

**МЕТОДИКА ЗМІЦНЕННЯ ВИРОБІВ ІЗ СКЛА ЗА ДОПОМОГОЮ
СТВОРЕННЯ ОБЛАСТЕЙ НАПРУЖЕНЬ СТИСКУ**

**THE STRENGTHENING TECHNIQUE OF GLASS PRODUCTS
BY CREATING AREAS OF COMPRESSION STRESS**

Смоляр А.М., к.т.н., доц., Мірошкіна І.В., к.т.н., доц. (Черкаський державний технологічний університет, Черкаси)

Smoliar A.M., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Miroschkina I.V., Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Cherkasy State Technological University, Cherkasy)

Розроблено методику зміцнення конструктивних елементів із оптичного скла за допомогою обробки електронним променем областей поверхні цих елементів. У статті розглядається задача зміцнення сферичного меніска. Спочатку визначаються області обробки поверхні меніска, що відповідають додатнім значенням нормальних тангенціальних напружень. Потім ці області обробляються електронним променем. Зміцнення меніска зумовлене змінами в структурі матеріалу приповерхневого шару та зменшенні його об'єму.

The technique for strengthening optical glass and ceramic products has been developed. The technique involves laser or electron beam treatment of parts of the surface of these products. The article deals with a structural element of aircraft - a spherical meniscus made of optical glass. The first stage of the strengthening technique involves determining the areas of the meniscus surface treatment. The next step is to treat these areas with an electron beam.

Meniscus strengthening is caused by changes in the structure of the material of the subsurface layer by the action of the electron beam. Such a change in the material structure leads to a significant increase of its elastic modulus. In fact, a subsurface reinforcing layer is formed. The beam treatment also leads to a significant reduction of the volume of the subsurface layer. This is the result of the evaporation of the filler material from the defective cracked layer. Thus, compressive stresses are created in the material. The subsurface layer of the meniscus becomes prestressed.

The first stage of strengthening is to determine the areas of the meniscus surface treatment. These areas equivalent to the areas of the meniscus surface with normal tensile stresses, which are related to the process of crack formation and development. In this article, the problem of the theory of elasticity of a spherical meniscus was formulated and solved to obtain the distribution of normal stresses. The analysis of the stress-strain state of a spherical meniscus is realized using the application program package "Integral", which is based on the theory of axisymmetric three-dimensional bodies developed by the authors. The components of the stress tensor and the displacement vector for a centrally loaded spherical meniscus are calculated. The analysis of normal stresses has shown that tangential normal stresses have a significant

impact on the meniscus. The areas of the surface of a spherical meniscus where these normal stresses cause stretching are determined. Uncontrolled crack development with subsequent destruction of the meniscus material is possible in these areas.

The second stage of strengthening a glass spherical meniscus is to treat the meniscus surface areas with an electron beam. Treatment of the subsurface areas of tangential normal tensile stresses with an electron beam causes the formation of a prestressed area of increased strength in the meniscus subsurface layer.

Ключові слова: методика зміцнення, оптичне скло, сферичний меніск, фізико-механічні властивості, арматурний шар, область напружень стиску, електронно-променева обробка, напружено-деформований стан.

Keywords: the strengthening technique, optical glass, spherical meniscus, physical and mechanical properties, reinforcing layer, compressive stress area, electron-beam treatment, stress and strain state.

Зміцнення конструктивних елементів напруженнями стиску. Для конструкційних матеріалів, що незадовільно працюють на розтяг, використовується зміцнення напруженнями стиску. До таких матеріалів можливо віднести скло, оптичну кераміку, чавун, бетон тощо. Опір цих матеріалів нормальним напруженням розтягу значно менший, ніж стиску. До того ж, під дією напружень розтягу у крихких матеріалах виникають тріщини, що швидко розвиваються та призводять до руйнування матеріалу конструктивного елемента.

Проблема збільшення опору крихких матеріалів нормальним напруженням розтягу розглядається в даній роботі. Існує значна кількість технологій зміцнення конструкційних матеріалів та конструктивних елементів. По-перше, це технології зміцнення за рахунок змін у конструктиві об'єкта, тобто створення композиції крихких і пружних матеріалів. Наприклад, постановка металевої чи склопластикової арматури в зонах розтягу бетонних виробів [1]. Створення композиції зі скла та високоміцної плівки в ілюмінаторах, де плівка наклеюється на виріб з боку виникнення напружень розтягу [2].

Наступна група технологій зміцнення стосується геометричних параметрів конструктивних елементів. Задача зміцнення зводиться до таких змін геометрії елемента, при яких величина та область напружень розтягу значно зменшується. Прикладом може слугувати монолітна плита перекриття. Надання плиті геометрії пологої оболонки призводить до такого перерозподілу нормальних напружень, коли величина і область розподілу напружень розтягу значно зменшується. Це дозволяє зменшити товщину плити та кількість арматури. Такі плити часто називаються плитами з будівельним вигином [3].

Як групу можливо виділити технології, що базуються на збільшенні опору конструктивних елементів напруженням розтягу за рахунок

створення в них областей напружень стиску. Ефективність цих технологій можна продемонструвати на прикладі попередньо-напружених залізобетонних конструкцій. Попередньо розтягнута арматура устанавлюється в зоні дії найбільших напружень розтягу. Таким чином, формується потрібна область напружень стиску [4].

Проблема зміцнення сферичного меніска. В конструктивних елементах із скла напруження стиску в приповерхневому шарі можна отримати за допомогою технології поверхневої обробки. Прогрівання скляної поверхні лазерним чи електронним променем призводить до зміни структури приповерхневого шару. В результаті значно зростає його міцність. Також прогрівання приповерхневого шару супроводжується випаровуванням речовин із дефектного (тріщинуватого) шару, що призводить до зменшення його об'єму. Наслідком цього є формування у приповерхневому шарі напружень стиску – попередньо-напруженої області. Таким чином, обробка скляної поверхні лазерним чи електронним променем дозволяє збільшити міцність конструктивних елементів зі скла та залишити незмінною геометрію [5].

Методика зміцнення сферичного меніска. Розглянемо методику зміцнення конструктивного елемента на прикладі сферичного меніска (рис.1). Сферичний меніск може застосовуватися для захисту оптичних приладів у літальних об'єктах. Він виготовляється із оптичного скла чи кераміки. Ці конструкційні матеріали мають малий опір напруженням розтягу, тому міцність меніска обмежена. З іншого боку, робота меніска відбувається при високих швидкостях, значних теплових і динамічних навантаженнях. Все це зумовлює необхідність підвищення міцності меніска. Міцність меніска визначається його геометрією та фізико-механічними властивостями конструкційного матеріалу. Оптичні вимоги до меніска не дозволяють варіювати матеріалами та змінювати його геометрію. Застосуємо для меніска технологію зміцнення у вигляді обробки частини поверхні електронним променем [5].

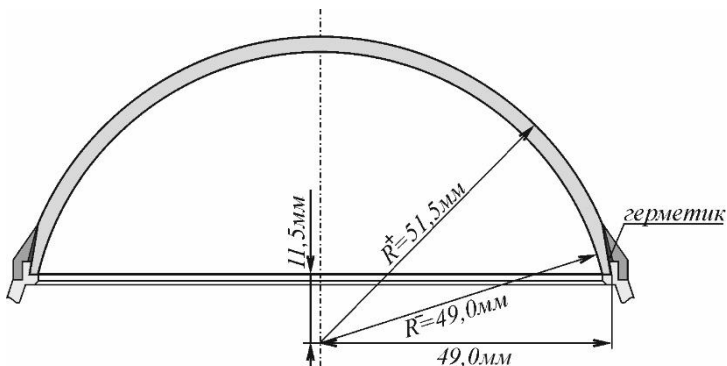


Рис. 1. Сферичний меніск з оптичного скла

Ця технологія зміцнення скляного меніска складається з двох етапів. На першому етапі на поверхнях меніска визначаються області обробки. На другому визначені області піддаються обробці електронним променем задля формування зміцненого попередньо-напруженого приповерхневого шару.

Область обробки визначається зоною дії нормальних напружень розтягу. Для обчислення її меж потрібно виконати розрахунок напружено-деформованого стану меніска.

Детально зупинимося на першому етапі зміцнення меніска. Розглянемо меніск, що відноситься до товстих сферичних оболонок (відношення його товщини до радіуса основи перевищує $1/20$). Просторовий характер напружено-деформованого стану меніска також зумовлюється важкими умовами роботи та складною структурою фізико-механічних властивостей матеріалу.

Розрахунок напружено-деформованого стану сферичного меніска не може бути виконаний аналітично. Такий розрахунок можна виконати чисельними методами, наприклад, методом скінченних елементів чи методом скінченних різниць.

Для розрахунку напружено-деформованого стану сферичного меніска пропонується використати розроблену авторами спеціалізовану теорію товстих пластин та оболонок [6]. Основою теорії є узагальнений метод скінченних інтегральних перетворень В.К. Чибірякова [7]. Чисельні розв'язки отримуються за алгоритмом ортогональної прогонки С.К. Годунова [8], що реалізований у програмному комплексі «INTEGRAL-SV» [9]. ПК «INTEGRAL-SV» дозволяє чисельне інтегрування проводити з наперед заданою точністю та контролювати збіжність і відповідність чисельних розв'язків за збіжністю граничних умов.

За розрахункову модель меніска візьмемо осесиметричну сферичну оболонку (рис. 2, товщина меніска збільшена для кращої візуалізації), яку розглядатимемо в сферичній ортогональній системі координат $\{\theta, s, r\}$.

Згідно схеми меніска, за початок координат прийнятий центр O поверхні проєктування радіусом R^0 , для якої радіус-вектор r буде паралельним твірній торцевої поверхні меніска. Щодо бокових поверхонь $r = h^-(s)$ та $r = h^+(s)$, то вони мають однозначно проєктуватися на поверхню проєктування. Незважаючи на те, що бокові поверхні мають сферичну форму з одним центром, функції $h^-(s) \neq const$ і $h^+(s) \neq const$. Це викликано неспівпадінням центрів сфер поверхні проєктування і бокових поверхонь.

Зовнішні навантаження сферичного меніска різноманітні і можуть

мати складний характер. Як приклад, розглянемо визначення області введення стискуючих напружень у випадку дії на меніск одиначної зосередженої центральної сили, що прикладена в zenіті меніска уздовж осі симетрії (рис. 2). Подібне навантаження характерне для умов експлуатації меніска, а також для проведення експериментальних досліджень його міцності [5]. По торцевій поверхні і по частині бокової $h^+(s)$ меніск прикріплюється до корпусу літального об'єкта. Про торцевій поверхні контакт оболонки з корпусом розглядаємо як жорстко-рухоме у напрямку r обпирання, а по частині бокової поверхні $h^+(s)$ як пружно-рухоме у напрямку s затиснення з коефіцієнтами пружності $k_{r,1}^+, k_{r,2}^+$.

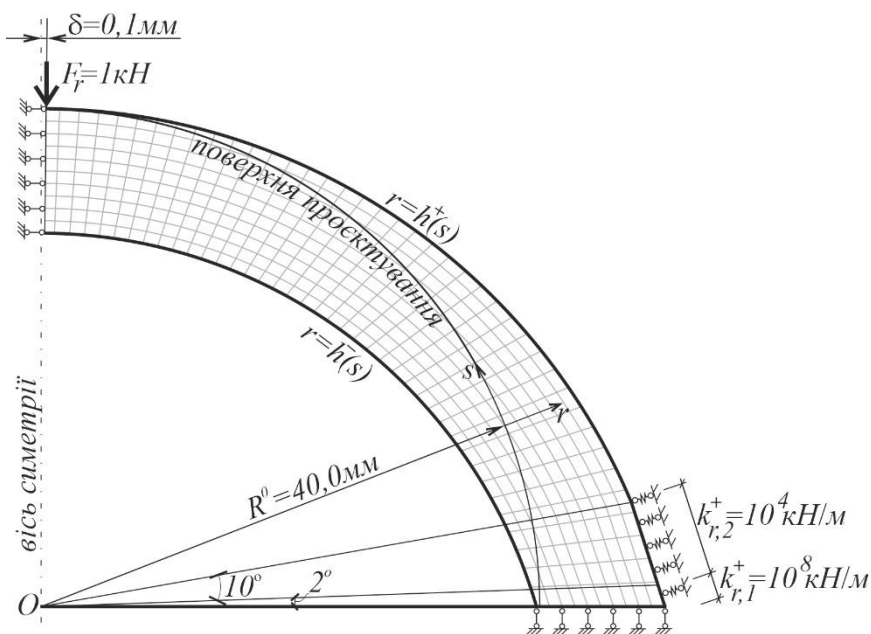


Рис. 2. Розрахункова схема сферичного меніска

Фізико-механічні характеристики скла такі: модуль пружності в поздовжньому напрямку – $E = 8,38 \cdot 10^4$ МПа, коефіцієнт поперечної пружності – $\nu = 0,23$.

Симетрія навантаження та умов закріплення поряд із геометричною симетрією дозволяє віднести меніск до осесиметричних сферичних оболонок, напружено-деформований стан яких описується рівняннями просторової теорії пружності [10]. Через симетрію напружено-

деформованого стану, достатньо розрахувати лише симетричну половину меніска, моделюючи дію відкинutoї частини жорстко-рухомим по осі симетрії затисненням.

Для розрахунку сферичного меніска застосований програмний комплекс «Інтеграл». Параметри чисельного процесу: степінь поліноміальної апроксимації $N = 6$ [11], автоматичний вибір довжини кроку інтегрування визначений абсолютною 10^{-7} та відносною 10^{-4} похибками інтегрування.

Для меніска був отриманий вектор переміщень та тензор напружень, компоненти яких візуалізовані у вигляді ізоліній. Аналіз розподілу ізоліній показує, що напружено-деформований стан меніска має просторовий характер. Похибка задоволення граничних умов на бокових поверхнях не перевищує 3%. Небезпечними для скляного меніска є додатні нормальні напруження σ_s (рис. 3). Величина цих напружень співставна зі значеннями зовнішніх сил. Додатні величини напружень σ_r та σ_θ набагато менші у порівнянні з σ_s .

Додатні напруження σ_s навантаження, що розглядається, а також і в реальних умовах експлуатації, як показують експериментальні дослідження [12], σ_s набувають у zenіті меніска на поверхні $h^-(s)$ (до 0,9 кПа).

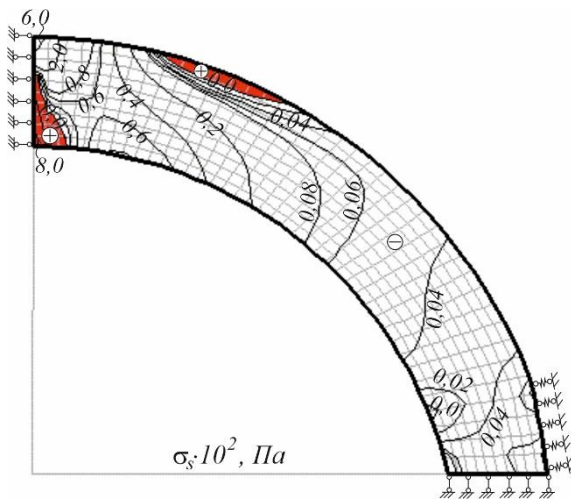


Рис. 3. Ізолінії розподілу нормальних напружень σ_s

Як видно з рис. 3, область додатніх напружень (виділено червоним кольором) на боковій поверхні $h^-(s)$ обмежується значеннями координати $s > 5,97 \cdot 10^{-2}$ м, а на $h^+(s) - 3,93 \cdot 10^{-2}$ м $\leq s \leq 5,03 \cdot 10^{-2}$ м.

Обробка електронним променем. Другий етап зміцнення скляного меніска полягає в обробці визначених областей поверхні меніска електронним променем. Результатом обробки скляної поверхні буде формування модифікованого приповерхневого шару. Модуль пружності матеріалу шару значно зростає, тому його можливо вважати арматурним шаром. Об'єм модифікованого шару скляної поверхні зменшиться, через це в ньому сформується нормальні напруження стиску, він стане попередньо-напруженим. Величина напружень стиску визначається параметрами електронного променя [13].

Висновки. Методика зміцнення скляних конструктивних елементів поверхневою обробкою складається із двох частин. Спочатку високоточним чисельним методом обчислюються області обробки. Потім визначені області обробляються електронним променем. Використання викладеної методики зміцнення призводить до формування зміцненого попередньо-напруженого приповерхневого шару. Ефект формування модифікованого шару на поверхні скла при обробці лазерним чи електронним променем дозволяє підвищити міцність скляних деталей, а також стійкість обробленої поверхні.

References

1. Blihar'skyi Z. Ya., Karkhut I. I. (2017) *Rozrakhunok i konstruiuvannia zghynanykh zalizobetonnykh elementiv* [Calculation and construction of bent reinforced concrete elements]. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki. (in Ukrainian)
2. Lynda R. Estes, *The ISS Eye on the Universe: the Verification of ISS Cupola Window Glass* // AF abstracts, 34th COSPAR Scientific Assembly, The Second World Space Congress, held 10-19 October, 2002 in Houston, TX, USA., T-P-05, meeting abstract id.876. January 2002. URL: https://www.researchgate.net/publication/252714070_The_ISS_Eye_on_the_Universe_the_Verification_of_ISS_Cupola_Window_Glass
3. Smolyar A.M., Miroshkina I.V., Yurchenko S. V. *Strain State of Zero-Deflection Plates* // Materials Science. September 2015. V. 51. I. 2. P. 276–280.
4. Pavlikov A.M. (2017) *Zalizobetonni konstruktсии: budivli, sporudy ta yikh chastyny* [Reinforced concrete structures: buildings, constructions and their elements]. Poltava : PoltNTU. (in Ukrainian)
5. Certificate of authorship 1781993 USSR. (1990) *Sposob uprochnenija izdelij iz opticheskoy keramiki* [Method for strengthening optical ceramics products]. V.N. Lisochenko, N.I. Krivenko, A.M. Smoljar, A.L. Shumskij, E.I. Bondarenko, K.Z. Jagudin. (in Russian)

6. Chybiriakov V. K., Smoliar A. M. (2002) *Teoriia товстих пластин та оболонки*. [The theory of thick plates and shells]. Cherkasy: ChDTU. (in Ukrainian)
7. Chibirjakov V.K. (1982) *Obobshchennyj metod konechnykh integral'nykh preobrazovanij v statike i dinamike netonkih plastin* [Generalized method of finite integral transformations in the statics and dynamics of thin plates]. *Soprotivlenie materialov i teoriia sooruzhenij*, 40, 90-95. (in Russian)
8. Godunov S. K. (1961) *O chislennom reshenii kraevykh zadach dlja sistem linejnykh obyknovennykh differencial'nykh uravnenij* [About numerical solution of boundary value problems for systems of linear ordinary differential equations]. *Uspеhi matematicheskikh nauk*, vol. 16, no. 3, 171–174. (in Russian)
9. Certificate of authorship 71449 Ukraine. (2017) *Kompiuterna prohrama «INTEGRAL-SV»* [Computer program "INTEGRAL-SV"]. A.M. Smoliar, I.V. Miroshkina, S.V. Yurchenko. (in Ukrainian)
10. Smoliar A.M., Miroshkina I.V. (2017) *Teoriia visesymetrychnykh prostorovykh til* [The theory of axisymmetric spatial bodies]. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, 67, 60-64. (in Ukrainian)
11. Miroshkina I.V. (1998) *Doslidzhennia stiičnosti chyslovoho rozrakhunku товстих visesymetrychnykh оболонки методом ортогональної прогонки* [Research of stability of numerical calculation of thick axisymmetric shells by the method of orthogonal running]. *Visnyk Cherkaskoho inzhenerno-tehnolohichnoho instytutu*, 3, 103-107. (in Ukrainian)
12. Kovalenko V.S., Jenani K., Arato E., Nenzo S. (1980) *K voprosu mehanizma uprochnenija materiala pri vozdeystvii nepreryvnoho lazernogo izlucheniija* [On the Mechanism of Material Hardening under the Effect of Continuous Laser Radiation]. *Jelektronnaja obrabotka materialov*, 1, 78-83. (in Russian)
13. Kotel'nikov D.I., Kanashevich G.V., Dubrovskaja G.N. (1991) *Izmenenie svojstv opticheskogo stekla posle jelektronno-luchevoj obrabotki* [Changes in the properties of optical glass after electron-beam processing]. II Vsesojuznaja konferencija «Modifikacija svojstv konstrukcionnykh materialov puchkami zarjzhennykh chastic»: tezisy dokladov (pp. 86-88). Sverdlovsk. (in Russian)

Література

1. Бліхарський З. Я., Кархут І. І. Розрахунок і конструювання згинаних залізобетонних елементів: навч. посіб. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. 188 с.
2. Lynda R. Estes, The ISS Eye on the Universe: the Verification of ISS Cupola Window Glass // AF abstracts, 34th COSPAR Scientific Assembly, The Second World Space Congress, held 10-19 October, 2002 in Houston, TX, USA., T-P-05, meeting abstract id.876. January 2002. URL: https://www.researchgate.net/publication/252714070_The_ISS_Eye_on_the_Universe_the_Verification_of_ISS_Cupola_Window_Glass

3. Smolyar A.M., Miroshkina I.V., Yurchenko S. V. Strain State of Zero-Deflection Plates // *Materials Science*. September 2015. V. 51. I. 2. P. 276–280.
4. Павліков А.М. Залізобетонні конструкції: будівлі, споруди та їх частини: Підручник. Полтава: ПолтНТУ, 2017. 284 с.
5. А.с. 1781993 СССР, МКИ С 04 В 35/00. Способ упрочнения изделий из оптической керамики: / В.Н. Лисоченко, Н.И. Кривенко, А.М. Смоляр, А.Л. Шумский, Е.И. Бондаренко, К.З. Ягудин. №°4848595/33; заявл. 09.07.90; зареестр. 15.08.92.
6. Чибіряков В. К., Смоляр А. М. Теорія товстих пластин та оболонок : Монографія. Черкаси : ЧДТУ, 2002. 160 с.
7. Чибиряков В.К. Обобщенный метод конечных интегральных преобразований в статике и динамике нетонких пластин // *Сопротивление материалов и теория сооружений*. 1982. № 40. С. 90–95.
8. Годунов С. К. О численном решении краевых задач для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений // *Успехи математических наук*. 1961. Т. 16, вып. 3. С. 171–174.
9. А. с. 71449. Комп'ютерна програма «INTEGRAL-SV» / А.М. Смоляр, І.В. Мірошкіна, С.В. Юрченко. Зареестр. 14.04.2017; опубл. 28.07.17, Бюл. № 45. С. 77.
10. Смоляр А.М., Мірошкіна І.В. Теорія вісесиметричних просторових тіл // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2017. Вип. № 67. С. 60-64.
11. Мірошкіна І.В. Дослідження стійкості числового розрахунку товстих вісесиметричних оболонок методом ортогональної прогонки // *Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту*. Черкаси, 1998. №3. С. 103-107.
12. Коваленко В.С., Энани К., Арато Е., Ненно С. К вопросу механизма упрочнения материала при воздействии непрерывного лазерного излучения // *Электронная обработка материалов*, 1980. №1. С. 78-83.
13. Котельников Д.И., Канашевич Г.В., Дубровская Г.Н. Изменение свойств оптического стекла после электронно-лучевой обработки // *II Всесоюзная конференция «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц»: тезисы докладов*. Свердловск, 1991. С. 86-88.