

УДК 666.1.031

doi:10.20998/2413-4295.2020.01.09

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВИХ ПЕЧЕЙ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ОПТИЧНОГО ТА СПЕЦІАЛЬНОГО ФЛОАТ СТЕКОЛ

Д. В. ПЕТРОВ<sup>1\*</sup>, Л. Л. БРАГІНА<sup>1</sup>, С. М. ЯЙЦЬКИЙ<sup>2</sup>, С. О. РЯБІНІН<sup>1</sup>

<sup>1</sup> кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

<sup>2</sup> ДП «Лисичанський скляний завод», м. Лисичанськ, УКРАЇНА

\*e-mail: petrovdmityr@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Показана актуальність дослідження експлуатаційних характеристик вогнетривких матеріалів та конструктивних особливостей теплових агрегатів при виробництві оптичного та спеціального флоат-стекла. Проаналізовано сучасний стан теплових режимів ванних й регенеративних одnogоршкових печей та існуючі методи визначення їх слабких вузлів при взаємодії розплавів скла з вогнетривкими футерівками. Для цього було використано найсучасніше діагностичне обладнання. Встановлено характер руйнування бадделейто-корундових вогнетривів у скловарної печі при виробництві листового флоат-скла за довготривалий період із використанням петрографічних досліджень. Наведено одержані статистичні дані щодо впливу різних типів сировини, що входить до складу вихідних шихт, на фізичне руйнування поверхні вогнетривів. Із урахуванням зміни складу стекла у результаті їхньої взаємодії з поверхнею вогнетривів запропоновано математичне корегування типу та вмісту сировинних компонентів для отримання скла високої якості з необхідними експлуатаційними та оптичними параметрами. Доказано важливість урахування допусків на теплове розширення при капітальному ремонті регенеративної горшкової печі. Виявлено вплив ходу подум'яного потоку на ефективність роботи печі, на основі чого перероблено конструктив газівих вікон. Досліджено залежності корозії стін варильного басейну від температури в найбільш агресивних зонах ванної печі. Визначено основні типи оптичних стекла за хімічним складом, які є найбільш агресивними до пічного середовища. У зв'язку з впливом на характер руйнування вогнетривів скла в залежності від його хімічного складу, встановлено необхідне розміщення температурних датчиків для коректного аналізу теплових навантажень на вогнетривкі матеріали. Здійснено модифікацію регенераторної горшкової печі для ефективного та економічного виробництва скла. Наведено результати промислових випробувань та впровадження розроблених методів виробництва високоякісних оптичного та спеціального флоат-стекла із урахуванням підвищення терміну експлуатації. Визначено перспективні напрямки розвитку даної тематики.

**Ключові слова:** оптичне скло; спеціальне флоат-скло; регенеративні печі; технологічні режими виробництва; експлуатаційні властивості вогнетривів; керамічні ємності; освітлення та гомогенізація; промислова діагностика

## INVESTIGATION OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF FURNACES FOR OPTICAL AND SPECIAL FLOAT GLASSES PRODUCTION

D. PETROV<sup>1</sup>, L. BRAGINA<sup>1</sup>, S. YAITSKY<sup>2</sup>, S. RYABININ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of ceramic, refractories, glass and enamels technology, National Technical University "Kharkiv Politechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> SE Lisichansky glass factory, Lisichansk, UKRAINE

**ABSTRACT** The relevance of the study of the performance characteristics of refractory materials and the constructive features of thermal units the design in the production of optical and special float glasses was shown. The current state of the thermal regimes of baths and regenerative furnaces and the existing methods for determining the weak nodes of thermal furnaces were analyzed. For this goal the modern diagnostic equipment was used. The nature of the destruction of baddeleyite-corundum refractories of a glass-melting furnace during the production of sheet float glass for a long time has been established by using the results of petrographic studies. Statistical data on the influence of raw materials which are part of the source charges on the physical destruction of the refractory surface are presented. It was found that the composition of the glass affects the nature of the destruction of refractory materials. The importance of taking into account the tolerances for thermal expansion during the overhaul of a regenerative pot furnace has been proved. The influence of flame flow on the efficiency of the furnace is revealed. For this aim the design of the gas windows has been redesigned. The dependences of the corrosion of the bath walls on temperature in the most aggressive zones of the bath furnace have been investigated. The main types of optical glasses by chemical composition, which are the most aggressive to the furnace environment, were determined. In addition to the chemical composition of glass, technological modes of its production are also important. An important point is the placement of temperature sensors for the correct analysis of thermal loads on refractory materials. Modification of the regenerative furnace was carried out for further efficient and economical glass production. The results of industrial tests and implementation of the developed methods for the

*production of high-quality optical and special float glasses, taking into account the increased service life were presented. The main and perspective directions for the development of this topic have been determined.*

**Keywords:** *optical glass; special float-glass; regenerative furnaces; technological modes of production; operational properties of refractories; ceramic containers; fining and homogenization; industrial diagnostics*

## Вступ

Виробництво оптичного скла, як і спеціального флоат-скла, є тривалим трудомістким процесом, до якого висувається ряд жорстких вимог. Ці вимоги стосуються як чистоти сировинних матеріалів та режимів виробництва, так і експлуатаційних властивостей печей, в яких ці стекла виробляються [1,2]. Для виробництва оптичних стекол застосовують регенеративні горшкові та індукційні печі [3], а для флоат-стекла – ванні регенеративні [4]. Одним із головних факторів ефективності виробництва стекол із збереженням якості продукції підприємства є визначення експлуатаційних параметрів вогнетривких матеріалів, а також конструктивних особливостей теплових печей.

Особливе значення для забезпечення високої якості скляної продукції мають склад, властивості і стан вогнетривів, які перебувають в безпосередньому контакті з робочими середовищами в скловарній печі або в керамічній ємності [5].

Поряд із вогнетривами, розташованими у зоні варіння, великий вплив на якість скла має складна конфігурація зазначених виробів, особливо у продуктивній частині, до яких пред'являються високі вимоги як за експлуатаційними характеристиками, так і за формою і розмірами [6]. Найбільш важлива з цих вимог – значна корозійна стійкість до розплаву скла, або так звана склостійкість, яка характеризується швидкістю розчинення вогнетриву в скломасі [7]. Вона залежить від багатьох факторів: хімічного і мінерального складу і структурних особливостей вогнетривів, хімічного складу та в'язкості скломаси, величини її поверхневого натягу на межі з вогнетривкою футерівкою і т. д. [8].

При виробництві оптичного скла має місце руйнування керамічної ємності та мішалки розплавом скла. Оскільки такі стекла мають широкий спектр марок за своїм хімічним складом (свинцеві, силікатні, фосфатні та ін.), наслідки та характер руйнування також може бути різним. Це також пов'язано із особливостями технології їх виробництва [9]. Всі ці фактори впливають як на якість скла, так і строк експлуатації печі. Також важливою проблемою є вдосконалення конструктиву та модернізація регенеративних горшкових печей для більш ефективного їх використання [10].

Таким чином, технологія оптичного та спеціального флоат-скла складається із багатьох етапів та залежить від багатьох факторів й параметрів, одними з яких є характеристики вогнетривких матеріалів – головної складової конструктивів печей. Однак у багатьох випадках не враховується їхне зношування внаслідок взаємодії з розплавом скла, яке

суттєво впливає на часткову зміну хімічного складу скла, а також на довготривалість роботи печей.

## Мета роботи

Мета роботи полягала у дослідженні експлуатаційних характеристик вогнетривів скловарних печей для модернізації технологічних режимів та в кінцевому підсумку – збільшенню строку придатності теплових агрегатів зі збереженням якості скла.

## Основні результати та їх обговорення

**Виробництво спеціального флоат-скла.** В реальних умовах найбільш вразливими до руйнування є окремі елементи кладки скловарної ванної печі. Практика їх експлуатації свідчить, що до вказаних елементів відносяться: головне склепіння, влети пальників, підвісні стіни продуктивної частини печі, склепіння регенераторів; периметр конфорки і дно басейну; насадки регенератору. Вразливими дільницями варильної частини є головне склепіння скловарної печі, підвісні стіни варильної частини та вліт горілки. Основною причиною корозії цих дільниць є результат розпилювання та випаровування шихти, а також термічне навантаження під дією полум'я [11]. Головною проблемою бокових стін варильної частини є сильна корозія внаслідок агресивного середовища, що утворюється на межі фаз газ-склорозплав. Руйнування насадок регенератора утворюється внаслідок високого температурного навантаження, різкої зміни температур та значного навантаження в результаті змінення окисно-відновного середовища.

У даній роботі аналіз стану вогнетривких матеріалів кладки печі був проведений з урахуванням її характеристик, параметрів технологічного режиму варки і конкретних умов експлуатації. Тип печі – регенеративна, з поперечним напрямком полум'я; продуктивність – 350 т скломаси на добу; паливо – природний газ; коефіцієнт надлишку повітря –  $\alpha = 1,02-1,05$  в зоні 1-ої і 2-ої пари пальників,  $\alpha = 1,2-1,6$  в зоні 3-ої – 5-ої пари пальників; питоме вироблення скломаси з 1 м<sup>2</sup> опалювальної частини печі – 1950-2000 кг/м<sup>2</sup>; максимальна температура – 1595-1600 °С. Матеріал стін варильного басейну – плавленолітні баделетові вогнетриви Бакор 33 і Бакор 36. Матеріал підвісних стін басейну – бакор і динас, склепіння – динас, насадок регенератора – циркон, периклаз і хромомагnezит. Інтенсивність повітряного обдування зовнішніх стін варильного басейну – 0,9–1,0 м<sup>3</sup>/с на 1 м кладки.

Для дослідження були обрані зразки бакорових вогнетривів з трьох різних зон стін варильного

басейну ванної печі. Встановлено, що після її півторарічної експлуатації вогнетриві стін варильного басейну в найбільшій мірі зазнали корозії в зоні максимальних температур (четверта пара пальників), де вихідна товщина бруса 250 мм зменшилася до 100 мм, в меншій мірі під першим вльотом пальника – до 150 мм і по всьому периметру конфорок до 160–180 мм (рис.1).

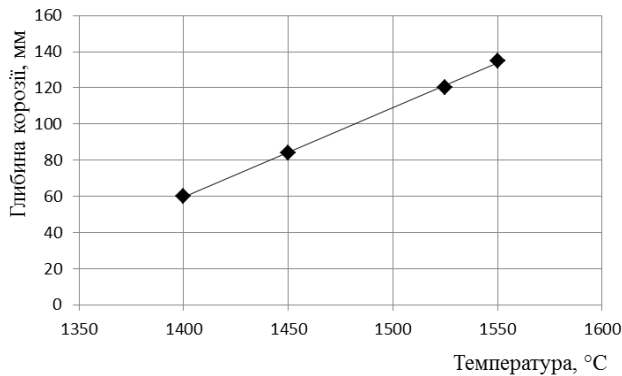


Рис. 1 – Графік залежності корозії стін варильного басейну від температури в продуктивній частині печі

Специфічні особливості руйнування бакорових вогнетривів підвісних стін продуктивної частини проявилися в утворенні потужного граничного реакційного шару завтовшки  $\approx 20\text{--}30$  мм внаслідок агресивного впливу легких компонентів шихти і розплаву, особливо в зоні варильного басейну, вльотах пальників і безпосередньо – від завантажувальної кишені до 3-ї пари пальників (рис. 2).

В інших секціях внутрішня поверхня склепіння практично не зазнала істотних змін, за винятком оплавлення вогнетривів на окремих ділянках. Для більш детального аналізу було проведено петрографічні дослідження.

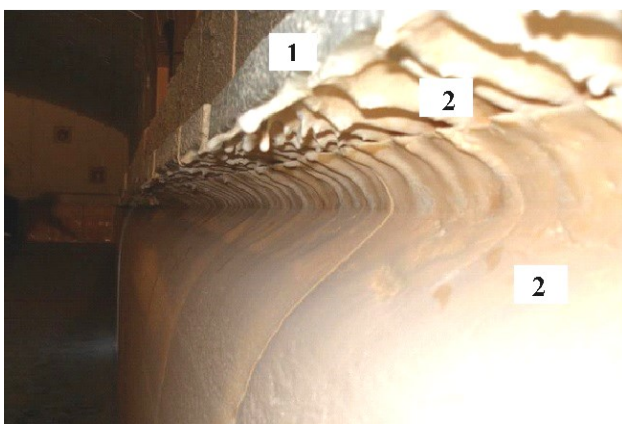


Рис. 2 – Роз'їдання розплавом скла полісадного бруса варильного басейну: 1 – незмінна частина вогнетриву; 2 – роз'їдена частина вогнетриву

Ці дослідження показали (рис. 3), що в зразках баделеїто-корундових вогнетривів у процесі служби утворилися зони: найменш змінена, робоча (реакційна) і скоринка зі скла на поверхні зразків. Найменш змінена зона зразків складається з таблічатих, смуговидних, часто субпаралельних виділень спільної кристалізації (застиглий евтектичних розплав) корунду і баделеїту різної довжини і ширини, а також склофази в проміжках між баделеїто-корундовими виділеннями.

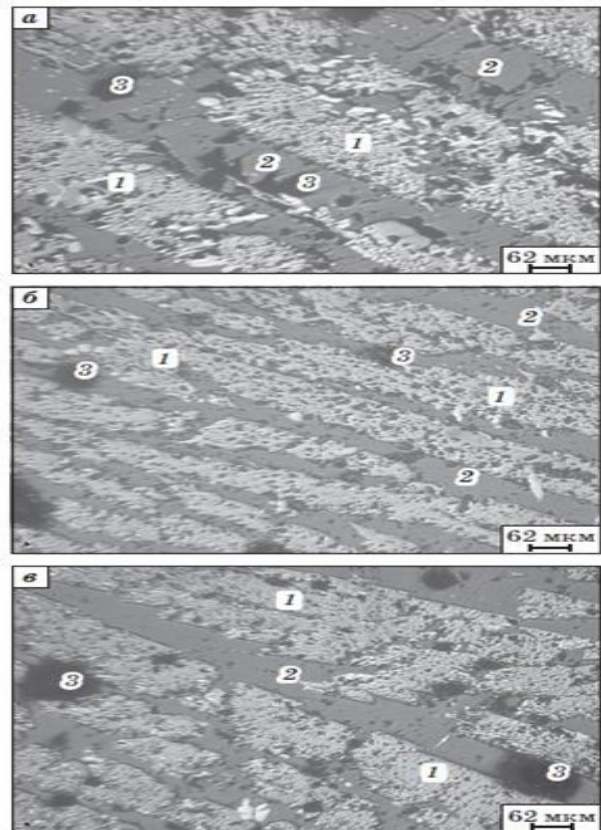


Рис. 3 – Загальна структура найменш зміненої зони баделеїта-корундових зразків (1 – корунд + баделеїт, 2 – склофаза, 3 – пори та тріщини)

Баделеїт спостерігається у вигляді зерен (кристалів) ізометричної (округлої), витягнутої (овальної) і неправильної форми, розподілених серед коротко-призматичних й ізометричних кристалів корунду. Склофаза безбарвна з показником світлопереломлювання  $N \approx 1,500\text{--}1,510$ , що також має вигляд подовжених смуговидних виокремлень. Пори у найменш зміненій зоні ізометричні неправильної форми в склофазі та у виокремленнях спільної кристалізації (в декілька меншій кількості). Контакти всіх фаз щільні, лише зрідка на контакті склофаза – баделеїт+корунд відзначаються тріщини.

**Виробництво оптичного скла.** Головним тепловим агрегатом багатотоннажного виробництва оптичного скла є горшкова регенераторна піч. Основними її елементами є робоча зона та

регенератори. До робочої зони входять: звід, камера печі, куха (оглядове вікно) та загрузочний отвір. Внутрішня частина робочої зони викладена з динасу, оскільки цей матеріал має велику тепловіддачу [12]. Саме завдяки енергії випромінювання вогнетриву відбувається нагрів шихти в керамічній ємності. Головною причиною руйнування внутрішньої поверхні динасу робочої зони є розпилювання шихти під час її засипки у горшок. При варці кольорових та свинцевих оптичних стекл руйнування поверхні динасової площини підвищується. Додатковим фактором руйнування є залишки розплаву скломаси, що залишаються на передній стінці камери та вікні кухи під час хальмування [13]. Розпилювання шихти також є причиною зменшення віконного проходу регенераторів та руйнації колодців, що призводить до зменшення ККД теплової печі при її тривалій експлуатації. При таких умовах та вільному вильоті відпрацьованого полум'я також має місце періодичне руйнування термопар, що призводить до технічної труднощі під час виробництва та незначного збільшення собівартості кінцевої продукції. Аналіз стану вогнетривких матеріалів кладки печі був проведений після капітального ремонту одnogоршкової регенеративної печі з урахуванням її характеристик, даних технологічного режиму і конкретних умов експлуатації. Термін експлуатації склав 3 роки.

Дослідження стану вогнетривів горшкової печі після тривалої експлуатації мають свої особливості. Так, аналіз показав, що найбільш ураженою частиною виявилась передня стінка робочої камери. До руйнівних наслідків призвела операція хальмування, що залишає на стіні залишки склорозплаву, тим самим створюючи агресивне середовище. Для вирішення даної проблеми при капітальному ремонті печі було додатково встановлено закисну вогнетривку плиту (рис. 4).

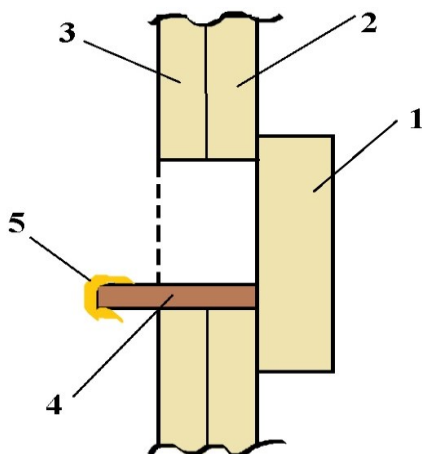


Рис. 4 – Вид-схема передньої стінки скловарної печі із захисною плитою (1 – куха, 2 – шамотний зовнішній ряд, 3 – динасовий внутрішній ряд, 4 – захисна плита, 5 – склорозплав)

Головною умовою встановлення такої плити є збереження висоти отвору для загрузки ковша із шихтою. Термін експлуатації такої плити не є тривалим, тому з певною періодичністю вона потребує заміни. Однак ця плита захищає передню стінку від руйнації склорозплавом, що значно підвищує термін роботи самої печі. Визначено, що особливу загрозу для вогнетривів печі складають стекла системи  $R_2O-PbO-SiO_2$ . Виробництво таких стекл супроводжується інтенсивним виділенням пінного шару на поверхні склорозплаву під час освітлення та гомогенізації, який видаляється завдяки хальмуванню. Додаткову загрозу несуть стекла з барвниками типу  $Mn_2O_3$ ,  $CuO$ ,  $CoO$ . Загроза полягає в тому, що частина шихти, що розпилюється, осідає на зводі та при наступному наварі скла може потрапити до склорозплаву, тим самим змінюючи його оптичні та спектральні характеристики. Тому після виробництва таких стекл необхідно проводити «термічний шок» - збільшення температури печі (випал) до  $1550\text{ }^\circ\text{C}$ . Це сприяє усуненню зайвих часток барвників, однак частково знижує експлуатаційні характеристики динасового зводу.

Також однією з головних проблем було виявлено порушення конструктивних вимог при складанні печі під час капітального ремонту. Такі порушення також призводять до часткової руйнації динасового зводу печі. Це обумовлюється постійним контактом із відкритим полум'ям. Додаткову складність становить невідповідна геометрія отворів вильоту полум'я. При її порушенні хід полум'я є нестабільним, що також знижує ефективність теплових режимів виробництва. Тому важливим моментом є дотримання всіх геометричних та конструктивних вимог під час капітального ремонту печі (рис. 5). Під час закладення арок для проходження газового полум'я 1 необхідно дотримуватись чіткої ширини, яка б була паралельна зводу та поду печі. Окрім того, динасові клини повинні бути щільно притулені один до одного для недопущення їх випадання під час роботи печі.



Рис. 5 – Основні етапи капітального ремонту регенеративної печі

При викладанні поду **2** повинні зберігатися чіткі діагоналі, оскільки їх порушення призведе до зменшення міцності зводу в майбутньому. При викладанні зводу **3** також треба враховувати центровку осей отвору мішалки та перетинання діагоналей поду. При зміщенні центру отвору для мішалки вона розташовуватиметься не в центрі горшка зі склорозплавом під час перемішування, що є однією з причин потрапляння звелей в об'єм скломаси. Також необхідно зберігати висоту та ширину отвору **4** для завантаження керамічної ємності.

Під час експлуатації печі також важливим є температура регенераторів. Встановлено, що підтримання їхньої температури у зоні вимірювання під час технологічного простою у діапазоні 350–400 °C дозволяє збільшити термін експлуатації печі. Така температура дозволяє постійно підтримувати необхідний рівень тяги на витяжну систему (-7 – -6 кг °C/см<sup>2</sup>). Також ця температура дозволяє зберігати у належному стані всі внутрішні регенераторні частини, що викладені з динасу. На практиці доведено, що низькі температури (менше 250°C) в зоні регенераторів призводять до руйнації динасових елементів.

Для збереження робочого стану термопар, що вимірюють температуру регенераторів, вони в обов'язковому порядку повинні бути захищені корундовими чохлами, а їх вимірні частини не повинні бути у відкритому полум'ї. Це призводить до збільшення інерційності вимірів, але повністю зберігає їх стан.

### Висновки

Таким чином, при виробництві спеціального флоат-скла необхідно обирати більш якісні вогнетриви, які б містили мінімум склофази. Крім того, при будівництві скловарної печі слід зменшити кількість швів, не допускати зіткнення вогнетривів, що дають між собою і при взаємодії з розплавом легкоплавкі малов'язкі евтектики, і утворення дрібних тріщин при виводку скловарної печі. Всі ці заходи зменшать вірогідність руйнації, яка є однією з причин появи дефектів у самому склі.

Для одnogоршкових регенеративних печей при виробництві оптичних стекел встановлена важливість дотримання геометричних та конструктивних вимог під час її ремонту. Для збереження передньої стінки робочої камери рекомендовано встановити захисну плиту, що суттєво збільшуватиме термін роботи печі. Показана необхідність дотримання мінімальної температури 350–400 °C регенераторів, що дозволить зберегти їх динасові елементи та сприятиме загальній ефективності й подовженню експлуатації печей.

### Список літератури

1. Ling S. H., Jing C. Y., Li X. L. Analysis Flue Gas DeNOx Technology for Float Glass Furnace. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 525. P. 158–161. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.525.158.
2. Semenov B. A., Ozerov N. A. Thermal Resistance of the Wall Layer of Molten Glass in the High-Temperature Corrosion Zone of the Refractory Walls of the Melting Tank of Glassmaking Furnaces. *Glass and Ceramics*. 2016. 73. P. 159–164. doi: 10.1007/s10717-016-9847-2.
3. Hartman P. *Optical Glass*, Bellingham: SPIE, 2014. 180 p.
4. Cheng M., Blanton N. Integrated Air Quality Control System for Float Glass Furnace. *71st Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings*. 2011. 32. P. 34–49. doi: 10.1002/9781118095348.ch4.
5. Carter B. C., Norton M.G. *Ceramic Materials. Science and Engineering*. Springer, 2013. 775 p.
6. Savvova O. V., Bragina L. L., Petrov D. V., Topchii V. L., Ryabinin S. A. Technological Aspects of the Production of Optically Transparent Glass Ceramic Materials Based on Lithium-Silicate Glasses. *Glass and Ceramics*. 2018. 75. P. 127–132. doi: 10.1007/s10717-018-0041-6.
7. George S. M., Haycock P. W., Ormerod R. M. The mechanism of corrosion of Aluminium Zirconium Silicate (AZS) material in the float glass furnace regenerator. *Journal of the European Ceramic Society*. 2018. 38, P. 2202–2209. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.006.
8. Curtis W. Postmortem of a Conventional Silica Brick from a Soda-Lime Float Glass Furnace Crown. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*. 2010. 31(1). P. 161–173. doi: 10.1002/9780470769843.ch17.
9. Немилов, С. В. *Оптическое материаловедение: Оптическое стекло: Учебное пособие*. СПб: СПбГУ ИТМО. 2011. 175 с.
10. Зверев В. А., Кривоустова Е. В., Толчина Т. В. *Оптические материалы. Часть 2*. СПб.: ИТМО. 2013. 248 с.
11. Hartmann P., Jedamzik R., Reichel S., Schreder B. Optical glass and glass ceramic historical aspects and recent developments: A Schott view. *Applied Optics*. 2010. 49, No. 16. P. D 157 – D 176. doi: 10.1364/AO.49.00D157.
12. Feng Zh., Li D., Guoqiang Q., Liu Sh. Study of the Float Glass Melting Process: Combining Fluid Dynamics Simulation and Glass Homogeneity Inspection. *Journal of the American Ceramic Society*. 2008. 10. P. 3229–3234. doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02606.x.
13. Петров Д. В., Філоненко С. В., Брагіна Л. Л., Виробництво оптичного скла 1-ої категорії пузирності у керамічних судинах. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ». 2017. № 53 (1274). С. 132–136. doi:10.20998/2413-4295.2017.53.19.

### References (transliterated)

1. Ling S. H., Jing C. Y., Li X. L. Analysis Flue Gas DeNOx Technology for Float Glass Furnace. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 525, pp. 158–161, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.525.158.
2. Semenov B. A., Ozerov N. A. Thermal Resistance of the Wall Layer of Molten Glass in the High-Temperature Corrosion Zone of the Refractory Walls of the Melting Tank



- of Glassmaking Furnaces. *Glass and Ceramics*, 2016, 73, pp. 159–164, doi: 10.1007/s10717-016-9847-2.
3. Hartman P. *Optical Glass*, Bellingham: SPIE, 2014, 180 p.
  4. Cheng M., Blanton N. Integrated Air Quality Control System for Float Glass Furnace. *71st Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2011, 32, pp. 34–49. doi: 10.1002/9781118095348.ch4.
  5. Carter B. C., Norton M. G. *Ceramic Materials. Science and Engineering*. Springer, 2013, 775 p.
  6. Savvova O. V., Bragina L. L., Petrov D. V., Topchii V. L., Ryabinin S. A. Technological Aspects of the Production of Optically Transparent Glass Ceramic Materials Based on Lithium-Silicate Glasses. *Glass and Ceramics*, 2018, 75, pp. 127–132, doi: 10.1007/s10717-018-0041-6.
  7. George S. M., Haycock P. W., Ormerod R. M. The mechanism of corrosion of Aluminium Zirconium Silicate (AZS) material in the float glass furnace regenerator. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38, pp. 2202–2209, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.006.
  8. Curtis W. Postmortem of a Conventional Silica Brick from a Soda-Lime Float Glass Furnace Crown. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2010, 31(1), pp. 161–173, doi: 10.1002/9780470769843.ch17.
  9. Nemilov, S. V. Opticheskoe materialovedenie [Optical Materials Science]. *Opticheskoe steklo: uchebnoie posobiie [Optical Glass: Textbook]*. SPb: SPbU ITMO, 2011, 175 p.
  10. Zverev, V. A., Krivopustova, E. V., Tochilyna, T. V. *Opticheskie materialy. Ch. 2 [Optical materials. Part 2]*, SPb.: ITMO, 2013, 248 p.
  11. Hartmann P., Jedamzik R., Reichel S., Schreder B. Optical glass and glass ceramic historical aspects and recent developments: A Schott view. *Applied Optics*, 2010, 49, no. 16, pp. D 157 – D 176, doi: 10.1364/AO.49.00D157.
  12. Feng Zh., Li D., Guoqiang Q., Liu Sh. Study of the Float Glass Melting Process: Combining Fluid Dynamics Simulation and Glass Homogeneity Inspection. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, 10, pp. 3229–3234, doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02606.x.
  13. Petrov D., Philonenko S., Bragina L. Production of optical glass of the 1st category of bubbles in ceramic crucibles. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, 53 (1274), 132–136, doi:10.20998/2413-4295.2017.53.19.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Петров Дмитро Вікторович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7571-8592; e-mail: petrovdmitry@ukr.net.

**Dmytro Petrov** – Ph. D., Department of ceramic, refractories, glass and enamels technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7571-8592; e-mail: petrovdmitry@ukr.net.

**Брагіна Людмила Лазарівна** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна. ORCID: 0000-0002-4029-0941 e-mail: bragina\_l@uke.net.

**Liudmyla Bragina** – Dr. Sci., professor, Department of ceramic, refractories, glass and enamels technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4029-0941; e-mail: bragina\_l@uke.net.

**Яїцький Сергій Миколайович** – генеральний директор ТОВ «Лисичанський скляний завод»; Луганська область, м. Лисичанськ, Україна; e-mail: tehnolog183@gmail.com.

**Serhiy Yaitsky** – General Director of Lysychansk Glass Plant LLC; Luhansk region, Lysychansk, Ukraine; e-mail: tehnolog183@gmail.com.

**Рябінін Святослав Олександрович** – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2972-8540; e-mail: riabinin\_svytoslav@hotmail.com

**Sviatoslav Ryabinin** – postgraduate Student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Department of Ceramics, Refractories, Glass and Enamels; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2972-8540; e-mail: riabinin\_svytoslav@hotmail.com

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Петров Д. В., Брагіна Л. Л., Яїцький С. М., Рябінін С. О. Дослідження експлуатаційних характеристик теплових печей при виробництві оптичного та спеціального флотат стекло. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 3 (5). С. 59-65. doi: 10.20998/2413-4295.2020.01.09.

*Please cite this article as:*

Petrov D., Bragina L., Yaitsky S., Ryabinin S. Investigation of operational characteristics of furnaces for the production of optical and special float glasses. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 3 (5), pp. 59-65, doi:10.20998/2413-4295.2020.01.09.

*Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

Петров Д. В., Брагина Л. Л., Яицкий С. Н., Рябинин С. А. Исследование эксплуатационных характеристик тепловых печей при производстве оптического и специального флоат-стекла. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 3 (5). С. 59-65. doi:10.20998/2413-4295.2020.01.09.

**АННОТАЦИЯ** Показана актуальность исследования эксплуатационных характеристик огнеупорных материалов и конструктивных особенностей тепловых агрегатов при производстве оптического и специального флоат-стекла. Проанализировано современное состояние тепловых режимов ванн и регенеративных одnogоршковых печей и существующие методы определения их слабых узлов при взаимодействии расплава стекла с огнеупорными футеровками. Для этого было использовано современное диагностическое оборудование. Установлен характер разрушения бабделит-корундовых огнеупоров в стекловаренной печи при производстве листового флоат-стекла за длительный период с использованием петрографических исследований. Приведены полученные статистические данные о влиянии различных типов сырья, входящий в состав исходных шихт на физическое разрушение поверхности огнеупоров. С учетом изменения состава стекол в результате их взаимодействия с поверхностью огнеупоров предложены математические корректировки содержания сырьевых компонентов для получения стекла высокого качества с необходимыми эксплуатационными и оптическими параметрами. Доказано важность учета допусков на тепловое расширение при капитальном ремонте регенеративной горшечной печи. Выявлено влияние хода пламенного потока на эффективность работы печи, на основе чего переработано конструктив газовых окон. Исследованы зависимости коррозии стен варочного бассейна от температуры в наиболее агрессивных зонах ванной печи. Определены основные типы оптических стекол по химическому составу, которые являются наиболее агрессивными к печной среде огнеупоров. В связи с влиянием на характер разрушения огнеупоров стекла, в зависимости от его химического состава, установлено необходимое размещение температурных датчиков для корректного анализа тепловых нагрузок на огнеупорные материалы. Осуществлена модификация регенераторной горшечной печи для эффективного и экономичного производства стекла. Приведены результаты промышленных испытаний и внедрения разработанных методов производства высококачественных оптического и специального флоат-стекла с учетом повышения срока эксплуатации. Определены перспективные направления развития данной тематики.

**Ключевые слова:** оптическое стекло; специальное флоат-стекло; регенеративные печи; технологические режимы производства; эксплуатационные свойства огнеупоров; керамические сосуды; освещение и гомогенизация; промышленная диагностика

Надійшла (received) 01.09.2020