



УДК 539.3

THE PROBLEM OF STRENGTHENING SPHERICAL MENISCI

ЗАДАЧА ЗМІЦНЕННЯ СФЕРИЧНИХ МЕНІСКІВ

Smoliar A.M. / Смоляр А.М.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-5714-473X

Miroshkina I.V. / Мірошкіна І.В.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-7878-4421

Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Shevchenko boulevard, 460, 18006
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, булв. Шевченка, 460, 18006

Анотація. В статті розглядається проблема зміцнення сферичних менісків зі скла. Сферичні меніски є конструктивними елементами літальних об'єктів. Небезпечними для менісків є додатні нормальні напруження у приповерхневому шарі. Пропонується ці області попередньо напружити. Для введення стискуючих напружень у приповерхневий шар пропонується застосувати обробку поверхні меніска електронним променем. Визначення областей обробки потребує детального аналізу напружено-деформованого стану меніска. Для цього в роботі використовується авторська теорія осесиметричних просторових тіл та на її основі ПК «Інтеграл».

Ключові слова: зміцнення, сферичний меніск зі скла, електронно-променева технологія, напружено-деформований стан, теорія осесиметричних просторових тіл, програмний комплекс "Інтеграл".

Вступ.

Сферичні меніски є конструктивними елементами літальних об'єктів, кораблів, підводних об'єктів, інших сучасних машин. За геометричною формою вони можуть бути віднесені до осесиметричних сферичних оболонок. Навантаження, якому піддаються такі оболонки, може мати симетричний, або несиметричний характер. Матеріал для виготовляються оболонки дуже різноманітний – від металу до оптичного скла та кераміки. Умови роботи менісків теж відрізняються.

Так сферичні меніски, що є конструктивними елементами носових частин літальних об'єктів, під час роботи зазнають дії значних ударних, динамічних та теплових навантажень, пов'язаних з високими експлуатаційними швидкостями. Матеріалом подібних оболонок, виходячи з призначення літального об'єкта, часто є оптичне скло чи кераміка, міцність яких обмежена. З другого боку, проблема міцності сферичного меніска - це проблема існування та надійної роботи усього літального об'єкта. Тому збільшення міцності меніска – зміцнення меніска – надзвичайно важлива задача в забезпеченні робочого стану літального об'єкта.

Задача зміцнення меніска з скла чи оптичної кераміки має обмеження у вигляді неможливості зміни його геометричної форми задля збереження оптичних властивостей. Це призводить до необхідності пошуку нетрадиційних методів підвищення механічної міцності меніска.

Основний текст.

В [1] була запропонована методика зміцнення меніска за рахунок заданої



зміни фізико-механічних властивостей матеріалу його приповерхневого шару електронно-променевою обробкою. Основна ідея такої "заданої зміни" полягає в створенні певних стискуючих напружень за рахунок прогрівання чи проплавлення електронним променем тих зон приповерхневого шару меніска, що працюють на розтяг під час його експлуатації, і де виникають критичні напруження розтягу.

Визначення зон обробки поверхні меніска електронним променем є першим важливим етапом розв'язку задачі його зміцнення [1, 2]. Цей етап потребує детального аналізу напружено-деформованого стану меніска.

Для проведення такого аналізу застосована, розроблена авторами, спеціалізована теорія осесиметричних просторових тіл [3].

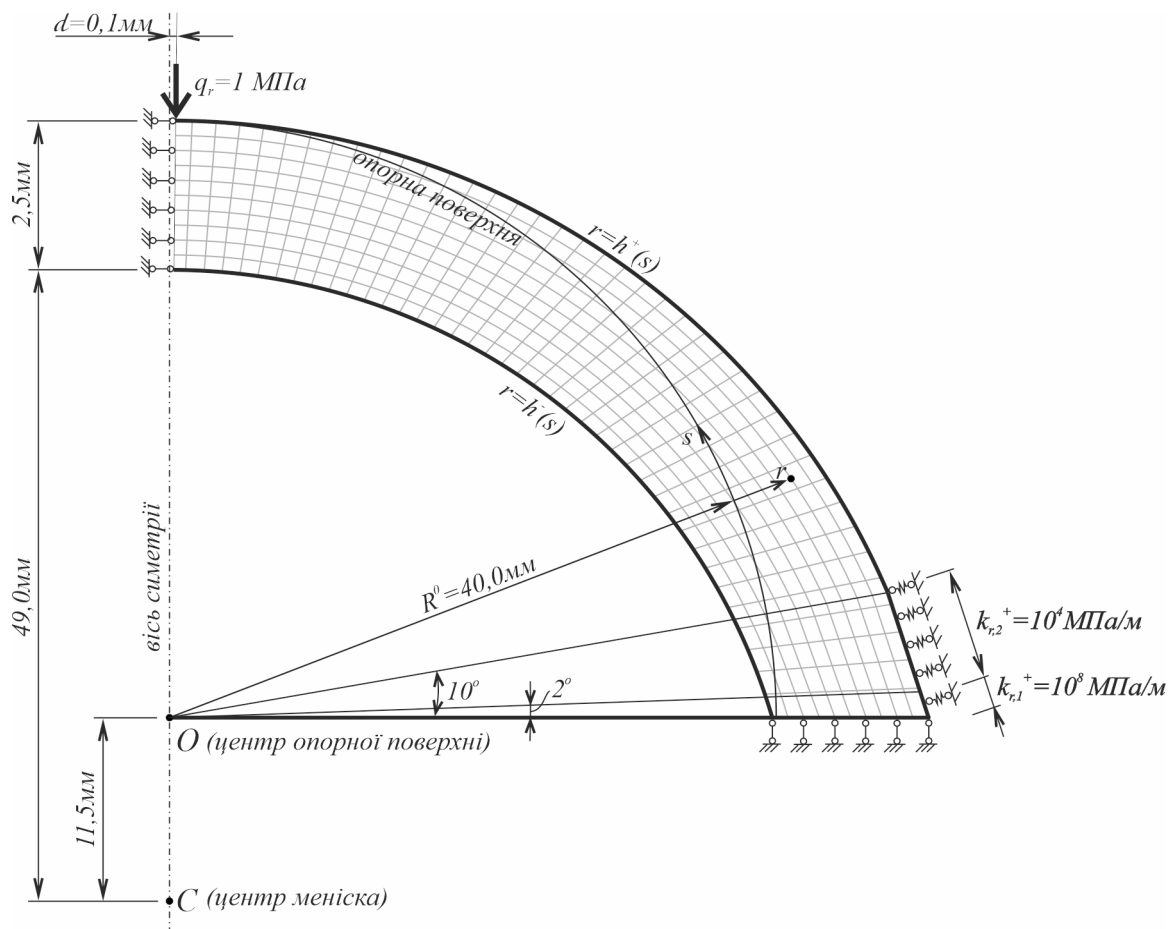


Рисунок 1 - Меніск, схема його кріплення, розрахункова схема

За розрахункову модель меніска прийнята осесиметрична сферична оболонка (рисунок 1), яка розглядається в сферичній ортогональній системі координат $\{\theta, s, r\}$ (товщину меніска збільшено для кращого візуального сприйняття). За початок координат прийнятий центр O опорної поверхні радіусом R^0 , яка побудована так, щоб напрямок осі r співпадав із твірними торцевої поверхні меніска. Бокові поверхні меніска по відношенню до опорної поверхні розміщуються довільно і визначаються рівняннями $r = h^-(s)$ та $r = h^+(s)$. Незважаючи на те, що бокові поверхні мають сферичну форму з



одним центром, функції $h^-(s) \neq const$ і $h^+(s) \neq const$. Це є наслідком розбіжності центрів сфер опорної та бокових поверхонь.

Навантаження має вигляд зосередженої одиничної сили, що прикладена в зеніті меніска вздовж осі симетрії. Для меніска таке навантаження найчастіше використовується при натурних експериментах дослідження його межі міцності [4]. По торцевій поверхні $s = 0$ і по частині бокової $h^+(s)$ меніск контактує з елементами конструкції корпусу. Умови контакту по торцевій поверхні змодельовані як ковзне обпирання (нерухоме в напрямку осі s), по боковій поверхні $h^+(s)$ – за допомогою пружних стержнів скінченної жорсткості $k_{r,1}^+, k_{r,2}^+$ (в напрямку осі r).

Фізико-механічні характеристики скла такі: модуль пружності Юнга - $E = 8,38 \cdot 10^4$ МПа, коефіцієнт Пуассона - $\nu = 0,23$.

Симетрія навантаження, умов закріплення та геометрична симетрія дозволяють віднести меніск до осесиметричних сферичних оболонок. Осесиметричний напружено-деформований стан таких оболонок дає можливість розглядати лише симетричну половину меніска. Дія відкинутої частини моделюється введенням по осі симетрії ковзного затиснення, рухомого в напрямку осі r .

Чисельну реалізацію поставленої задачі виконано за допомогою розробленого на основі теорії осесиметричних просторових тіл програмного комплексу «Інтеграл» [5].

Параметри чисельного процесу такі: степінь поліноміальної апроксимації прийнятий $N = 6$ [2, 6], автоматичний вибір довжини кроку інтегрування визначений абсолютною 10^{-7} та відносною 10^{-4} похибками інтегрування.

Визначення змінних матричних коефіцієнтів в кожній точці інтервалу інтегрування пов'язано з обчисленням інтегралів по товщині. Вони обчислювались наближено за формулами Ньютона-Котеса 8-го порядку точності з контролем похибки згідно заданих значень абсолютної 10^{-4} та відносної 10^{-3} похибок інтегрування.

Для меніска був отриманий вектор переміщень та тензор напружень. Аналіз розподілу ізольованих компонент тензора напружень вказує на їхній просторовий характер, на значну зміну напружено-деформованого стану по товщині оболонки. Граничні умови на бокових поверхнях задовольняються з похибкою $\varepsilon < 3\%$. Небезпечними для скляного або керамічного меніска є додатні напруження σ_s . Ці нормальні напруження по величині співставні із зовнішнім навантаженням і значно перевищують значення інших нормальних напружень σ_r та σ_θ . Високий рівень значень напружень σ_s може призводити до утворення тріщин та руйнування самого меніска. Найбільших значень, при



заданому навантаженні, σ_s набувають у zenіті меніска на поверхні $h^-(s)$ ($\sigma_s \approx 0,9$ МПа).

Як видно з розподілу напружень σ_s на рисунку 2, область додатних значень цих напружень на боковій поверхні $h^-(s)$ обмежується значеннями координати $s > 5,97 \cdot 10^{-2}$ м, на боковій поверхні $h^+(s)$ – $3,93 \cdot 10^{-2}$ м $\leq s \leq 5,03 \cdot 10^{-2}$ м.

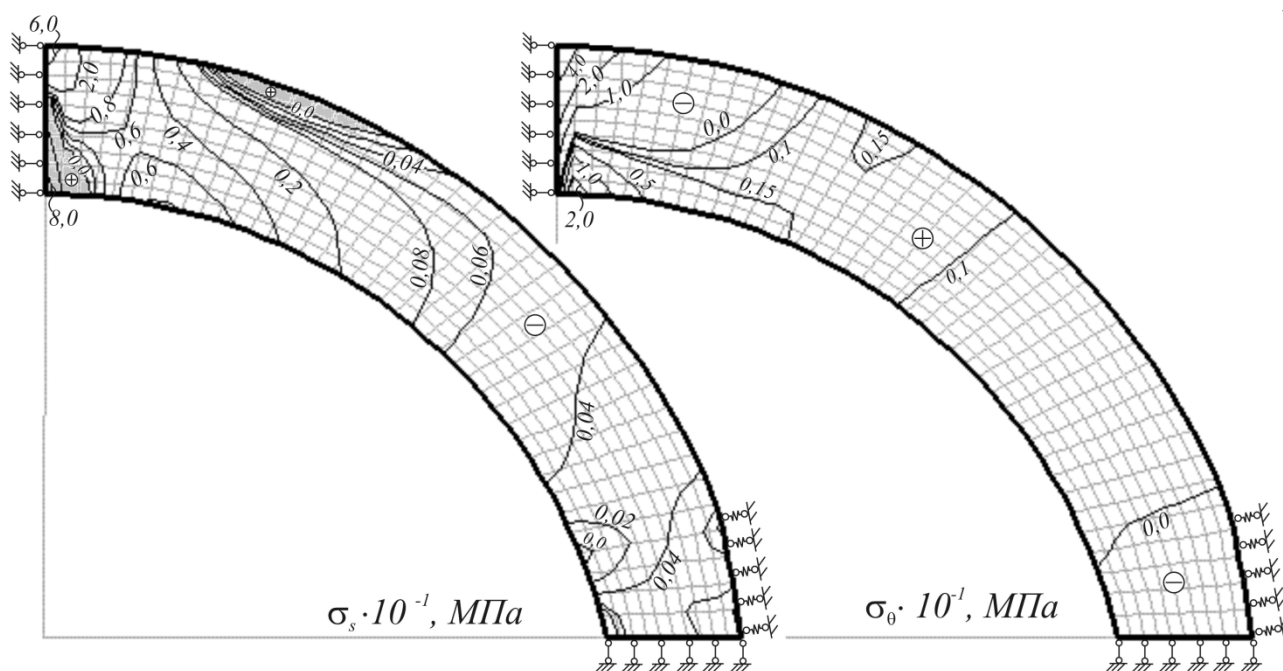


Рисунок 2 – Ізолінії напружень σ_s та σ_θ

Області виникнення додатних σ_s пропонується обробляти електронно-променевою технологією задля збільшення модуля пружності в приповерхневому шарі та введення в приповерхневий шар від'ємних попередніх напружень σ_s . Величина цих параметрів залежить від характеристик електронного променя і не повинна перевищувати значень напружень при яких можливе руйнування приповерхневого шару меніска.

Висновки.

В статті поставлена задача про зміцнення сферичного меніска зі скла. Запропоновано для цього використати електронно-променевою технологію. Обробка поверхні меніска електронним променем призводить до утворення в приповерхневому шарі стискуючих напружень. Області обробки визначені з аналізу напружено-деформованого стану меніска. Це області додатних значень нормальних напружень на бокових поверхнях меніска. Для обчислення компонент тензора напружень застосована авторська теорія осесиметричних просторових тіл та створений на її основі програмний комплекс «Інтеграл».



Литература:

1. Смоляр А. М. Розрахунок і зміцнення товстої осесиметричної сферичної оболонки / А.М. Смоляр, І.В. Мірошкіна // Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. Машинобудування. – 1998. – №1. – С. 9–11.
2. Чибіряков В. К. Визначення області введення додаткових стискуючих напружень у меніску з скла та оптичної кераміки / В.К. Чибіряков, А.М. Смоляр, І.В. Мірошкіна // Опір матеріалів та теорія споруд. – 2000. – Вип. 67. – С. 136–143.
3. Смоляр А.М. Теорія вісесиметричних просторових тіл / А.М. Смоляр, І.В. Мірошкіна // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2017. – Вип. 67. – С. 60–64.
4. Способ упрочнения изделий из оптической керамики: А.с. 1781993 СССР, МКИ С 04 В 35/00 / В.Н. Лисоченко, Н.И. Кривенко, А.М. Смоляр, А.Л. Шумский, Е.И. Бондаренко, К.З. Ягудин (СССР). - № 4848595/33; заявлено 09.07.90.
5. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 71449. Комп'ютерна програма «INTEGREL-SV». Автори Смоляр А.М., Мірошкіна І.В., Юрченко С.В. Дата реєстрації 14.04.2017. Підпис: Голова Державної служби інтелектуальної власності України, в.о. голови А.А. Малиш. Документ на офіційному бланку Державної служби інтелектуальної власності України.
6. Мірошкіна І.В. Дослідження стійкості числового розрахунку товстих осесиметричних оболонок методом ортогональної прогонки / І.В. Мірошкіна. // Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. – 1998. – № 3. – С. 103–107.

Abstract. *The problem of strengthening spherical menisci made of glass have been presented in the article. Spherical menisci are structural elements of various flying objects. Positive normal stresses in the near-surface layer are dangerous for menisci. They can be compensated by compressive stresses which occur when the surface of the meniscus is treated with an electron beam. Determination of the treatment areas requires a detailed analysis of the stress-strain state of the meniscus. The authors use their own theory of axisymmetric dimensional bodies and the software complex "Integral" to determine the meniscus treatment areas.*

Key words: *strengthening, spherical glass meniscus, electron beam technology, stress-strain state, theory of axisymmetric dimensional bodies, software complex "Integral".*

Статья отправлена: 05.08.2022 г.

© Смоляр А.М, Мірошкіна І.В.