

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ

¹Ю. Родічев, ¹О. Сорока, ²О. Шабетя

¹Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України;

²Інститут прикладного системного аналізу НТУУ «КПІ»

Abstract. The subject area "structural strength of materials" is defined as a complex of strength characteristics of materials and structures, taking into account physical and mechanical properties of the material, the methods of its production, blank processing, purpose, shape and size of elements, operating conditions. To determine the structural strength of brittle materials the technical approach is developed.

Вступ. Визначення гарантованого рівня міцності та опору руйнуванню конструкцій стикається з проблемою, що характеристики міцності, які надаються в довідковій літературі, не завжди відповідають настанню фактичного граничного стану конструкції. Ця проблема набуває особливого значення з появою нових складних конструкцій та застосуванням як конструкційних нетрадиційних матеріалів та композитних структур. Завдяки прогресу у технологіях виробництва, крихкі матеріали типу скла та кераміки все ширше використовуються у силових будівельних конструкціях, машинобудуванні, авіаційній і військовій техніці. Тому актуальним є розвиток наукових засад їх конструкційної міцності з урахуванням особливостей механічної поведінки у різних умовах навантаження та впливу визначальних факторів, що можуть значно і часто непередбачувано змінювати опір руйнуванню та надійність відповідальних виробів. На прикладі розвитку робіт в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України видно, що проблема забезпечення міцності конструкції є комплексною і, за своєю природою, потребує застосування методів експериментальної механіки. Тому велику увагу було приділено створенню унікальної експериментальної бази для досліджень міцності матеріалів в різноманітних умовах, характерних для реальних конструкцій та розроблено методи дослідження їх граничного стану.

80-і роки минулого сторіччя характеризуються виникненням нової предметної області – конструкційної міцності матеріалів. В роботі Фрідмана Я. Б. (1974) зазначається, що невідповідність між середнім стандартним значенням границі міцності металів на розрив і конструкційної міцністю як максимальним опором, реалізованим в конструкції, зазвичай пояснюється впливом трьох груп факторів: технологічних, конструкційних і експлуатаційних [1]. Цей підхід до поняття «конструкційної міцності» використано в роботі колективу авторів під керівництвом академіка Новікова Н. В. «Конструкционная прочность при низких температурах» (1979) [2]. Того ж року виходить монографія колективу авторів на чолі з академіком Писаренко Г. С. «Конструкционная прочность стекол и ситаллов» [3], в якій розглянуто комплекс закономірностей механічної поведінки скла, ситалів та інших крихких матеріалів при різних видах напруженого стану та несівна здатність оболонок при дії зовнішнього тиску. Остаточне формування і понятійний апарат предметної області «Конструкційна міцність матеріалу» знаходяться в процесі розвитку. Особливістю цієї предметної області є необхідність системного підходу, який включає комплексну оцінку матеріалів та елементів конструкцій. Значення кожного з факторів, що становлять предметну область «конструкційна міцність» для крихких матеріалів значно і в невизначений спосіб зростає. Це пов'язано з принциповими відмінностями цього класу матеріалів, а саме: лінійною пружністю; чутливим до мікроскопічних дефектів на поверхні та в об'ємі граничним станом; тим, що критичний розмір дефектів для конструкцій із крихких матеріалів на декілька порядків менше за розміри критичних тріщин в металевих конструкціях; значно більшим опором руйнуванню напруженням стиску, ніж розтягу;

статистичною неоднорідністю результатів випробувань на міцність; неможливістю шляхом застосування поправочних коефіцієнтів визначити величину конструкційної міцності та гарантувати її введенням коефіцієнту запасу міцності, коли за базове значення характеристики міцності беруть дані виробника або довідкової літератури. Внаслідок цього для крихких матеріалів відсутні гарантовані виробниками значення характеристик конструкційної міцності.

Мета роботи – визначення предметної області «конструкційна міцність крихких матеріалів» та розвиток технічного підходу для вирішення наукових та технічних задач, пов'язаних із забезпеченням конструкційної міцності технічного скла.

Основна частина. За визначенням академіка Г. С. Писаренка «Під конструкційною міцністю того чи іншого матеріалу слід розуміти здатність матеріалу, з якого виготовлено певні елементи конструкції відповідної форми та розмірів, чинити опір зовнішньому впливу» [4]. Це визначення є універсальним для всіх класів матеріалів і становить предметну область, концептуальний граф якої зображено на рисунку 1. З визначення та рисунку випливає, що конструкційна міцність матеріалу залежить не тільки від його фізико-механічних властивостей, а й від способу його виробництва, обробки заготовки, призначення, форми, розмірів елемента, умов експлуатації: термосилового навантаження, часу, середовища. З метою оцінки та гарантування конструкційної міцності необхідним є ланцюг випробувань (рис. 1): від тестування малорозмірних зразків до натурних випробувань.

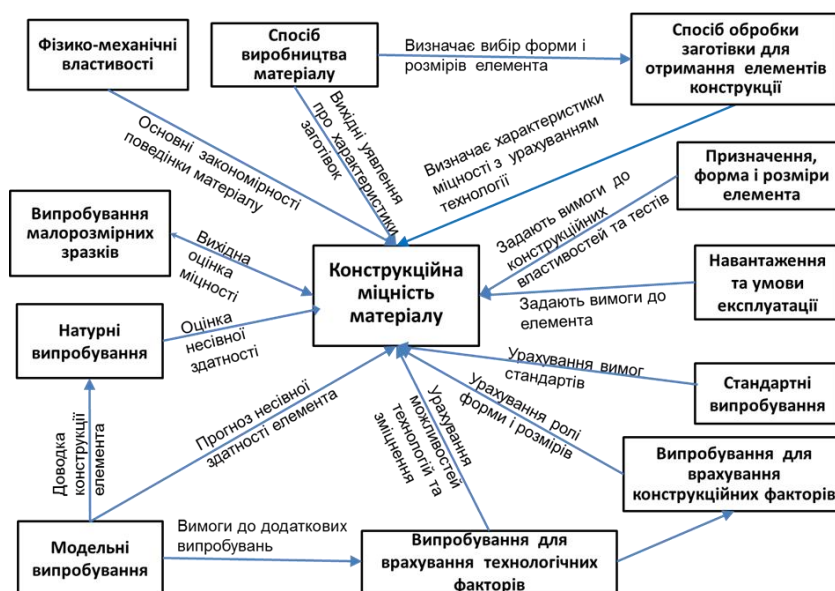


Рисунок 1 Концептуальний граф предметної області "Конструкційна міцність матеріалу"

Продовження цитати Г. С. Писаренка стосується крихких матеріалів: «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 напруженню стиску». Така постановка питання передбачала, що, внаслідок крихкості та низької міцності скла при розтягу і надзвичайно високої міцності при стиску, його застосування як специфічного конструкційного матеріалу є перспективним для таких конструкцій, де, за рахунок умов експлуатації або застосування комплексу спеціальних технічних рішень, забезпечено роботу при напруженні стиску [3, 5]. Ця ідея була ефективно реалізована при створенні різного роду оболонок для глибоководних засобів, що працюють при високому всебічному гідростатичному тиску. Розширення області застосування крихких матеріалів, обумовлене прогресом в сфері технологій їх виготовлення, потребує розвитку положень конструкційної міцності для багатьох інших умов навантаження, у тому числі, коли напруження розтягу при

статичному і динамічному навантаженні є невід'ємною частиною напруженого стану. Конструктивні елементи із скла та композитні конструкції на основі скла все ширше застосовуються в сучасній архітектурній практиці як несівні. Інтенсифікація режимів експлуатації сучасних літальних апаратів також висуває підвищені вимоги до характеристик міцності елементів авіаційного скління, що працюють в умовах складного напруженого стану, коли граничний стан визначається переважно напруженнями розтягу. Сучасні умови визначають також необхідність створення систем прозорого бронювання на основі зміцненого скла, здатного забезпечити стійкість в умовах інтенсивного ударного навантаження.

Основи технічного підходу до оцінки та гарантування конструкційної міцності крихких матеріалів закладено в роботах [6-9]. Основними компонентами підходу є фундаментальні основи конструкційної міцності крихких матеріалів, чітке уявлення про конструкцію та умови її експлуатації, тип матеріалу та технології його виготовлення, експериментальна база для вирішення наукових та технічних завдань, аналіз основних факторів, що впливають на механічну поведінку матеріалу, проведення сукупності наукових досліджень та розробок для обґрунтування рекомендацій щодо конструювання, технології вироблення та обробки, а також правил експлуатації. Особливості такого підходу розглянуто на нижченаведених прикладах.

Розглянемо оцінку конструкційної міцності архітектурного листового скла в будівельних елементах типу балок з довжиною 6м та більше, для яких критичною є достовірна оцінка конструкційної міцності з урахуванням масштабно-технологічних факторів, рівня дефектності скла та статистичних характеристик. Запропоновано, поряд з випробуваннями традиційних малорозмірних зразків, дослідити особливості граничного стану на зразках, розміри яких наближені до реальних конструкцій. Випробовували пластини флоат-скла завтовшки 8мм, з розмірами 3,21м x 0,32м; 1,6м x 0,16м; 0,8м x 0,08м; 0,4м x 0,04м при вертикальному положенні, що дозволяє врахувати всі можливі критичні дефекти та торцевих та бокових поверхнях краю. Довжина робочої зони зразків $l = 0,1125\text{м} \dots 0,9\text{м}$. На рисунку 2 показано серію узагальнених кривих статистичного розподілу Вейбула значень міцності, при випробуванні на згин.

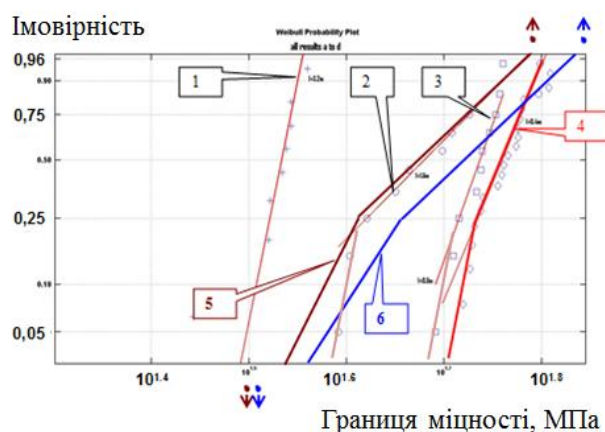


Рисунок 2 Залежності Вейбулла для результатів оцінки конструкційної міцності листового флоат-скла в умовах згину (вертикальна позиція) з урахуванням впливу ефекту масштабу, технологічних факторів та способу навантаження: різання роликком: 1 – $l=0,9\text{м}$; 2 – $l=0,45\text{м}$; 3 – $l=0,225\text{м}$; 4 – $l=0,1125\text{м}$; різання алмазним різачком: 5 – $l=0,175\text{м}$ (різана кромка ліворуч); 6 – $l=0,175\text{м}$ (різана кромка праворуч)

Аналіз результатів показав, що крива 1 для найкрупніших елементів більш реально характеризує механічну поведінку великогабаритних будівельних конструкцій, де статистична імовірність утворення грубих дефектів і отримання низького рівня міцності є більш значною. При довірчій імовірності руйнування менше, ніж 5%, мінімальне значення міцності на згин 27 МПа, що значно менше міцності малих зразків з довжиною зони чистого

згину 112,5мм (крива 4, границя міцності 49 МПа). Показано, що технологія виготовлення менших зразків (криві 3, 4) знижує дефектність, що відображається у підвищенні середніх значень границі міцності для малих зразків до 57,8 МПа порівняно з 33,6МПа для зразків довжиною 3,21м. Це вказує на наявність значних резервів з оптимізації технологічних режимів оброблення. Отримано, що технологія розрізання листового скла алмазним різакром є менш ефективною, ніж твердосплавним роликром (криві 5 і 6): зменшуються середній та мінімальний рівні міцності (до 45 МПа та 35 МПа при ймовірності руйнування 5%). Доведено, що традиційне застосування середніх величин границі міцності для оцінки несівної здатності є неприпустимим, а суто статистичний підхід щодо врахування масштабного фактору при визначенні міцності великогабаритних деталей є недостатнім.

Особливості реалізації запропонованого підходу для авіаційного скління розглянуто на прикладі оцінки конструкційної міцності скління кабіни гвинтокрила МИ-28. Випробування на міцність при вісесиметричному згині електрообігрівної пластини скління дозволили виявити недостатній рівень зміцнення скла. Встановлено, що границя міцності на згин становить 62,5 МПа, що мало відрізняється від рівня міцності скла 5 мм у вихідному стані. Незначний рівень залишкових напружень стиску підтверджується також порівнянням характеру руйнування зразка з вихідного скла 5 мм завтовшки та конструкційного елемента гвинтокрилу. З використанням спеціальної методики мікрофрактографічного дослідження джерела руйнування – поверхневої мікротріщини встановлено, що фактичний рівень залишкових напружень цього елемента електрообігрівного скла не перевищував 20 МПа. Отримані результати показують нагальну потребу впровадження методів експериментальної механіки з оцінки якості технологічного зміцнення на стадії виготовлення та визначення залишкової конструкційної міцності відповідальних елементів скління після тривалої експлуатації.

Висновки. Проведений аналіз та отримані результати дозволяють визначити предметну область «конструкційна міцність матеріалів» як комплекс характеристик міцності матеріалів та конструкцій, що залежить не тільки від фізико-механічних властивостей матеріалу, а й від способу його виробництва, подальшої обробки заготовки, призначення, форми, розмірів елемента, умов експлуатації: термосилового навантаження, часу, середовища. Для оцінки та гарантування конструкційної міцності необхідним є ланцюг випробувань: від тестування малорозмірних зразків до натурних випробувань. Предметна область «конструкційна міцність крихких матеріалів» значно відрізняється тим, що потребує комплексного врахування крихкого характеру руйнування та переважного впливу на міцність мікророзмірних поверхневих дефектів типу тріщин технологічного та експлуатаційного походження.

Список використаної літератури

1. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов: в 2-х ч. / Фридман Я.Б. – М.: Машиностроение, 1972. – 368с.;
2. Новиков Н.В. Конструкционная прочность при низких температурах / Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Ульянов А.П. – Киев: Наук. думка, 1979. – 232 с.;
3. Конструкционная прочность стекол и ситаллов / [Писаренко Г.С., Амелянович К.К., Козуб Ю.И., Родичев Ю.М. и др.] – Киев: Наукова думка, 1979. – 281с.;
4. Писаренко Г.С. Избранные труды / Отв. Ред. В. Т. Трощенко. – Киев: Наук. думка, 2010. – 727с.;
5. Прочные оболочки из силикатных материалов / [Писаренко Г.С., Амелянович К. К., Козуб Ю. И. и др.] – Киев: Наук. думка, 1989. – 224с.;
6. Родичев Ю.М. Конструкционная прочность хрупких неметаллических материалов / Ю.М. Родичев // Прочность материалов и конструкций / Под ред. В.Т. Трощенко – Киев: Академперіодика, 2005. – С. 955-992.;
7. Rodichev Yu. State of surface and Structural Strength of Glass / Yu. Rodichev, F.A. Veer // “Engineered Transparency” Int. Conf. at Glasstech.-Dusseldorf. – 2010. – P. 93 – 99.;
8. Rodichev Yu. Fracture resistance, surface defects and structural strength of glass / Yu. Rodichev, F.A. Veer // Challenging Glass 2 – Conference on architectural and structural application of glass. – 2010. – P.363 – 373.;
9. Surface Defects and Statistical Characteristics of Glass Strength / Yu. Rodichev, Yu. Evplov, O. Soroka, et. al. // Challenging Glass 3- Conference on Architectural and Structural Applications of Glass Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology, Delft, Netherland, June 2012. – IOS Press , 2012 –P. 535 – 552.