

ДИНАМІКА УТВОРЕННЯ ГАРТУВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ У СКЛІ ТА ЇЇ МОДЕЛЮВАННЯ

© Жеплинський Т. Б., 2018

Досліджено особливості динаміки утворення напружень у склі під час його гартування. Зроблено спробу пояснити, як температура та інтенсивність гартування впливають на особливості зміни вигляду епюри гартувальних напружень у часі. Виявлено, що основним чинником, який впливає на цей процес, є динаміка зміни температури поверхневих та внутрішнього шарів у склі. Коли значення температури перевищують межу температури склування, відбувається стрибкоподібна зміна модуля пружності та ТКЛР скла. Накладання величини модуля пружності, температурної деформації та градієнта температур у склі призводить до того чи іншого вигляду гартувальної епюри. Спроба математичного моделювання динаміки цього процесу дала наближені до реальних результати зміни поверхневих напружень у склі під час гартування.

Ключові слова: листове флоат-скло, гартування, епюра напружень, модуль пружності, температурна деформація.

Т. В. Zheplynskyy

DYNAMICS OF RESIDUAL STRESS FORMATION IN GLASS AND ITS MODELING

© Zheplynskyy T. B., 2018

The features of dynamics of stress formation in glass during its tempering were investigated. The attempt was made to explain how the temperature and intensity of tempering affect the features of residual stress distribution change in time. The main factor that has an influence on this process is the dynamics of temperature changes of surface and internal layers in glass. At the same time, when the temperature reaches the glass transition one, there is a jump-like change in the elastic modulus and coefficient of linear expansion of glass. Overlaying of elasticity modulus, temperature deformation and temperature gradient in glass leads to one or another form of residual stress distribution diagram. An attempt of mathematical modeling of the dynamics of this process gave approximate results of the change of surface stresses in glass during its tempering.

Key words: float glass, tempering, residual stress distribution diagram, modulus of elasticity, temperature deformation.

Постановка проблеми. Останнім часом все ширше застосовується гартоване скло. Сфера його застосування охоплює не лише засклення будівельних чи транспортних вікон, а й встановлення у вигляді прозорої підлоги, сходів чи бокових перегородок. Попри щораз ширше промислове застосування процесу термічного зміцнення скла, вивчення його особливостей

зупинилося на рівні другої половини минулого століття [1–3] і протягом останніх 20 років майже не публікуються статті з проблеми дослідження механізму та математичного моделювання процесу гартування скла.

Гартування полягає у нагріванні скляного виробу до певної критичної температури з подальшим швидким та рівномірним охолодженням його поверхні [4]. Це – складний фізичний процес, знання якого дає змогу ефективно використовувати властивості скла і раціонально організувати технологічний процес його зміцнення. Детальне дослідження особливостей цього процесу, зокрема динаміки зміни гартувальних напружень під час охолодження скла, дасть змогу раціональніше використовувати енергоресурси, необхідні для гартування, і значно зменшити відсоток браку в готовій продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основну працю з дослідження динаміки зміни гартувальних напружень у склі опублікував майже 40 років тому американський дослідник Р. Гардон, подавши результати кінематографування зміни епюри гартувальних напружень під час охолодження скла, нагрітого до різних температур та з різною інтенсивністю [3]. За допомогою кінокамери щосекунди фіксували епюри напружень, що виникають під час охолодження скла. Такі напруження Р. Гардон назвав перехідними.

Недоліком цієї публікації є відсутність наукових коментарів щодо особливостей поведінки вигляду епюр під час гартування скла.

Спробу наукового аналізу наведених у роботі Р. Гардона результатів зробили автори [5]. Окрім посекундного опису стадій охолодження, вони звернули увагу на горизонтальну ділянку, що виникає під час високотемпературного охолодження скла. Її появу пов'язали із наявністю пластичної серцевини у склі.

Однак характерною особливістю обох публікацій є відсутність математичної моделі, яка описувала б цей процес.

Метою роботи є дослідження природи утворення гартувальних напружень у склі та спроба здійснити математичне моделювання динаміки утворення залишкових напружень на поверхні гатованого скла.

Виклад основного матеріалу й обговорення результатів. У роботі використано листове 6 мм флоат-скло виробництва фірми SaintGobain. Флоат-скло характеризується наявністю рівномірно поширених по всій поверхні напружень 30 нм/см (0,05 пор/см). Хімічний склад зразків наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад зразків скла, мас. %

| SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | MgO | CaO | Na ₂ O | SO ₃ |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-------------------|-----------------|
| 71,08 | 0,07 | 0,56 | 4,20 | 9,7 | 14,03 | 0,36 |

Для гартування нарізали зразки скла розміром 100×25×6 мм. Ці зразки після нагрівання у муфельній печі до температури 650 °С гартували, обдуваючи повітрям. За допомогою цифрової камери здійснювали фільмування вигляду гартувальних епюр і величини температури внутрішнього та поверхневого шарів скла.

Перш ніж звернутися до останніх експериментально отриманих результатів, проаналізуємо дані, наведені у статті Р. Гардона, отримані під час охолодження скла, нагрітого до температур $T_0 = 648$ °С (рис. 1, а) і $T_0 = 737$ °С (рис. 1, б).

Із наведених даних (рис. 1) видно, що перехідні напруження, що утворилися протягом перших 10 с охолодження, зовсім невеликі порівняно з кінцевими напруженнями гартування, які з'являються на 16, 18, 20 с охолодження. У перші 2 с охолодження в поверхневих шарах скла

виникають напруження розтягу, і лише після цього вони змінюють знак і на z с утворюються поверхневі напруження стиску.

Необхідно зазначити, що це явище (зміна знака напружень) спостерігається лише тоді, коли температура гартування менша, ніж температура T_f , або ж коли інтенсивність охолодження скла висока. Коли ж інтенсивність охолодження невисока, і температура є більшою, ніж T_f , на перших секундах охолодження взагалі не утворюються ніякі напруження, а потім у поверхневих шарах починають поступово виникати напруження стиску. Назвемо гартування у першому випадку низькотемпературним гартуванням, а у другому – високотемпературним. Обидва ці випадки досліджував Р. Гардон.

Розглянемо спочатку випадок високотемпературного гартування (рис. 1, б).

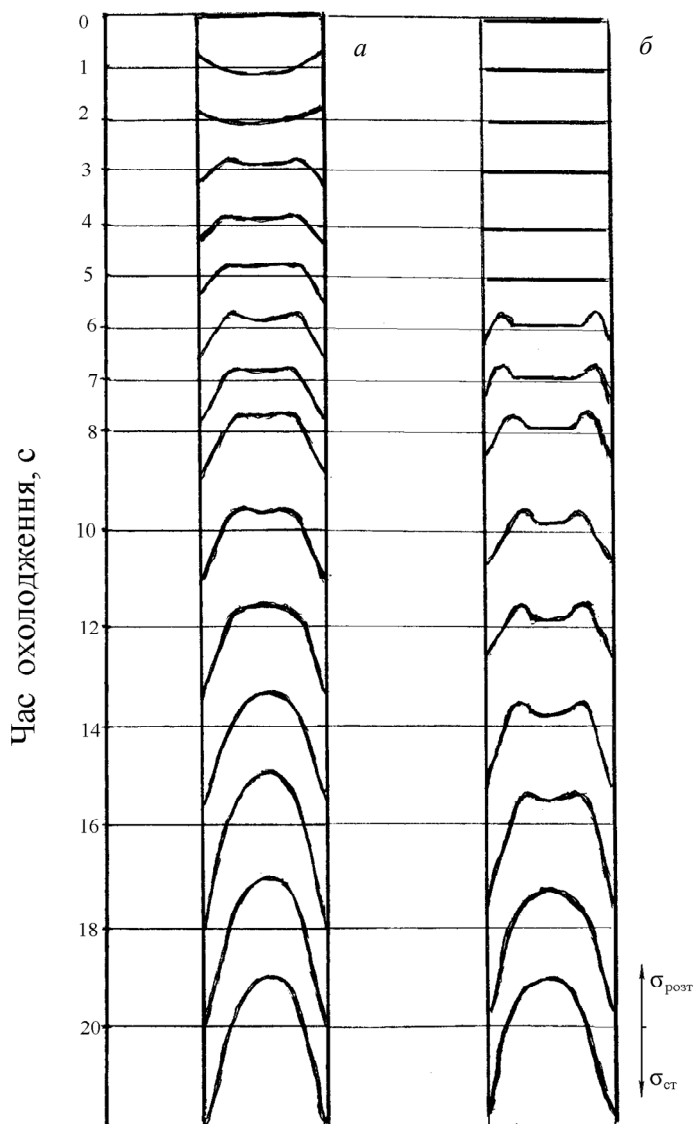


Рис. 1. Динаміка зміни епюри напружень у скляних пластинах (за Р. Гардоном)
під час охолодження від початкових температур $T_0 = 648\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) і $T_0 = 737\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б)

Як вказано вище, на початку процесу охолодження знижується температура лише поверхневих шарів. Це супроводжується їхнім скороченням, що для пружного тіла призвело б до виникнення на поверхні тимчасових напружень розтягу. Їх величина була б пропорційна до різниці температур між поверхнею і середнім шаром у склі. Однак у цьому випадку (високотемпературне

охолодження) середній шар у пластичному стані, тому його деформація, що відбувається під час зменшення поверхневих шарів, не призводить до виникнення напружень (рис. 1, б, 1–5 с охолодження).

У випадку низькотемпературного охолодження, коли початкова температура скла менша, ніж T_f , і більша за T_g , деформація внутрішнього шару супроводжується виникненням незначних напружень стиску, а на поверхні виникають напруження розтягу (рис. 1, а, 1–2 с охолодження). Ці напруження незначні, тому що за температур, вищих, ніж T_g , значення модуля пружності скла невелике [6].

У певний момент часу починає знижуватись температура внутрішнього шару, а це супроводжується наростанням пружних властивостей і стрибкоподібним зменшенням міжмолекулярних відстаней. В цей момент, у випадку високотемпературного гартування (рис. 1, б, 6 с охолодження) на поверхні починають з'являтися напруження стиску (перед тим напружень не було взагалі). У разі низькотемпературного гартування в цей момент (рис. 1, а, 3-я с охолодження) напруження змінюють свій знак. Раніше міжмолекулярні відстані у середньому шарі були більшими, ніж у поверхневому, і тому цей шар був стиснутий, а тепер відстані зменшилися і на поверхні виникли напруження розтягу.

Потрібно зазначити, що під час охолодження скла відбувається зменшення як середнього, так і поверхневих шарів. Однак у цьому взаємному зменшенні переважає скорочення середнього гарячішого шару, диференційні значення ТКЛР якого більші [7]. Коли величина скорочень обох шарів зрівняється, напруження досягають кінцевого значення і перестануть збільшуватись (16 с і 18 с відповідно).

Результати експериментальних досліджень, проведених у лабораторії скла Львівської політехніки, подібні до результатів Р. Гардона, але доповнені кінематографуванням зміни температури зовнішнього та внутрішнього шарів скла, нагрітого до температури 650 °C (рис. 2).

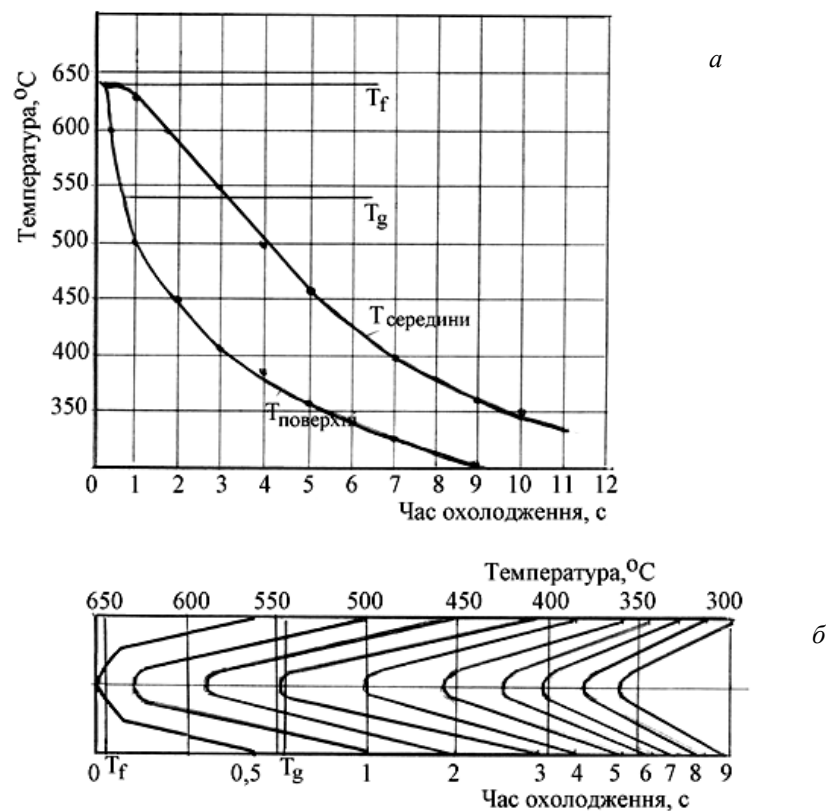


Рис. 2. Зміна температури під час охолодження скляної пластини:
а – графік зміни температур середнього і поверхневих шарів; б – епюри розподілу температур

Дослідження динаміки зміни температури шарів скла (рис. 2) показали, що у початковий період температура всіх шарів скла однакова і відповідає температурі пом'якшення скла (в цьому випадку 650 °С). Протягом 0,5 с охолодження температура поверхневих шарів скла знижується до 570 °С, а температура середнього шару все ще залишається на рівні температури T_f . Напруження у склі майже не утворюються, тому що середній шар скла в пластичному стані. На першій секунді охолодження температура цього шару стає нижчою, ніж T_f , але вищою за T_g , а ТКЛР при цьому зростає. Це призводить до більшого скорочення цього шару і утворення у ньому напружень розтягу. На поверхні утворюються напруження стиску. Протягом 1–3 с охолодження відбувається подальше формування напружень стиску на поверхні скла і напружень розтягу в середньому шарі. Після 3 с охолодження, коли усі шари скла за температури, нижчої від T_g , значення ТКЛР істотно менше (рис. 1, 2), тому подальше наростання напружень у склі незначне і з часом припиняється зовсім.

На підставі наведених вище результатів автор зробив спробу розрахувати величину напружень, що утворюються у часі в середньому та поверхневих шарах скла. Для розрахунку використано такі формули:

$$s_1 = \frac{2s \cdot a_2}{a_1 + a_2} \quad (1) \quad s_2 = \frac{2s \cdot a_1}{a_1 + a_2} \quad (1)$$

$$s = 0,5 \cdot \left(\frac{E_1 \cdot a_1 \cdot \Delta T_1}{1 - m_n} + \frac{E_2 \cdot a_2 \cdot \Delta T_2}{1 - m_n} \right) \quad (2)$$

де σ – середньозважене напруження; σ_1, σ_2 – реальне напруження шару 1 і 2; a_1, a_2 – товщина шару 1 і 2; E_1, E_2 – модуль пружності скла, шару 1 і 2; μ_1, μ_2 – коефіцієнти Пуассона скла, шару 1 і 2; α_1, α_2 ТКЛР скла шару 1 і 2; $\Delta T_1, \Delta T_2$ – різниця температур під час охолодження шару 1 і 2.

Під час розрахунків половину товщини скла умовно розділили на два шари: поверхневий та внутрішній. Товщина поверхневого шару 0,27 і внутрішнього 0,73 умовних одиниць [5]. Прийняте для розрахунку значення коефіцієнта Пуассона – 0,221 [6].

Таблиця 2

**Вихідні дані та результати розрахунку величини напружень,
що виникають під час гартування скла**

| Час, с | Температура, °С | | | Модуль Юнга, МПа | | ТКЛР·10 ⁷ , град ⁻¹ | | Середні напру- ження, МПа | Миттєві напруження у шарах, МПа | | Сумарні перехідні поверхневі напруження, МПа |
|-----------|-----------------|----------|---------|---------------------|----------|---|----------|------------------------------|---------------------------------------|----------|--|
| | Поверхня | Середина | Різниця | Поверхня | Середина | Поверхня | Середина | | Поверхня | Середина | |
| 0 | 650 | 650 | 0 | 0 | 0 | 120 | 120 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,2 | 600 | 650 | 50 | 13959 | 0 | 120 | 120 | 5 | 8 | -3 | 8 |
| 0,6 | 545 | 640 | 95 | 45769 | 975 | 285 | 285 | 46 | 67 | -25 | 75 |
| 1 | 500 | 620 | 120 | 63930 | 8442 | 85 | 285 | 19 | -27 | 10 | 48 |
| 3,2 | 400 | 545 | 145 | 64860 | 39276 | 85 | 285 | 89 | -130 | 48 | -82 |
| 7 | 300 | 420 | 120 | 66007 | 64433 | 85 | 85 | 80 | -117 | 43 | -199 |
| 13 | 200 | 250 | 50 | 66966 | 66118 | 85 | 85 | 98 | -143 | 53 | -342 |
| 16 | 180 | 180 | 0 | 67474 | 67269 | 85 | 85 | 33 | -48 | 18 | -342 |

Розрахунок виконано для окремих відрізків часу, що відповідали температурі поверхневого шару (°С): 650; 600; 545; 500; 400; 300; 200. Розраховано миттєві напруження, що виникають у склі в певний відрізок часу, а також перехідні поверхневі напруження, які є результатом підсумування миттєвих напружень із напруженнями, що виникли перед тим.

Одержані результати розрахунку (табл. 2) показали, що знак миттєвих напружень змінюється після того, як температура поверхні скла стане нижчою, ніж T_g (перша секунда охолодження). Знак сумарних перехідних напружень змінюється, коли температура середнього шару наблизиться до температури T_g (третя секунда охолодження). Цікаво, що максимальна величина миттєвих напружень відповідає максимальній різниці між температурами середнього та поверхневого шарів, що спостерігається тоді, коли температура середнього шару досягає T_g (3,2 с охолодження).

На основі отриманих величин перехідних напружень у поверхневому шарі побудовано криву зміни гартувальних напружень в часі (рис. 3, крива 1). Таку саму криву побудовано на підставі результатів кінематографування (рис. 3, крива 2). Обидві криві характеризуються додатними значеннями напружень (розтягу) в перші дві секунди охолодження, зміною знака напружень на третій секунд охолодження (стиску) з подальшим наростанням величини цих напружень.

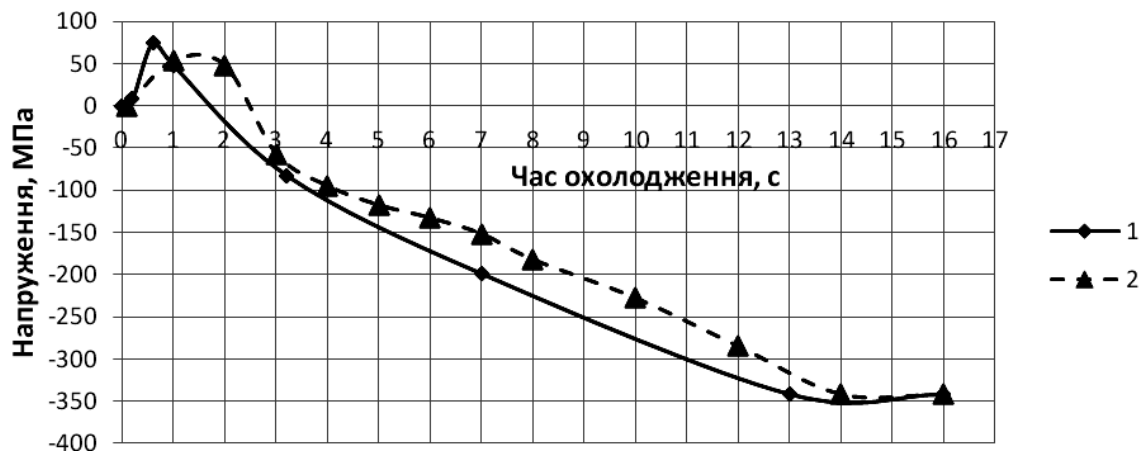


Рис. 3. Динаміка зміни напружень під час гартування скла:
1 – за результатами розрахунку, 2 – за результатами кінематографування

Безперечно, прийняті для розрахунку значення фізичних параметрів скла дещо відрізняються від реальних. Однак важливо, що сам характер зміни напружень в обох випадках однаковий, а різниця між розрахунковими й експериментально отриманими значеннями незначна. Це свідчить про правильність запропонованого механізму утворення залишкових напружень і адекватність математичної моделі.

Висновок. Встановлено, що скло, гартоване новим контактним методом, твердіше й стійкіше до дії кислоти, ніж скло, гартоване повітрям, а причиною зниження мікротвердості та хімічної стійкості гартованого скла є утворений на поверхні скла шар з низькою густиною.

1. Бартенев Г. М. Механические свойства и тепловая обработка стекла. – М.: Гостройиздат, 1960. – 165 с. 2. Богуславский И. А. Высокопрочные закаленные стекла. – М.: Стройиздат, 1969. – 208 с. 3. Gardon R. Thermal Tempering of Glass // Glass: Science and Technology. – 1980. – Vol. 5. – P. 68–74. 4. Яцишин Й. М., Вахула Я. І., Жеплинський Т. Б., Козій О. І. Технологія скла у трьох частинах. Ч. III. Технологія скляних виробів: підручник. – Львів: Растр-7, 2011. – 416 с. 5. Жеплинський Т. Б., Дяківський С. І. Основи теорії і практики гартування скла: навч. посіб. – Львів: Растр-7, 2011. – 112 с. 6. Яцишин Й. М. Хімічна технологія скла. Частина 1. Фізика і хімія скла: підручник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2001. – 186 с. 7. Жеплинський Т. Б., Курій А. О. Особливості прогнозування теплового розширення листового скла різної товщини // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків НТУ “ХПІ”. – 2016. – № 22. – С. 72–76.