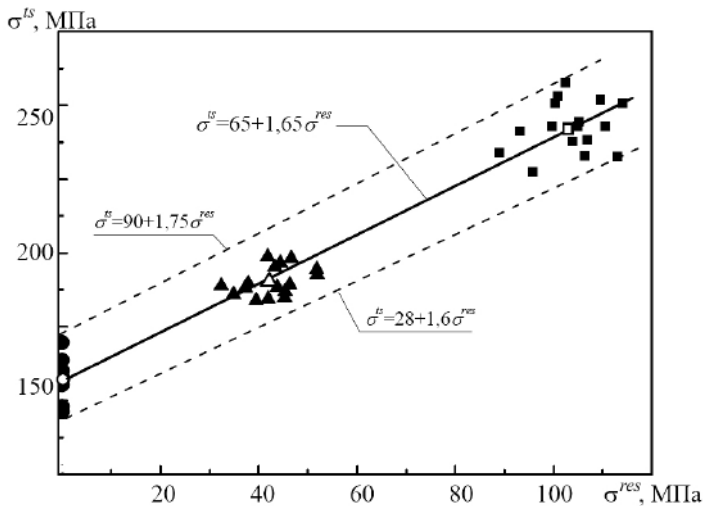


Рис. 8. Експериментальна залежність межі міцності малорозмірних зразків термічно зміцненого скла від залишкових напружень σ^{res} : ● – вихідний стан; ▲ – HS-скло; ■ – FT-скло (○, △, □ – середньоарифметичні значення).

Для зразків скла у вихідному стані середній рівень межі міцності при згині 65 МПа практично збігався з даними для стандартних зразків. Але розсіяння значень збільшилося до 28...90 МПа (різниця 62 МПа). Результати показують, що розкид величин міцності термічно зміцнених зразків менших розмірів також залежить від розсіяння міцності вихідного скла та залишкових напружень. Розкид експериментальних залишкових напружень наближений до результатів, отриманих на стандартних зразках, і складає 30...55 МПа (різниця 25 МПа) для термічно зміцнених зразків і 90...120 МПа (різниця 30 МПа) для інтенсивно загартованих.

Для середніх значень міцності термічно зміцнених зразків експериментальне рівняння лінійної залежності відрізняється від отриманого на основі результатів випробувань стандартних зразків кутом нахилу (рис. 8), тому що коефіцієнт k збільшився на 40% і становить 1,65:

$$\sigma_{mean}^{ts} = 65 + 1,65\sigma^{res}. \quad (5)$$

На рис. 8 штриховими лініями показано нижню і верхню границі експериментальних даних, які апроксимуються відповідно рівняннями:

$$\sigma_{min}^{ts} = 28 + 1,6\sigma^{res}; \quad (6)$$

$$\sigma_{max}^{ts} = 90 + 1,75\sigma^{res}, \quad (7)$$

де мінімальне значення міцності скла при згині у вихідному стані $\sigma_0 = 28$ МПа, максимальне – 90 МПа. Результати свідчать про те, що ефект термічного зміцнення малорозмірних елементів є значно більшим. Причиною цього може бути підвищення фактичної інтенсивності охолодження повітрям середньої частини поверхонь таких виробів за рахунок наближення до крайового ефекту, який полягає в тому, що значення залишкових напружень на краях є більшими, ніж у центрі пластин. Розкид значень границі міцності малих термозміцнених зразків зменшився у 2,5 раза – до 30 МПа (120...150 МПа), і для загартованих зразків становить 70 МПа (200...270 МПа) замість 120 МПа для стандартних. Отримані результати для однієї лінії загартування показали, що масштабний фактор і нестабільність режимів термічного зміцнення на технологічному обладнанні різних виробників призводять до значної невизначеності реальних параметрів міцності скловиробів, яка у значній мірі зумовлена також відсутністю виробничого контролю залишкових напружень сучасними лазерними приладами. Збільшення коефіцієнта k з 1,6 для мінімальних значень міцності термічно зміцненого скла до 1,75 для максимальних підтверджує статистичну залежність ефекту термічного зміцнення, визначеного при аналізі результатів випробувань стандартних зразків (рис. 7).

Таким чином, установлені емпіричні рівняння свідчать, що для врахування статистичної природи міцності скла при оцінці роботоздатності елементів конструкцій з термічно зміцненого скла необхідно, в залежності від ступеня їх відповідальності та вимог щодо безпеки, визначати фактичну границю міцності виробів з урахуванням заданої імовірності їх руйнування в певних умовах навантаження.

Ефект зміцнення скла при загартуванні оцінювали з урахуванням статистичної природи його міцності. Для цього на основі експериментальних результатів (об'єднані вибірки об'ємом 52 значення), отриманих при випробуваннях в умовах вісесиметричного згину на устаткуванні ZD-40, для границі міцності зразків зі скла розмірами $80 \times 80 \times 4$ мм, $120 \times 120 \times 6$ мм, $160 \times 160 \times 8$ мм, $200 \times 200 \times 10$ мм, $240 \times 240 \times 12$ мм після інтенсивного загартування та у вихідному стані побудовано криві розподілу за нормальним законом (на рис. 9 криві 1, 3) та за Вейбуллом (криві 2, 4) величин міцності загартованого скла (криві 1, 2) та у вихідному стані (криві 3, 4). Для вибірок значень скла у вихідному стані та інтенсивно загартованого середнє значення границі міцності $\bar{\sigma}_0 = 67$ МПа, $\bar{\sigma}^{ts} = 182$ МПа. Порівняння кривих розподілу свідчить, що для вибірок, які розглядаються, розподіл за Вейбуллом наближається до нормального.

Експериментальні значення міцності при згині загартованого скла та у вихідному стані позначимо як випадкові величини X, Y . Нехай відомою є щільність розподілу $X, Y: f(x), f(y)$.

Різниця між цими величинами $Z = X - Y$ являє собою “ефект зміцнення”.

Функція розподілу Z має вигляд

$$G(z) = \iint_{(D)} f(x)f(y)dx dy, \quad (8)$$

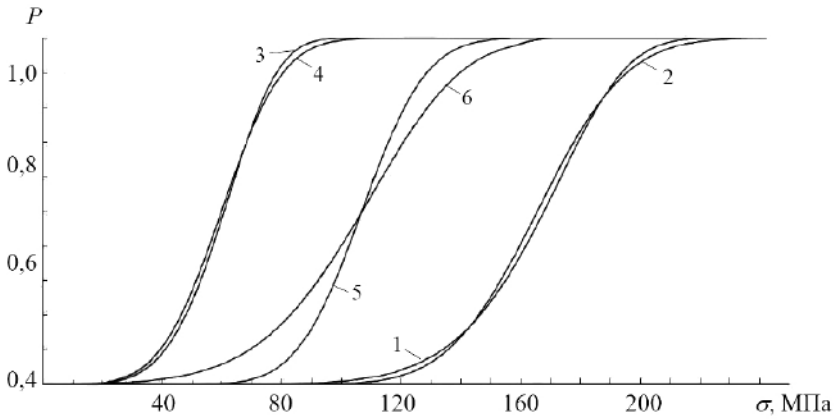


Рис. 9. Криві статистичного розподілу міцності загартованого скла за нормальним законом (1), за Вейбуллом (2) та скла у вихідному стані за нормальним законом (3), за Вейбуллом (4), а також розрахунковий розподіл напружень, що характеризують ефект зміцнення (5 – композиція (різниця) нормального розподілу; 6 – композиція (різниця) розподілу Вейбулла).

де область інтегрування D – півплощина над прямою $y = x - z$ у декартовій системі координат;

$$G(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{x-z}^{+\infty} f(x)f(y)dx dy = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \left(\int_{x-z}^{+\infty} f(y)dy \right) dx; \quad (9)$$

$$\int_{x-z}^{+\infty} f(y)dy = F(y) \Big|_{x-z}^{+\infty}; \quad (10)$$

$F(y)$ – функція розподілу випадкової величини Y .

За умови, якщо величини X та Y описуються нормальним законом, випадкова величина $Z = X - Y$ згідно з властивістю стійкості нормального розподілу також розподілена за нормальним законом. Параметри цього закону – математичне очікування та дисперсія – знаходяться за теоремою про додавання математичних очікувань m та дисперсій D .

Середньоквадратичне відхилення

$$S_z = \sqrt{S_x^2 - S_y^2}. \quad (11)$$

Якщо випадкові незалежні величини X та Y розподілені за законом Вейбулла, то з урахуванням (8), (9) функція розподілу випадкової величини Z має такий вигляд:

$$\begin{aligned} G(z) &= \int_0^{+\infty} \left[\frac{\delta}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{\delta-1} e^{-(x/\lambda)^\delta} \right] \left[1 - e^{-(x/\lambda_1)^{\delta_1}} \Big|_{x-z}^{+\infty} \right] dx = \\ &= \int_0^{+\infty} \left[\frac{\delta}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{\delta-1} e^{-(x/\lambda)^\delta} \right] e^{-[(x-z)/\lambda_1]^{\delta_1}} dx, \end{aligned} \quad (12)$$

де λ, λ_1 – коефіцієнти масштабу; δ, δ_1 – коефіцієнти форми для розподілу Вейбулла випадкових величин X і Y відповідно.

Враховуючи, що, на відміну від нормального закону, закон розподілу за Вейбуллом не є стійким, отримана функція розподілу не є функцією розподілу Вейбулла.

Розрахунковий розподіл напружень, що описують ефект зміцнення загартованого скла, ілюструють криві 5, 6 на рис. 9. При визначенні мінімальних та максимальних значень рівня ефекту зміцнення різниця між результатами, отриманими за обома розподілами, є суттєвою. Так, при довірчій імовірності 0,05 мінімальна величина ефекту зміцнення за умови розподілу за нормальним законом становить 80 МПа, за законом із функцією розподілу (12) – у 1,4 раза менша. Для відповідальних виробів зі зменшенням довірчої імовірності до 1% ефект зміцнення сягає близько 40 МПа для функції розподілу (12) та 70 МПа для розподілу за нормальним законом.

Аналіз досліджень, пов'язаних із визначенням ефекту зміцнення, показав, що він може перевищувати рівень залишкових напружень. Статистична природа міцності скла та залишкові напруження зумовлюють суттєві труднощі при визначенні коефіцієнта k у формулі (1). До того ж невизначеність факторів, що створюють цей ефект, потребує додаткових уточнень.

Застосування рівняння (1) передбачає, що в процесі навантаження зусиллями розтягу спочатку відбувається компенсація цих зусиль залишковими напруженнями стиску, помноженими на коефіцієнт k , а граничний стан при подальшому зростанні експлуатаційних напружень розтягу визначається міцністю вихідного скла.

При термічному зміцненні скла його структура, фізико-механічний стан і ступінь дефектності поверхневих шарів зазнають суттєвих і невизначених змін. На сьогодні немає експериментальних методів оцінки дійсного рівня опору руйнуванню при напруженнях розтягу термічно зміцненого скла σ^{fs} . Для його визначення рівняння (1) не є придатним. Рівень залишкових напружень вимірюється сучасними лазерними приладами. Тому для оцінки можливостей додаткового підвищення міцності скляних елементів за рахунок комбінованих технологій на основі термічного зміцнення скла, які включають, наприклад, операції зменшення дефектності його поверхні, рівняння (1) може бути записано у наступному вигляді, що дає можливість урахування ефектів деградації або додаткового підвищення опору руйнуванню при згині та розтязті скляних елементів конструкцій при робочих напруженнях, вищих за σ^{res} :

$$\sigma^{ts} = \sigma^{fs} + \sigma^{res}, \quad (13)$$

де σ^{fs} – границя міцності термічно зміцненого скла, яка при напруженнях розтягу може бути меншою або більшою за міцність вихідного скла.

Для розрахунку σ^{fs} пропонується рівняння

$$\sigma^{fs} = \psi \sigma_0 \left(1 + \frac{\beta \sigma^{res}}{\psi \sigma_0} \right), \quad (14)$$

де σ_0 – границя міцності скла у вихідному стані (у стані постачання); ψ – коефіцієнт зміцнення зразків механічним або хімічним способом; β – коефіцієнт ефективності термічного зміцнення.

Комбіноване зміцнення скла. Підвищення міцності елементів зі скла досягається зменшенням його поверхневої дефектності [7]. За рахунок шліфування й якісного полірування границя міцності при вісесиметричному згині малорозмірних зразків із листового скла товщиною 2,5 мм може бути підвищена у середньому до 200 МПа при розсіянні в діапазоні 150...400 МПа. Шляхом травлення у звичайних умовах без надійного захисту поверхні скла від пошкоджень міцність при вісесиметричному згині може бути підвищена у середньому до 500 МПа. При цьому дуже суттєво збіль-

шується нестабільність результатів. Мінімальне значення міцності становить 100 МПа, максимальне – 1500 МПа. За рахунок спеціальних технологій травлення та захисту поверхонь зразків від абразійних пошкоджень середній рівень міцності при згині було підвищено до 2300 МПа і зменшено розсіяння результатів з 1400 до 1000 МПа зі значним підвищенням мінімальних (1700 МПа) та максимальних (2700 МПа) значень [9]. Таким чином, застосування високоміцного скла з коефіцієнтом впливу додаткової обробки $\psi = 10$ і більше може бути порівнюваним із рівнем напружень стиску і навіть суттєво перевищувати його при комбінованих технологіях модифікації скла на основі процесів загартування.

Комбіновано зміцнене скло широко використовується у багатошарових блоках ударостійкого скла при динамічному локальному навантаженні. Щоб оцінити ступінь зміцнення пластин флоат скла різної товщини при локальному навантаженні і різних методах зміцнення скловиробів, досліджували характеристики міцності зразків скла товщиною 5–10 мм в умовах вісесиметричного згину. Випробовували зразки листового скла розмірами 120×120×5 мм, 160×160×6 мм, 180×180×8 мм, 200×200×10 мм у вихідному стані, після різних способів та режимів зміцнення (термообробка, травлення, комбінації термообробки та травлення). Використовували по 10 зразків кожного з типів. Випробування проводили на устаткуванні ZD-40. Для врахування особливостей локального характеру експлуатаційного навантаження радіус верхнього пуансона обирали таким чином, щоб навантаження було максимально локалізованим, а саме $r = 7,5$ мм. Радіус нижньої кільцевої опори дорівнював 15–50 мм у залежності від товщини пластин. Максимальні напруження двовісного розтягу при згині знаходились у межах центральної частини зразків під верхнім пуансоном. На рис. 10 наведено мінімальні, середні та максимальні значення границі міцності при згині, отримані за результатами випробувань на вісесиметричний згин скляних пластин різних номіналів із поверхневою модифікацією.

Середня величина границі міцності скла при згині у вихідному стані при локальному навантаженні становить 120 МПа, що у 1,85 раза більше, ніж в умовах поперечного чотириточкового згину зразків скла розміром 300×100×10 мм. Діапазон розсіяння становить 110...131 МПа. Коефіцієнт зміцнення у формулі (14) складає $\psi = 1,85$.

Установлено, що рівень загартування зразків різної товщини не є постійним. Це вказує на те, що термічне зміцнення зразків реалізовано за різними режимами. Рівень залишкових напружень з урахуванням особливостей термічної обробки зразків у залежності від їх товщини орієнтовно оцінювали за рівнянням (1). Середньоарифметичне значення їх границі міцності при згині коливалося від 132 МПа для скла товщиною 10 мм, що характерно для мінімальних значень HS-скла (рис. 8), до 235 МПа для скла товщиною 8 мм, що відповідає мінімальним значенням інтенсивно загартованого FT-скла. Враховуючи, що розміри зразків є значно меншими, ніж стандартних, і порівнюваними із зразками розміром 300×100×10 мм, за основу розрахунків σ^{res} приймали експериментальну залежність границі міцності малорозмірних зразків термічно зміцненого скла від залишкових напружень (на рис. 8), значення коефіцієнта $k = 1,65$ та рівняння

$$\sigma^{res} = (\sigma^{ts} - \sigma_0) / k. \quad (15)$$

Отримано наступні значення σ^{res} : для зразків скла товщиною 5 мм – 27 МПа, 6 мм – 57 МПа, 8 мм – 72 МПа. Рівень загартування зразків товщиною 10 мм був низьким і не перевищував 13 МПа.

Зміцнення скла шляхом зменшення дефектності поверхні було отримано за рахунок хімічного видалення поверхневого тріщинуватого шару. Ефект зміцнення зменшувався при збільшенні товщини флоат скла. Найбільш значний ефект зміцнен-

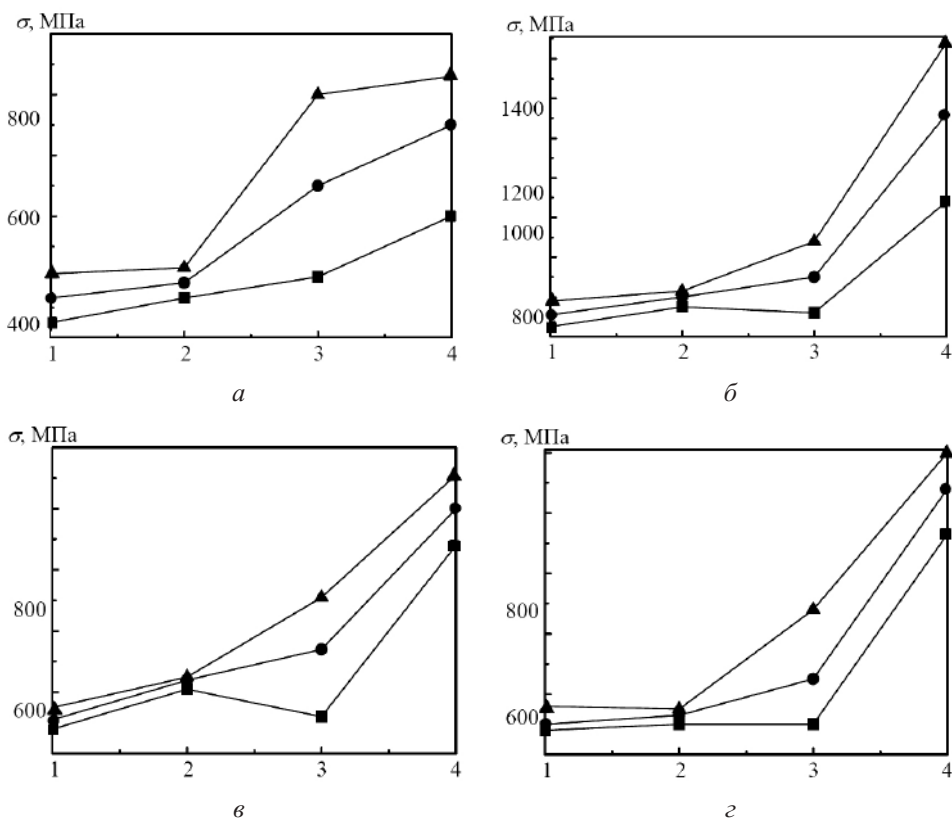


Рис. 10. Експериментальні діаграми міцності при згині флоат скла товщиною 5 (а), 6 (б), 8 (в) і 10 мм (г) у вихідному стані та зміцненого за різними технологіями: ■ – мінімальні значення; ● – середні; ▲ – максимальні. (На вісі абсцис цифри відповідають стану зразків: 1 – вихідний; 2 – після термічного зміцнення; 3 – після хімічного травлення поверхонь скла; 4 – результат комбінованої обробки шляхом термічного зміцнення і хімічного травлення.)

ня отримано на зразках скла товщиною 5 мм. Середні значення границі міцності на кільцевий згин становлять 484 МПа, мінімальне – 210 МПа, максимальне – 800 МПа. Для зразків товщиною 5 та 6 мм середні значення міцності зменшилися у 1,7 та 1,3 рази і становлять 303 та 344 МПа. Ефективність хімічного зміцнення скла товщиною 10 мм була ще меншою, середні значення границі міцності сягає 254 МПа. Отримано стійку закономірність зменшення мінімальних значень границі міцності з 210 до 100 МПа. Ці результати свідчать, що комбінована технологія, яка включає технологічні операції хімічного травлення та термічного зміцнення, може сприяти додатковому підвищенню міцності скла.

Результати випробування зразків скла всіх номіналів, зміцнених за комбінованою технологією, показують, що їх міцність значно підвищується: середня величина границі міцності скла товщиною 5 мм із комбінованою обробкою збільшилась відносно вихідної міцності в 4 рази, товщиною 6 мм – в 5,6 рази, товщиною 8 мм – в 3,4 рази, товщиною 10 мм – в 6,6 рази порівняно із загартованим склом (рис. 10). Максимальне значення границі міцності скла, зміцненого комбінацією технологій травлення і загартування, має місце для скла товщиною 6 мм (~1,5 ГПа). Зіставлення ступеня міцності комбінованого зміцнення скла зі ступенем міцності травленого скла показує, що основу отриманого ефекту складають не залишкові напруження стиску, які у досліджених зразках за величиною не перевищують вимоги до HS-скла, а значні

і недостатньо визначені зміни механічного стану поверхневого шару склоелементів, що більш ефективно підвищують міцність скла при дії напружень розтягу в умовах локалізованого навантаження. Виявлено, що вплив комбінованої обробки на границю міцності зразків скла усіх товщин є неадитивним: сумарний ефект від застосування двох технологій зміцнення перевищує такий від кожного окремо. Установлено, що внаслідок недостатнього контролю режимів зміцнення на окремих технологічних операціях отримані результати мають значний розкид, що потребує поетапного виробничого контролю міцності для забезпечення необхідної якості виробів.

Проведені дослідження свідчать про необхідність уточнення впливу на міцність елементів комплексу визначальних факторів конструкційної міцності скла (ступінь поверхневої дефектності, статистична природа міцності, зміна рівня дефектності і фізико-механічних характеристик поверхневого шару при технологічних операціях термічного зміцнення, масштабний фактор та рівень і характер статистичного розподілу залишкових напружень стиску).

Висновки

1. Конструкційна міцність термічно зміцненого скла у виробках нової техніки, призначених для експлуатації в умовах, коли напруження розтягу при статичному і динамічному навантаженні є невід'ємною частиною їх напруженого стану, може бути суттєво підвищена за рахунок розвитку сучасних технологій загартування скла у комбінації з іншими способами модифікації його поверхні.

2. Застосування методик детального виробничого контролю залишкових напружень лазерними інтерферометрами дає можливість підвищити якість виробів із термічно зміцненого скла, зменшити діапазон розсіяння границі міцності при згині та оптимізувати режими загартування згідно із спеціальними вимогами до будівельного скління і виробів нової техніки щодо рівня залишкових напружень і характеру руйнування у складних та екстремальних умовах експлуатації.

3. Установлено, що підвищення міцності загартованого скла і виробів, зміцнених за комбінованими технологіями, супроводжується суттєвим збільшенням розкиду величин границі міцності, а вплив комбінованої обробки на величину границі міцності скла є неадитивним.

4. Аналіз значної кількості результатів експериментальних досліджень та використання методів математичної статистики при визначенні ефекту зміцнення термічно обробленого скла показують необхідність подальших досліджень щодо впливу визначальних факторів на його міцність.

5. Запропоновано враховувати особливості зміни границі міцності при напруженні розтягу елементів із термічно зміцненого скла за рахунок вкладу залишкових напружень та впливу термічної обробки і спеціальних технологій модифікації його поверхневого шару на фізико-механічний стан відносно вихідного скла при визначенні міцності і ресурсу конструкцій нової техніки.

Резюме

Рассмотрены определяющие факторы конструкционной прочности термически упрочненного стекла. С помощью лазерного интерферометра Scalp 4 экспериментально определены величины остаточных напряжений в разных областях поверхности образцов для термически упрочненных HS- и FT-стекел. Определено распределение остаточных напряжений по площади образцов. Показано, что стандартные методы производственного контроля степени закалки, которые предусматривают определение напряжений сжатия только в нескольких точках, позволяют примерно оценить средний уровень приведенных остаточных напряжений в стеклянных элементах конст-

рукций и недостаточны для определения их реальных значений в местах разрушения. Обоснована необходимость применения методик более детального производственного контроля остаточных напряжений для получения их статистического распределения и оптимизации технологии термического упрочнения согласно специальным требованиям к строительному остеклению и изделиям новой техники. Анализ исследований, связанных с определением “эффекта упрочнения” при термической обработке стекла, показал, что он превышает уровень остаточных напряжений сжатия. Вследствие статистической природы прочности стекла и остаточных напряжений определение эмпирического коэффициента учета вклада напряжений сжатия в величину прочности термически упрочненного стекла связано со значительными трудностями. На основе выборок значений предела прочности при изгибе стекла в исходном и термически упрочненном состоянии методами математической статистики определено расчетное распределение величин напряжений, характеризующих эффект упрочнения. Исследовано влияние комбинации термического упрочнения и травления на прочность стекла. Установлено, что повышение прочности стекла и изделий из него, упрочненных на основе комбинированных технологий, сопровождается существенным увеличением разброса величин предела прочности, а влияние комбинированной обработки на предел прочности стекла является неадитивным.

1. Писаренко Г. С. Избранные труды. Под ред. В. Т. Трошенко. Киев: Наук. думка, 2010. 728 с.
2. EN 12150-2. Glass in Building – Thermally Toughened Soda Lime Silicate Safety Glass. Part 2: Evaluation of Conformity/Product Standard. London: BSI, 2004. 42 p.
3. Bos F. The Integrated Approach to Structural Glass Safety Applied to Glass Beams. Challenging Glass 2. F. Bos, C. Louter, F. Veer (Eds.). Zutphen: WPS, 2010. P. 297–308.
4. Schiavonato M., Mognato E., and Redner A. S. Stress measurement, fragmentation and mechanical strength. Glass Processing Days. Tampere: Tamglass Ltd, 2005. P. 92–95.
5. Mognato E., Brocca S., and Comiati F. Which is the right reference surface compression value for heat treated glass. Challenging Glass 6. C. Louter, F. Bos, J. Belis, et al. (Eds.). 2018. P. 703–712. <https://doi.org/10.7480/cgc.6>.
6. Veer F. A. and Rodichev Y. M. The relation between pre-stress and failure stress in tempered glass. Challenging Glass 4 and COST Action TU0905 Final Conference. C. Louter, F. Bos, J. Belis, J.-P. Lebet (Eds.). Leiden: CRC Press, 2014. P. 731–738.
7. Veer F. A. and Rodichev Y. M. Improving the engineering strength of heat strengthened glass. *Heron*. 2016. **61**, No. 2. P. 121–138.
8. Nielsen J. H. Experimental investigation of residual stresses in toughened glass. Challenging Glass 1. F. Bos, C. Louter, and F. Veer (Eds.). Amsterdam: Delft University Press, 2008. P. 387–398.
9. Бартєнев Г. М. Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стекла. М.: Стройиздат, 1974. 240 с.

Поступила 03. 07. 2018