

## ЗАЛИШКОВІ СТРУКТУРНІ НАПРУЖЕННЯ У СКЛЯНИХ ТІЛАХ

С. Ф. БУДЗ, Б. Д. ДРОБЕНКО, В. І. АСТАШКІН

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

За математичною моделлю для кількісного опису формування вільного об'єму у скляних тілах під час неоднорідного охолодження досліджено вплив параметрів процесу на розподіл залишкових структурних напружень у скляній пластині. Виявлено, що максимальні розтягальні напруження збільшуються з підвищенням температури, від якої починається охолодження, та швидкості охолодження.

**Ключові слова:** *скло, температура склування, залишкові структурні напруження, вільний об'єм.*

Під час виготовлення та термічної обробки у скляних виробках виникають напруження різного походження. Зміна міжатомних віддалей між частинками (молекулами, атомами) за неоднорідного нагріву та охолодження скляних тіл спричиняє тимчасові термічні напруження. За фіксації термічних деформацій під час склування виникають напруження, які називають гартувальними [1–4]. Час їх релаксації суттєво триваліший, ніж зміна температури тіла в точках склування. Окрім цих, внаслідок фіксації вільного об'єму тут виникають ще т. зв. структурні напруження [1]. (Вільний об'єм – це частка об'єму тіла, незаповнена скляною субстанцією (складники структури скла під час його формування не встигають зайняти такі просторові положення, за яких вони ідеально прилаштовуються одне до одного.) Їх спричиняють також відмінності у тривалостях релаксації процесів структуроутворення і теплоперенесення під час склування.

Таким чином, у скляному тілі існують тимчасові термічні напруження, зумовлені неоднорідним розподілом температури, і залишкові, спричинені як фіксацією деформацій під час склування, так і формуванням нерівноважної структури. Залишкові залежать від кінетичних параметрів процесу, зокрема градієнта температури (гартувальні напруження) і швидкості охолодження за температури склування, яка також залежить від швидкості охолодження [1]. Їх можна зняти тривалим відпалом за температур, нижчих за температуру склування [5]. При цьому варто враховувати, що швидкості релаксації гартувальних напружень і структури різні [5]. Залишкові, зумовлені фіксацією термічних напружень під час склування, релаксують значно швидше (приблизно у п'ять разів), ніж структура.

Структура скла впливає на напруження внаслідок неоднорідного розподілу вільного об'єму під час склування. Експериментально встановлені [1] залежності пружних характеристик скла від температури склування, яка функціонально пов'язана зі швидкістю охолодження і, відповідно, вільним об'ємом. Загалом термічні тимчасові напруження у склі є функцією параметрів термодинамічного стану системи, а залишкові залежать від градієнта деформацій під час склування і швидкості охолодження за цих же умов, тобто є функціоналами термомеханічного навантаження [2].

Зумовлені вільним об'ємом компоненти напруженого стану визначаємо за теорією тіл з внутрішніми змінними [6], на основі якої з урахуванням гіпотези про

---

*Контактна особа:* Б. Д. ДРОБЕНКО, e-mail: drobenko@ukr.net

локальну рівновагу запропоновано модель кількісної оцінки напружень  $\sigma_{ij}$ , що виникають при цьому. Вихідне фізичне співвідношення моделі має такий вигляд:

$$d\sigma_{ij} = 2\mu_0 de_{ij} + [\lambda_0 de_{kk} - (3\lambda_0 + 2\mu_0)(\alpha_g dT + \delta e_f + \delta e_0)]\delta_{ij}, \quad (1)$$

де  $\alpha_g$  – коефіцієнт лінійного термічного розширення;  $\mu_0, \lambda_0$  – пружні константи;  $e_{kk} = (e_{11} + e_{22} + e_{33})/3$ ;  $\delta e_f, \delta e_0$  – залишкові структурні й неструктурні деформації. Зауважимо, що співвідношення (1) можна записати у приростовій формі (без варіацій  $\delta e_f$  і  $\delta e_0$ ) тільки для вибраного шляху термічного навантаження, коли вдається встановити зв'язок між зміною вільного об'єму і параметрами процесу.

Кількісно оцінимо залишкові структурні напруження у вільній від силових навантажень плоско-паралельній скляній пластині за різних умов охолодження. Виберемо два типи навантаження: коли задана швидкість охолодження і конвективне охолодження різної інтенсивності, заданої через коефіцієнт  $\beta$  теплообміну пластини із довкіллям. Досліджували діапазон швидкостей охолодження  $10^{-2} \div 10^2$  K/s, оскільки відомі експериментальні результати про вплив швидкостей охолодження на температуру склування у цьому інтервалі. Напруження розраховували за припущення, що лінійні структурні деформації  $e_f = (f - f_0)/3$ , де  $f$  – вільний об'єм у вибраній точці тіла;  $f_0$  – мінімальне досяжне його значення у тілі за розглядуваних умов охолодження.

Задачу про визначення залишкових структурних напружень у пластині розв'язуємо за два етапи. На першому – крайову задачу теплопровідності за відповідних початкових і крайових умов. На основі отриманих розв'язків для кожної точки пластини будемо залежності температури  $T$  і швидкості охолодження від часу. Далі у кожній точці визначаємо температуру як функцію швидкості охолодження, яку разом із експериментально встановленою залежністю [1]

$$T_g^{-1} = c_1(1 - 0,03 \lg q) \quad (2)$$

( $T_g$  – температура склування;  $c_1$  – константа сорту скла;  $q$  – швидкість охолодження під час склування у вибраній точці тіла) використовуємо для пошуку фактичної температури склування  $T_g^*$  у довільній точці пластини (рис. 1). Знайшовши її, розподіл вільного об'єму встановлюємо так [1]:

$$f = T_g^* \Delta \alpha / 4, \quad (3)$$

де  $\Delta \alpha = \alpha_s - \alpha_l$  ( $\alpha_s, \alpha_l$  – лінійні коефіцієнти термічного розширення тіла у твердому та рідкому станах). Нагадаємо, що, крім запропонованої теоретико-експериментальної схеми, температуру склування та вільний об'єм у тілі можна визначити за відомим ітераційним способом [6].

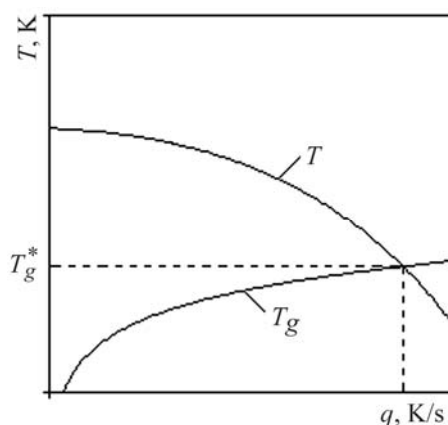


Рис. 1. Схема визначення температури склування  $T_g^*$  за залежністю фактичної температури процесу  $T_g$  від швидкості охолодження.

Fig. 1. Illustration of the glassing temperature  $T_g^*$  determination procedure using the dependence of temperature  $T_g$  on the cooling speed.

На другому етапі визначаємо напруження зі співвідношення (1), рівнянь рівноваги та сумісності деформацій. Функція вільного об'єму тут є функцією навантаження для рівнянь рівноваги за неоднорідного нагрівання тіла. Різниця полягає в тому, що після припинення термічного впливу на тіло тимчасові напруження зникають, а структурні фіксуються і залишаються незмінними.

З допомогою запропонованого підходу досліджували розподіли структурних напружень у скляній пластині за різних умов охолодження і початкової температури скла ( $T_0$ ), від якої воно починається. Обчислювали, не враховуючи вплив структури на пружні характеристики скла, за таких значень модуля Юнга  $E$ , коефіцієнта Пуассона  $\nu$ , коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$ , об'ємної теплоємності  $c$  та інших параметрів:  $E = 7 \cdot 10^4$  МПа;  $\nu = 0,22$ ;  $\lambda = 0,05$  Вт/м/К;  $c = 123$  кДж/м<sup>3</sup>/К;  $c_1 = 119 \cdot 10^{-5}$  1/К;  $\Delta\alpha = 12 \cdot 10^{-5}$  1/К. Виявили, що зі зростанням швидкості охолодження температура склування підвищується (рис. 2 та табл. 1).

**Таблиця 1. Температура (К) склування на зовнішній і серединній поверхнях пластини за різних швидкостей охолодження**

$q$ , К/с	1/6	1/3	1/2	1	5	50	100
Усередині	821,11	828,00	831,63	837,13	852,17	858,35	860,97
На поверхні	821,17	828,48	832,82	840,34	858,33	885,47	893,97

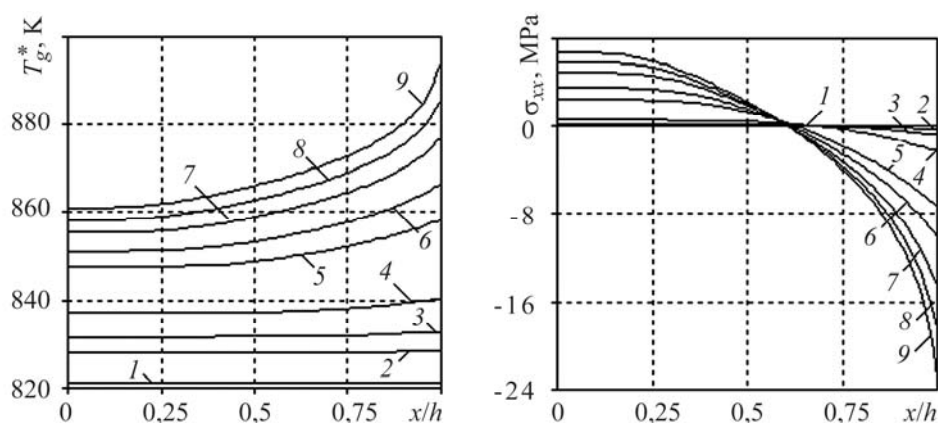


Рис. 2. Розподіл температури склування та напружень у пластині товщиною 20 mm за швидкостей охолодження 1/6 К/с (1); 1/3 (2); 1/2 (3); 1 (4); 5 (5); 10 (6); 25 (7); 50 (8) та 100 (9) К/с (початкова температура 900 К).

Fig. 2. The glassing temperature and stress distribution in the plate of 20 mm thickness for cooling speeds 1/6 K/s (1), 1/3 (2), 1/2 (3), 1 (4), 5 (5), 10 (6), 25 (7), 50 (8) and 100 (9) K/s (initial temperature is 900 K).

Структурні напруження стискальні у приповерхневих зонах пластини і залежать від швидкості охолодження. Абсолютні значення максимальних розтягальних напружень приблизно втричі менші, ніж стискальних. За заданих умов охолодження напруження розтягу на серединній поверхні пластини становлять 0÷20% від границі міцності скла. Зі збільшенням початкової температури, коли задана швидкість охолодження, абсолютні значення і максимальних стискальних, і розтягальних напружень зменшуються (рис. 3).

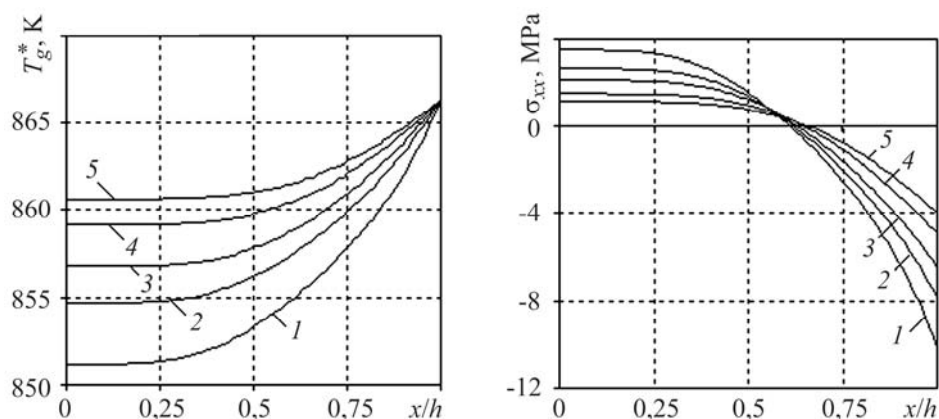


Рис. 3. Розподіл температури склування й напружень у пластині товщиною 20 mm для початкових температур 900 K (1); 950 (2); 1000 (3); 1100 (4) та 1200 K (5);  $q = 10$  K/s.

Fig. 3. The glassing temperature and stress distribution in the plate of 20 mm thickness for initial temperatures: 900 K (1); 950 (2); 1000 (3); 1100 (4) and 1200 K (5);  $q = 10$  K/s.

Виявили, що зі збільшенням товщини, коли задані швидкості охолодження, максимальні залишкові напруження зростають (рис. 4), що також характерно і для тимчасових чи гартувальних.

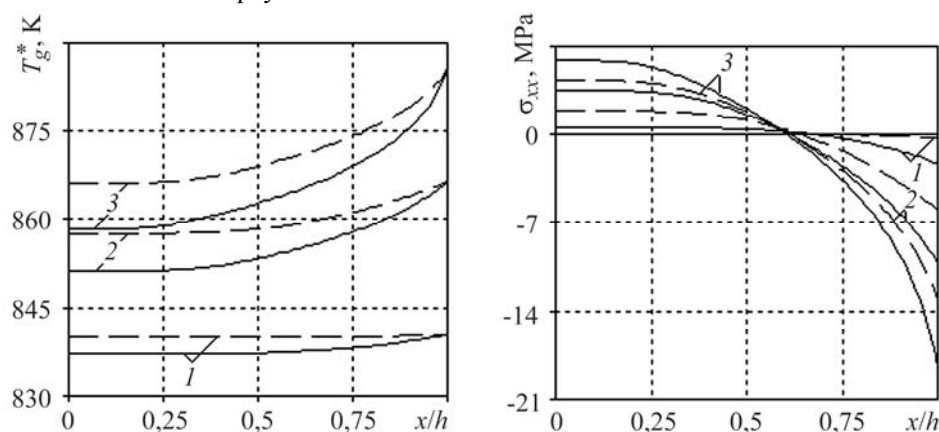


Рис. 4. Розподіл температури склування та напружень у пластинах товщиною 10 (штрихові лінії) і 20 mm (суцільні) за швидкостей охолодження 1 (1); 10 (2) і 50 (3) K/s (початкова температура 900 K).

Fig. 4. The glassing temperature and stress distribution in the plate of 10 thickness (dashed lines) and 20 mm (solid) for cooling speeds 1 (1), 10 (2), 50 (3) K/s (initial temperature is 900 K).

Встановили, що з підвищенням інтенсивності конвективного охолодження стискальні напруження на поверхні зростають набагато більше, ніж максимальні розтягальні на серединній поверхні (рис. 5). Результати про вплив коефіцієнта теплообміну на температуру склування пластини наведено у табл. 2.

**Таблиця 2. Температура (K) склування на зовнішній і серединній поверхнях пластини за різних коефіцієнтів тепловіддачі**

$\beta$ , Wt/m <sup>2</sup> /K	10	30	50	100	200
Усередині	854,92	860,81	862,12	863,18	863,74
На поверхні	889,84	904,44	918,89	940,92	953,01

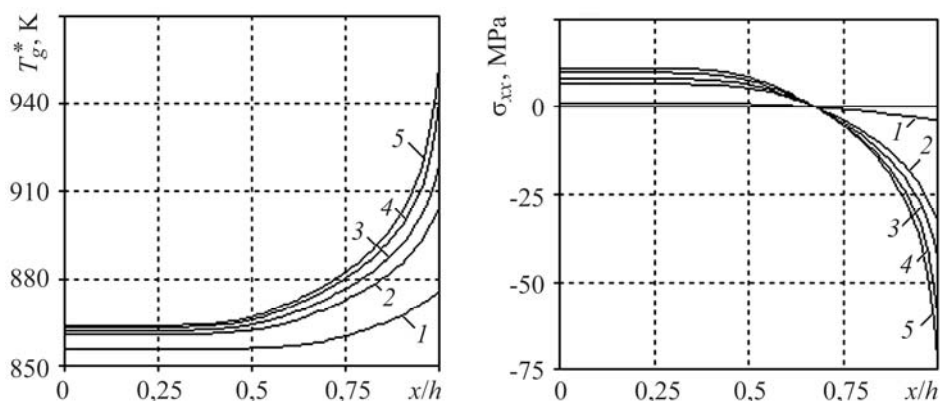


Рис. 5. Розподіл температури склування та напружень у пластині товщиною 20 mm для коефіцієнта тепловіддачі 10 (1); 30 (2); 50 (3); 100 (4) і 200 (5)  $Wt/m^2/K$  (початкова температура 1200 K).

Fig. 5. The glassing temperature and stress distribution in the plate of 20 mm thickness for heat exchange coefficient 10 (1); 30 (2); 50 (3); 100 (4) and 200 (5)  $Wt/m^2/K$  (initial temperature is 1200 K).

## ВИСНОВКИ

Встановили, що співвідношення розмірів зон стиску і розтягу за гартувальних і структурних напружень приблизно однакове (3:5), однак, у нашому випадку існує зона, де розтягальні напруження змінюються слабо. Абсолютні значення максимальних гартувальних напружень стиску удвоє більші, ніж розтягальних. Загалом структурні напруження у 4–5 разів менші, ніж гартувальні, що є кількісною оцінкою гіпотези, сформульованої раніше [1]. Їх слід враховувати у розрахунках міцності скловиробів, особливо за наявності зовнішніх кінематичних обмежень, коли навіть за відносно невеликих швидкостей охолодження вони можуть суттєво збільшуватись [6].

**РЕЗЮМЕ.** С помощью математической модели для количественного описания формирования свободного объема в стеклянных телах при неоднородном охлаждении исследовано влияние параметров процесса на распределение остаточных структурных напряжений в стеклянной пластине. Выявлено, что максимальные растягивающие напряжения увеличиваются при повышении температуры, от которой начинается охлаждение, а также скорости охлаждения.

**SUMMARY.** The model for the quantitative description of the free volume formation under non-homogenous cooling is used for research of the processes parameter influence on the residual structural stresses distribution in the glass plate. Maximal tensile and compressive stresses increase with rising the cooling temperature and also the cooling speed.

1. Сандитов Д. С., Бартечев Г. М. Физические свойства неупорядоченных структур. – Новосибирск: Наука, 1982. – 248 с.
2. Бартечев Г. М. Механические свойства и тепловая обработка стекла. – М.: Госстрой, 1960. – 166 с.
3. Шульц М. М., Мазурин О. В. Современные представления о строении стекол и их свойствах. – Л.: Наука, 1988. – 200 с.
4. Дяківський С. І., Жеплинський Т. Б., Яцишин Й. М. Термічне оброблення напружень у склі. – Львів: Львівська політехніка, 2003. – 194 с.
5. Производство цветных кинескопов / Под общ. ред. В. И. Барановского. – М.: Энергия, 1978. – 368 с.
6. Будз С., Асташикін В., Будз І. Методика визначення та кількісна оцінка напруженого стану скляних тіл // машинознавство. – 2009. – № 10. – С. 21–24.

Одержано 19.12.2011