

Апробацію розробленого режиму випалу планується здійснити на Жовківському цегельному заводі. Випал блоків здійснений раніше на заводі за діючим режимом без врахування фізико-хімічних процесів, які відбуваються в матеріалі, спричинив випуск бракованої продукції.

1. Бурмистров В.Н., Шлыков А.В., Варшавская Д.А., Петрова Г.И. Особенности процесса обжига стеновых керамических изделий из отходов углеобогащения /Технология строительной керамики и искусственных пористых заполнителей/ Сб. трудов ВНИИстром. – М.: ВНИИстром, 1974. – Вып. 29/57. – С.3–14. 2.Ралко А.В., Городов В.С., Зинько Ю.Д., Кравцов И.Я. Термодинамические и термографические исследования процессов обжига керамики. – К.: Вища. школа, 1980. –184 с.

УДК 621.78(075.8)

Т. Б. Жеплинський, С.І. Дяківський, М. Я. Головчук
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра хімічної технології силікатів

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РЕЛАКСАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ У ЗАГАРТОВАНОМУ ЛИСТОВОМУ СКЛІ

© Жеплинський Т. Б., Дяківський С.І., Головчук М. Я., 2007

Створено математичну модель, що описує процес відносної релаксації напружень у загартованому склі. Модель перевіряли на зразках листового скла завтовшки 12,7 мм при температурах 350 – 450°C. Встановлено, що релаксація напружень визначається модулем зсуву скла з врахуванням його температурної залежності.

The mathematical model that describes the process of relative relaxation of tension in hardened glass had been created. The model was checked with the help samples of sheet glass with 12.7 mm thickness at the temperature 350 – 450°C. It is found that relaxation of tension is determined by the module of displacement of glass with its temperature dependence taken into account.

Постановка проблеми. Релаксація – властивість матеріалу розсіювати внутрішні напруження за рахунок теплового руху молекул. Тимчасові напруження виникають під час нагрівання і охолодження скла внаслідок нерівномірного температурного поля в об’ємі виробу, і зникають у разі вирівнювання температури. Напруги, які залишаються в склі після вирівнювання температури, називаються постійними.

Під час виробництва сортового посуду, листового скла, електротехнічного скла і особливо оптичного скла важливою стадією виробництва є стадія відпалу виробів, що забезпечує довговічність їх експлуатації. Однак для підвищення механічної міцності у виробках спеціально створюють рівномірні залишкові напруження, цей процес називається гартуванням. Під час експлуатації таких виробів в умовах підвищених температур можливі значні релаксації залишкових напружень, що зумовлює втрати експлуатаційних властивостей виробу.

Для оптимізації процесу відпалу, зниження затрат часу і енергії на відпал скляних виробів, а також для прогнозування зміни властивостей гартованих виробів під час експлуатації при підвищених температурах набуває надзвичайного значення питання створення адекватної математичної моделі релаксації напружень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Матиматичний опис кривих, які виражають зв’язок між відносною зміною напружень і часом релаксації, запропоновані різними дослідниками зумовлюють різний ступінь наближення теорії до експерименту. Один з перших законів релаксації сформулював Максвелл :

$$\sigma \frac{d\sigma}{dt} = -\frac{\sigma}{\tau} \quad \sigma = \sigma_0 e^{-t/\tau}, \quad (1)$$

де σ – напруження в конкретний момент часу; σ_0 – початкові напруження; t – час; τ – час, за який напруження зменшуються в e разів.

Згідно з Максвеллом напруження в склі з часом змінюються експоненціально, причому швидкість їх зменшення пропорційна початковим напруженням. Однак експериментальні дані істотно розходяться з законом Максвелла. Це пов'язано зі зміною інших властивостей скла (насамперед в'язкості) під час ізотермічної обробки в області температур склування.

Існують інші залежності, які широко застосовують на практиці для визначення параметрів відпалу скла. Наприклад, методика розрахунку відпалу скла за методом Адамса і Вільямсона, які запропонували такі формули для опису релаксації напружень:

$$d\sigma = -A\sigma^2 dt; \quad \frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\sigma_0} = At, \quad (2)$$

де σ – напруження в конкретний момент часу; σ_0 – початкові напруження; t – час; A – стала.

Метод, оснований на використанні цих формул, дає не надто точні результати, які, з деяким наближенням, можна застосовувати для підбору параметрів відпалу скла. Однак цей метод не придатний для розрахунку релаксації напружень у гартованому склі.

Загальну формулу для опису релаксації запропонував Ліллі, він виразив відносну релаксацію як функцію в'язкості і модуля зсуву.

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{G\sigma}{\eta(t)}; \quad \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = -\int_0^t \frac{G dt}{\eta(t)}, \quad (3)$$

де σ – напруження в конкретний момент часу; σ_0 – початкові напруження; t – час; G – модуль зсуву; η – в'язкість

Частковим варіантом цієї формули є залежність Ізарда і Дугласа, де припускається, що $\eta(t) = \eta_0 + at$, враховуючи це, вона має вигляд

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{G\sigma}{\eta_0 + at}; \quad \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\sigma_0} \left(1 + \frac{at}{\eta_0} \right) \frac{G}{a}, \quad (4)$$

де σ – напруження в конкретний момент часу; σ_0 – початкові напруження; t – час; G – модуль зсуву; η – в'язкість; a – стала.

Автори [5] запропонували математичну модель відпалу для розрахунку на ЕОМ, яка здатна з достатньою точністю відобразити процес релаксації. Однак її застосування пов'язане з використанням складного математичного апарата і визначенням великої кількості констант; крім того ця модель недостатньо мірою враховує вплив хімічного складу скла на процес релаксації.

Мета роботи. Дослідити процес релаксації напружень у гартованому склі. Перевірити існуючі формули, встановити параметри, які впливають на швидкість і ступінь релаксації, і вивести формулу, яка враховує вплив хімічного складу скла.

Експериментальні дослідження релаксації гартувальних напружень проводили на зразках (пластинах) розміром 100x100 мм різної товщини із скла складу, мас. %: SiO₂-72,3, Al₂O₃-2,4, Fe₂O₃ - 0,1, MgO – 3,6, CaO – 7,8, Na₂O – 9,8, K₂O – 4,0, SO₃ – 0,2. Зразки формували методом пресування. Для забезпечення можливості вимірювань напружень з двох протилежних торчаків зразки шліфували і полірували.

Гартування зразків проводили за режимами: температура гартування – 700±2°C, тривалість нагрівання 30 с на 1 мм товщини зразка; охолодження – повітрям. Величина ступеня гартування $\Delta\sigma$ для різних товщин скла під час охолодження повітрям за тиску 1,2 кПа показана на рис. 1, з якого видно, що із збільшенням товщини за однакової інтенсивності охолодження ступінь гартування зростає.

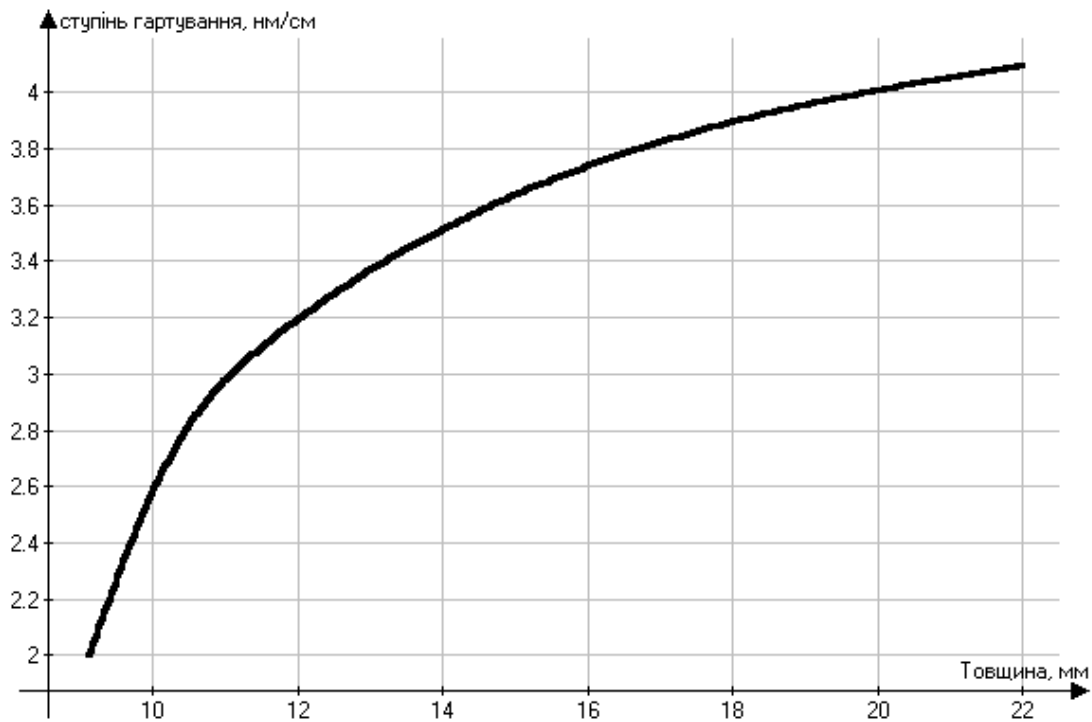


Рис. 1. Залежність ступеня гартування від товщини скла

Після гартування і визначення напружень Δ_0 у склі для дослідження їх релаксації, зразки ставили у попередньо нагріту до заданої температури піч-термостат. Після витримки зразки виймали з печі і охолоджували на повітрі до кімнатної температури з подальшим визначенням у них залишкових напружень, Δ_t і розрахунком відносної релаксації Δ_t/Δ_0 .

На релаксацію гартувальних напружень у склі впливають такі чинники: температура, тривалість термічного оброблення скла і величина початкових напружень.

На релаксацію напружень значною мірою впливає тривалість термічного оброблення гартованого скла (рис. 2). Для кожної температури спостерігається граничне значення тривалості термічного оброблення, після якого релаксація майже припиняється. Зокрема за температури 300°C релаксація припиняється після 120 хвилинного термічного оброблення. Отже, за певної температури і тривалості термічного оброблення настає певна стабілізація відношення Δ_t/Δ_0 , це також підтверджується літературними даними [2].

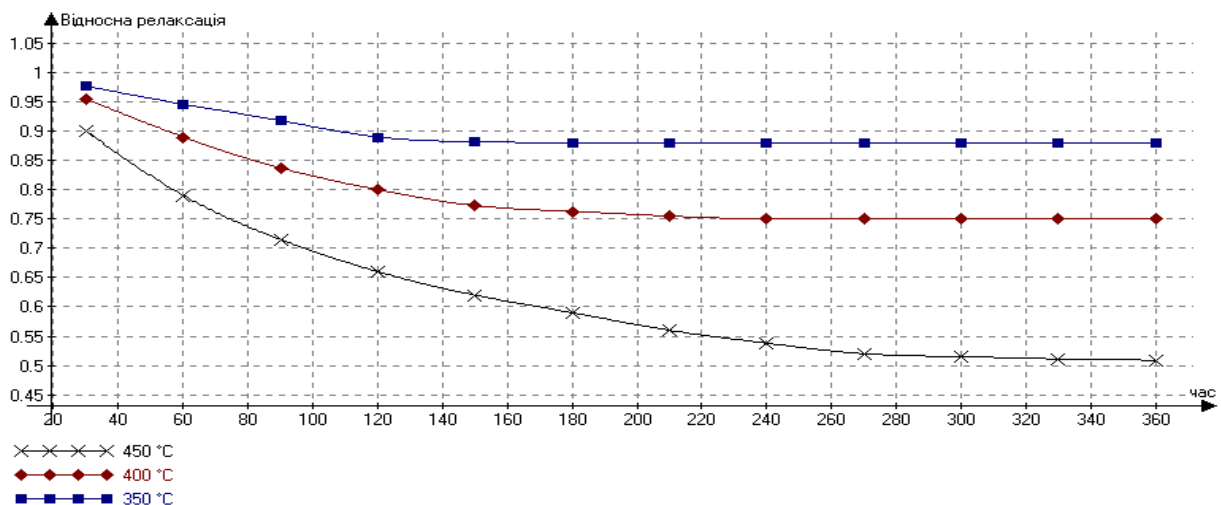


Рис. 2. Залежність відносної релаксації від часу при різних температурах

Була проведена перевірка відповідності моделі Максвелла експериментальним даним, що показала істотні розбіжності теорії з практикою, основним недоліком цієї моделі є те що вона передбачає повну релаксацію напружень при ізотермічній витримці, яка на практиці не спостерігається. Цей недолік моделі Максвелла не можна усунути введенням в формулу додаткових констант чи множників, що спричиняє обмеження в її застосуванні.

У певному інтервалі експериментальні точки описуються поліномом загального вигляду

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = A_1 \cdot t + A_2 \cdot t^2 + A_3 \cdot t^3 + \dots + A_n \cdot t^n. \quad (5)$$

Для адекватного опису експериментальних даних достатньо застосовувати поліном сьомого порядку, всі чисельні значення констант були визначені. Однак крім обмеження за інтервалом застосування поліному також викликає труднощі визначення фізичної суті множників через їхню велику кількість і гранично мале значення для вищих показників степенів.

Найвдалішою є логарифмічна залежність, основною відмінністю якої від літературних залежностей є те, що під логарифмом знаходиться температура, а не напруження, загальний її вигляд

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = K \frac{1}{\ln t} + M. \quad (6)$$

Числові значення множників були знайдені за методом найменших квадратів, аналіз цієї залежності показав адекватність відображення експериментальних даних. Дисперсія знаходиться в межах 0,01–0,02. Загальний характер кривої відповідає характеру зміни експериментальних даних. Значення коефіцієнтів для різних температур наведені в таблиці і на рис. 3.

Значення констант K і M у формулі (6)

температура	K	M
350	0,877371	0,719283
400	1,817711	0,425912
450	3,42157	-0,07309

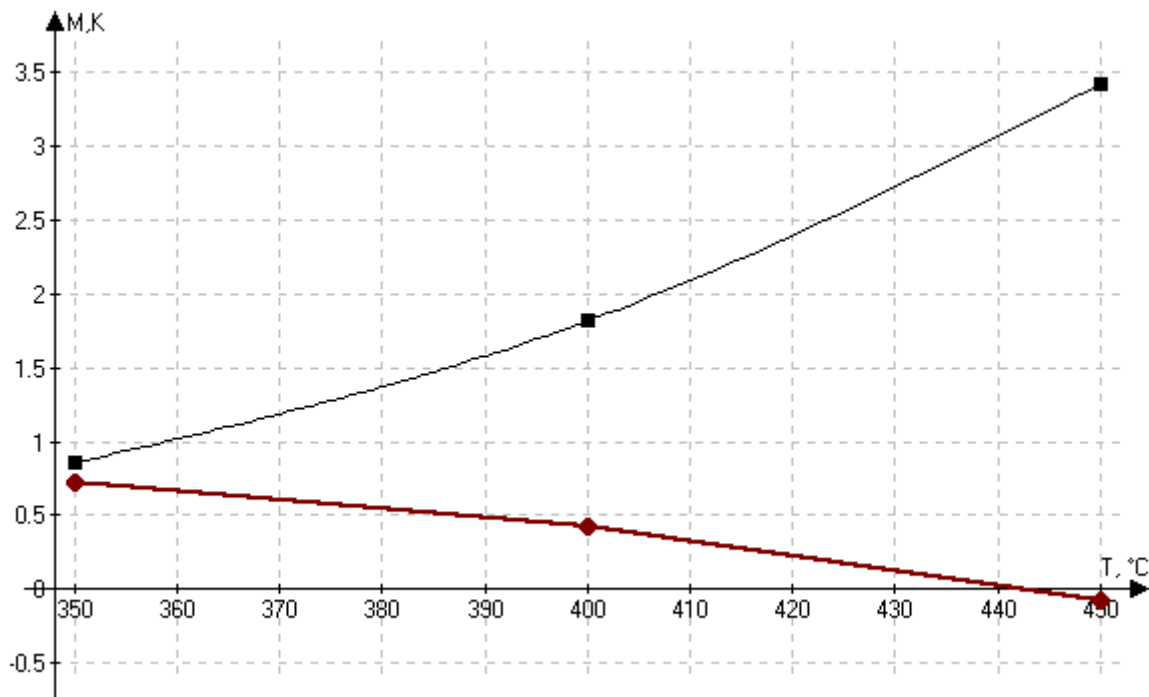


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів K і M від температури (■ – коефіцієнт K; ● – коефіцієнт M)

На наступному етапі досліджень здійснювали аналіз кореляції між одержаними коефіцієнтами і параметрами, які залежать від хімічного складу і температури. Зокрема розраховували температурні залежності густини, теплоємності, теплопровідності, модуля пружності і модуля зсуву за методиками, наведеними в [1,3]. Аналіз здійснювали методом побудови графічних залежностей досліджуваних параметрів і подальшим їх накладанням і суміщенням. Під час дослідження були виділені такі параметри, як модуль пружності, модуль зсуву і теплоємність. Аналіз проводили окремо для кожної залежності коефіцієнта від температури. Було встановлено, що найадекватніше обидва коефіцієнти описуються модулем зсуву з введенням у вираз поправкових коефіцієнтів. Внаслідок досліджень встановлено такі вирази для коефіцієнтів:

$$K = \frac{2792}{G} - 107;$$

$$M = \frac{-868}{G} + 34.$$

При цьому загальний вираз для релаксації набуває вигляду

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{2792}{G} - 107 \right) \cdot \frac{1}{\ln \tau} - \frac{868}{G} + 34.$$

Висновки. Встановлено, що релаксація напружень визначається модулем зсуву скла з врахуванням його температурної залежності. Отримана модель потребує доопрацювання після дослідження зразків скла іншої товщини та хімічного складу.

1. Термічне оброблення і напруження у склі: Підручник / С. І. Дяківський, Т. Б. Жеплинський, Й. М. Яцишин; За ред. Й. М. Яцишина. – Львів Вид-во Нац. у-ту “Львівська політехніка”. 2003. – 196 с. 2. Химическая технология стекла и ситаллов: Учебник для вузов / М. В. Артамонова, М. С. Асланова, И. М. Бужинский и др.; Под ред. Н. М. Павлушкина. – М.: Стройиздат, 1983. – 43 с. 3. Справочник по производству стекла. Т. 2. / Под ред. И. Н. Китайгородского, С. Н. Сильвестровича. – М.: Стройиздат, 1963.— 815 с. 4. Расчеты по химии и технологии стекла: Справочное пособие. / М. А. Матвеев, Г. М. Матвеев, Б. Н. Френкель – М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. – 238 с. 5. Лалыкин Н.В., Мазурин О.В. Математическая модель процесса отжига листового стекла // Стекло и керамика. – 1984. – №1. – С.13–15. 6. Лиознянская С.Г., Бартнев Г.М. Исследование релаксации в закаленных стеклах при высоких температурах // Стекло – 1957. – №1. – С. 18–22.