

Секція 2

**ЗАДАЧІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ
СКЛАДНОЇ ФОРМИ**

УДК 539.3

О.Р. Гачкевич, д.ф.-м. н., проф.; М.Г. Гачкевич, к.ф.-м.н., ст. н. сп.

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН
України, Україна

**МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ ВІДНОСНО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ РЕЖИМІВ
ТЕХНОЛОГІЧНОГО НАГРІВУ КУСКОВО-ОДНОРІДНИХ СКЛЯНИХ
ОБОЛОНОК У ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСАХ**

A.R Gachkevich, Dr., Prof., N.G. Gachkevich, Ph.D., Assoc.Prof.

**METHODOLOGY FOR OPTIMIZING THE RELATIVE STRESS STATE OF THE
TECHNOLOGICAL HEATING REGIMES OF PIECE-HOMOGENEOUS GLASS
SHELLS IN PRODUCTION PROCESSES**

Abstract. The technique of optimizing the relative stress state of the technological heating regimes of piece-homogeneous glass shells in production processes has been developed.

В процесі виготовлення, обробки і експлуатації скляні кусково-однорідні оболонки, чи елементи з таких оболонок, піддаються дії нестационарних температурних полів в результаті технологічного або супутнього нагріву, а також дії силового навантаження. Рівні напружень і деформацій, що виникають при цьому, суттєво залежать як від неоднорідності розподілу температури або силового навантаження, так і неоднорідності властивостей матеріалу. За перевищення допустимих вони можуть приводити до виникнення тріщин і руйнування оболонок. Тому актуальною є розробка методики оптимізації за напруженим станом режимів нагріву таких оболонок за врахування їх неоднорідності при заданих областях допустимої зміни температури і температурних напружень, які відображають специфіку і можливості конкретного способу технологічного або експлуатаційного нагріву, а також враховують міцнісні властивості матеріалу. Розв'язування різних аспектів цієї проблематики є важливим при побудові оптимальних теплових режимів багатьох видів цільової термообробки кусково-однорідних оболонкових елементів (як із скла, так і других матеріалів)-складових елементів значної кількості сучасних пристроїв цільового примінення, зокрема вакуумного і енергетичного обладнання.

Однорідні і кусково-однорідні елементи конструкцій і приладів сучасної техніки, зокрема скляні, піддаються дії багатофакторних навантажень. Одним з таких навантажень є теплове, дія якого є основою роботи різних енергетичних пристроїв, а також використовується в існуючих технологіях обробки конструктивних елементів в багатьох галузях промисловості, в тому числі енергетичної, електротехнічної і електронної.

Основним джерелом отримання теплової дії є конвективний спосіб нагріву. Часто використовують спосіб нагріву з допомогою джерел тепла, зокрема, створюваних з допомогою електромагнітного випромінювання інфрачервоного спектру. Конструктивні елементи можуть піддаватися і безпосередньому силовому навантаженню як в результаті відповідного закріплення, так і додаткової силової дії. Елементи можуть піддаватись таким діям як при виготовленні, так і експлуатації.

Нагрів і силове навантаження приводять до виникнення в конструктивних елементах температурних і механічних (переміщень, напружень і деформацій) полів, які залежать як від характеру розподілу температури і силового навантаження, так і неоднорідності матеріалу, можуть досягати значної величини і перевищувати допустимі рівні, приводити

до появи тріщин.

Тому актуальною і практично важливою є розробка методики визначення оптимальних за напруженим станом режимів нагріву кусково-однорідних скляних оболонок з врахуванням їх неоднорідності при заданих областях допустимої зміни температури і напружень, які відображають специфіку і можливості конкретного способу технологічного або експлуатаційного нагріву, а також міцнісні (термоміцнісні) властивості матеріалу. Розв'язок такого класу задач є важливим для розробки теплових режимів різних видів цільової термообробки скляних кусково-однорідних оболонок, які широко використовуються в різних галузях сучасної техніки.

Оскільки більшість технологічних процесів проходить в умовах інтенсивного теплового навантаження, яке відбувається в широкому температурному інтервалі, необхідно враховувати температурну залежність фізико-механічних характеристик матеріалу. Як відомо значення коефіцієнтів лінійного теплового розширення різних типів технічного скла (що використовується у виробництві) з підвищенням температури суттєво змінюється, а значення коефіцієнтів температуропровідності, Пуассона і модуль Юнга в границях розглядуваних температур ($0^{\circ}\text{C} - 460^{\circ}\text{C}$) змінюються практично незначно і їх можна прийняти постійними [1-4]. Тому при описі напружено-деформованого стану розглядуваних кусково-однорідних скляних оболонок доцільно виходити із співвідношень незв'язаної задачі термопружності при залежному від температури коефіцієнті температурного розширення, яку часто використовують при дослідженні термомеханічної поведінки конкретних скляних елементів, обумовленої нестационарним термосиловим навантаженням [5].

В постановці задач оптимізації напружено-деформованого стану важливим є вибір критерію оптимальності. Для однорідних оболонок, як правило, вибирають відповідний функціонал, який в інтегральному сенсі відображає ціль оптимізації. Зокрема, використовуваний при побудові оптимальних режимів технологічного нагріву однорідних оболонок функціонал енергії пружної деформації пов'язують з термоміцністю скляного виробу на етапах нагріву-охолодження [6]. Кусково-однорідні оболонки мають ту особливість, що температурні напруження, які виникають при їх термообробці, можуть суттєво залежати не тільки від характеру розподілу температури, але і від неоднорідності властивостей матеріалу. При цьому, як правило, максимальні нормальні напруження (від величини яких згідно першої теорії міцності руйнується скло) виникають в приконтатній (локальній) області спряження різнорідних частин кусково-однорідної оболонки. Тому в випадку оптимізації напружено-деформованого стану кусково-однорідної оболонки доцільно використовувати локальний критерій оптимальності, що характеризує міру напруженого стану. В якості такого критерію оптимальності можна вибирати функціонал максимальних нормальних напружень [7].

При такому підході вихідна складна нелінійна задача оптимізації може бути значно спрощена за рахунок допущення про характер розподілу температури по товщині оболонки. В якості такого часто приймається допущення про кубічний закон розподілу температури за товщиною кожного складового оболонкового елемента, при якому з достатньою точністю описується характер зміни температури за товщинною координатою. При цьому задача оптимізації залишається нелінійною і може бути розв'язана тільки за використання числових методів теорії оптимізації. Методом побудови розв'язування сформульованих задач оптимізації може бути вибраний метод локальних варіацій (поетапної параметричної оптимізації) [8], причому для реалізації етапу пошуку умовного мінімуму вказаного вище функціоналу застосовний також методи безпосереднього пошуку при відомому розв'язку прямої задачі.

Розроблено розрахункову схему прямої задачі відповідної складової частини задачі оптимізації за напруженим станом режимів технологічного нагріву тонких скляних кусково-однорідних оболонок обертання, яка зводиться до визначення температурного поля

з відповідної задачі теплопровідності для кусково-однорідної оболонки, а також подальшого знаходження параметрів напружено-деформованого стану на основі співвідношень термопружності тонких оболонок при термочутливому коефіцієнті лінійного розширення матеріалу. При цьому крім представлення розподілу температури за товщинною координатою поліномом третього степеня використано метод сіток і найменших квадратів при кінцево-елементній апроксимації усередненої температури і температурного моменту [9]. Співвідношення термомеханіки кусково-однорідних оболонок класичної геометрії зведено до ключових рівнянь, розв'язок яких отримано в аналітичному вигляді [7].

Для таких оболонок запропоновано методика побудови початкового наближення функції керування, де вихідним є оптимальний тепловий режим для однорідної сферичної оболонки, коли в якості критерію оптимальності вибрано відповідний функціонал енергії пружної деформації оболонки за час тривалості нагріву [6]. На основі запропонованої методики розв'язано ряд задач оптимізації за напруженим станом режимів нагріву конкретних скляних кусково-однорідних оболонок класичної геометрії, зокрема, при наявності джерел тепла і силового навантаження, термочутливості допустимих напружень, опрацьовані окремі технології виготовлення і обробки елементів скляних виробів.

В якості прикладу приведена математична постановка і числово-аналітична методика розв'язування задачі оптимізації за напруженим станом режимів нагріву скляних кусково-однорідних циліндричних оболонок, що складаються з трьох різнорідних частин за залежності функції керування (якою є температура зовнішньої поверхні) лише від часу за різних теплових умов на внутрішній поверхні оболонок (теплоізоляція і теплообмін з внутрішнім середовищем). Числова реалізація розв'язку сформульованої задачі оптимізації здійснена на основі методів локальних варіацій і найменших квадратів при кінцево-елементній апроксимації функції керування. За побудованих режимів розтягуючі напруження виникають на етапі нагріву на внутрішній поверхні оболонки, а на етапі охолодження - на зовнішній поверхні. При цьому на внутрішній поверхні розрахунковими (найбільшими) є кільцеві, а на зовнішній – меридіональні. Розглянуті умови теплообміну на внутрішній поверхні оболонки не змінюють характеру розтягуючих напружень, а за природного конвективного теплообміну ($Bi \leq 0,1$) на внутрішній поверхні, напруження співпадають з аналогічними при теплоізоляції оболонки [7].

Література

1. ПУХ В. П.: Прочность и разрушение стекла. – Л.: Наука, 1973. – 156 с.
2. БАРТЕНЕВ Г. М.: Механические свойства и тепловая обработка стекла.-М: Стройиздат, 1960.-283с.
3. Стекло. Справочник / Под ред. д-ра техн. наук Н. М. Павлушкина. – М.: Стройиздат, 1973. – 487 с.
4. БАРАНОВСЬКИЙ В.И., ГУСЕВ Б.Н., ИВАНОВ В.Н. и др. Производство цветных кинескопов / Под. ред. В.И. Барановського. – М.: Энергия, 1978. – 368с.
5. ПОДСТРИГАЧ Я. С., КОЛЯНО Ю. М., СЕМЕРАК М. М.: Температурные поля и напряжения в элементах электровакуумных приборов.–Киев: Наук. думка, 1981.– 344 с.
6. ГРИГОЛЮК Э. И., ПОДСТРИГАЧ Я. С., БУРАК Я. И.: Оптимизация нагрева оболочек и пластин. – Киев: Наук. думка, 1979. -364с.
7. ГАЧКЕВИЧ О. Р., ГАЧКЕВИЧ М. Г., БУДЗ С. Ф.: Оптимізація за напруженим станом режимів нагріву скляних кусково-однорідних оболонок.–Львів: Ін-т прикл. проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2014–334с.
8. ЧЕРНОУСЬКО Ф. М., БАНИЧУК Н. В. Вариационные задачи механики и управления. – М.: Наука, 1973. – 225 с.
9. НОРРИ Д., ФРИЗ Ж.: Введение в метод конечных элементов.– М.: Мир, 1981.– 304 с.