

УДК 666.155 : [666.1.03 + 666.189.2 + 004.9 + 504.06 + 620.9]

DOI: 10.20535/iwccmm2025327120

СУЧАСНІ ІННОВАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЛИСТОВОГО СКЛА ФЛОАТ-МЕТОДОМ

Ігор ПИЛИПЕНКО,

К.х.н.,

КПІ імені Ігоря Сікорського

i.pylypenko@kpi.ua

Анотація. У роботі досліджуються інновації у виробництві листового скла флоат-методом. Об'єктом дослідження є сам флоат-процес та його ключові удосконалення, впроваджені у період з 2014 по 2025 рік. Мета огляду – проаналізувати значні технологічні досягнення, зумовлені глобальною увагою до екологічної стійкості та загальним технологічним прогресом. Основні результати дослідження висвітлюють прогрес у кількох напрямках: вдосконалення конструкцій плавильних печей для підвищення енергоефективності та гнучкості виробництва; інтеграція сталих практик, включаючи використання альтернативних видів палива, збільшення частки склобою та розвиток технологій уловлювання вуглецю; еволюція технологій нанесення покриттів (низькоємисійних, сонцезахисних, самоочисних); зростаюча роль автоматизації, штучного інтелекту та цифровізації для оптимізації процесів; поява спеціалізованих видів скла (смарт-скло, сонячне скло).

Ключові слова: водень, декарбонізація, осадження, переробка, піч, плавлення, покриття, смарт-скло, флоат-процес.

Вступ

Листове скло є незамінним матеріалом у сучасному суспільстві, який лежить в основі численних застосувань у різних секторах, таких як будівництво, автомобілебудування та електроніка [1]. Його універсальність та унікальні властивості зробили його наріжним каменем сучасного життя. В основі широкої доступності високоякісного листового скла лежить флоат-процес – революційна технологія виробництва. Принцип цього метода полягає у безперервному виливанні розплавленого скла з печі у мілку ванну з розплавленим оловом. Скло, маючи меншу густину, ніж олово, плаває і розтікається, природним чином утворюючи ідеально рівну поверхню під дією сили тяжіння та поверхневого натягу. Коли стрічка скла рухається по олов'яній ванні, її температура поступово знижується. Після того, як вона достатньо охолоне і затвердіє, її піднімають з ванни і пропускають через піч відпалу (лер)

для контрольованого охолодження з метою зняття внутрішніх напружень. Нарешті, безперервну стрічку розрізають на заготовки потрібних розмірів [2]. Цей процес дозволяє отримувати скляні листи рівномірної товщини та виняткової гладкості поверхні, усуваючи потребу в енергоємних етапах шліфування та полірування, необхідних у попередніх методах [1].

Цей огляд має на меті дослідити та проаналізувати значні удосконалення, які були впроваджені в технологію виробництва листового скла флоат-методом у період з 2014 по 2025 рік. Цей часовий проміжок є особливо актуальним, оскільки він збігається з підвищеною глобальною увагою до екологічної стійкості та швидким технологічним прогресом у різних галузях промисловості. Сфера цього огляду охоплює ключові напрямки інновацій, які змінили виробництва флоат-скла. Ці напрямки включають удосконалення конструкції та експлуатації плавильних печей, інтеграцію сталих практик для мінімізації впливу на довкілля, еволюцію технологій нанесення покриттів на скло для покращення його характеристик, зростаючу роль автоматизації та цифровізації в оптимізації виробничих процесів та появу спеціалізованих видів флоат-скла, пристосованих до конкретних потреб ринку. Постійне прагнення до більшого розмаїття продукції, підвищення ефективності, покращення екологічності та вищих характеристик продукції стимулює безперервні інновації в цій добре налагодженій галузі.

Удосконалення технологій печей та плавлення

З'явилися значні інновації в конструкції печей, спрямовані насамперед на підвищення енергоефективності та розширення виробничих можливостей. Однією з помітних розробок є впровадження скловарної печі з подвійною зоною охолодження (FFDC - furnace with a double cooler). Ця нова конструкція, вдосконалена порівняно з традиційною конструкцією, має на меті розширити асортимент скляної продукції, яку можна виробляти на одній печі [5]. Активно досліджується можливість застосування цієї концепції у великотоннажних печах, що свідчить про рух до більших масштабів виробництва та гнучкості. Патентна література також відображає цю тенденцію, пропонуючи винаходи,

такі як піч для одночасного безперервного плавлення кількох видів скла [6]. Ця конструкція має спільну камеру згоряння та кілька плавильних басейнів, розділених спільними стінами, що дозволяє виробляти різні типи скла без взаємного забруднення. Подібним чином була запатентована конструкція печі для флоат-скла, що включає щонайменше два фідери (живильники) та формувальне обладнання, з метою досягнення режиму виробництва "одна піч – кілька ліній" для зниження витрат на будівництво та підвищення загальної ефективності [7]. Зростаючий інтерес до великотоннажних печей для флоат-скла з подвійною зоною охолодження ще більше підкреслює прагнення галузі до збільшення випуску продукції та диверсифікації асортименту.

Дослідження також заглибилися в оптимізацію теплових та потокових характеристик у цих передових скловарних печах. Методи числового моделювання були застосовані для аналізу поведінки розплавленого скла в FFDC, виявивши покращену температурну стабільність порівняно зі звичайними печами [5, 8]. Додавання відгалуження в конструкції зони охолодження сприяє більш рівномірному розподілу температури та підтримує характер потоку, подібний до такого в оригінальній конструкції класичної зони охолодження. Такі результати моделювання надають важливі уявлення про доцільність нових конструкцій та допомагають в удосконалювати робочі параметри для оптимального виробництва скла.

Зусилля щодо мінімізації енергоємності процесу плавлення залишаються критично важливою сферою. Вивчено різні стратегії, включаючи оптимізацію потоку повітря, посилення теплопередачі та застосування різних методів спалювання палива [5]. Використання попередньо змішаних палив, показало потенціал для підвищення ефективності згоряння та досягнення вищих температур плавлення. Крім того, патентна активність свідчить про постійні інновації в енергозберігаючих технологіях, таких як системи попереднього нагрівання шихти для печі та використання індукційного нагріву при варінні скла [9]. Ці удосконалення відображають спільні зусилля щодо зменшення

споживання енергії та пов'язаного з цим впливу на довкілля при виробництві флоат-скла.

Сталі практики та екологічні аспекти

Необхідність зменшення екологічного сліду промислових процесів змусила приділяти значну увагу сталому розвитку в галузі виробництва флоат-скла [10]. Великі європейські виробники листового скла відреагували розробкою варіантів флоат-скла з низьким вуглецевим слідом, хоча проблеми з масштабуванням виробництва та задоволенням ринкового попиту наразі обмежують їх широку доступність [10]. Промисловість все більше інвестує в енергоефективні технології виробництва та досліджує альтернативні джерела енергії для зменшення викидів вуглецю [11, 13]. Енергоємний характер виробництва скла, насамперед через високі температури, необхідні для плавлення сировини, значно сприяє збільшенню його вуглецевому сліду [12].

Ключовою стратегією декарбонізації є перехід на альтернативні види палива. Компанія Pilkington, наприклад, успішно провела випробування з використанням водню та біопалива замість природного газу, досягнувши значного скорочення викидів діоксиду вуглецю [10]. Також активно досліджується потенціал електричних печей, що живляться від відновлюваних джерел енергії, та зеленого водню як сталих альтернатив [15].

Збільшення використання переробленого скла, або склобою, є ще однією важливою сталою практикою. Включення більшої кількості склобою у виробничий процес знижує необхідну температуру плавлення, тим самим зменшуючи як технологічні викиди, так і потребу в первинній сировині [10]. Переробка однієї тони скла може заощадити значну кількість енергії та запобігти викиду сотень кілограмів CO₂ [16, 17].

Удосконалення технологій уловлювання вуглецю також набирають обертів у скляній промисловості як спосіб боротьби з викидами CO₂ [10]. Досліджуються різні технології, включаючи абсорбцію за допомогою розчинників та адсорбцію на твердих сорбентах [18]. Також розробляються інноваційні підходи, такі як метод Airovation Technologies, що використовує

супероксидні радикали для перетворення CO_2 на цінні карбонати [19]. Пілотні проекти, які демонструють уловлювання вуглецю в умовах комерційного виробництва скла, досягли помітного успіху, підкреслюючи потенціал цих технологій для сприяння більш сталому майбутньому галузі [20, 22]. Компанія GEA пропонує установки для уловлювання CO_2 , що використовують різні реагенти для очищення, з метою допомоги виробникам скла у зменшенні викидів та підвищенні енергоефективності [21].

Крім цих основних стратегій, все більша увага приділяється іншим сталим практикам, таким як оптимізація ланцюгів постачання, підбір якісних джерел сировинних матеріалів, зменшення відходів та ефективне управління водними ресурсами [11]. Компанії впроваджують ініціативи для мінімізації утворення відходів та максимізації використання ресурсів у всіх своїх операціях [23]. Впроваджуються системи фільтрації води для забезпечення ефективної рециркуляції та повторного використання води на різних етапах процесу виробництва скла, що ще більше зменшує вплив на довкілля [24].

Інновації в технологіях нанесення покриттів на скло

Інновації в технологіях нанесення покриттів на скло значно розширили функціональність та експлуатаційні характеристики флоат-скла, задовольняючи різноманітні потреби в енергоефективності, контролі освітленості та естетиці [3]. Методи нанесення покриттів "на лінії", зокрема хімічне осадження з парової фази (CVD - Chemical Vapor Deposition), стали невід'ємною частиною флоат-процесу. CVD передбачає осадження тонких шарів матеріалів на охолоджувану стрічку скла під час її виходу з флоат-ванни. Цей метод дозволяє точно наносити покриття товщиною менше мікрона, що здатні відбивати світло певних довжин хвиль, таких як видиме та інфрачервоне випромінювання [3, 27]. Оксид олова, легований фтором (FTO), є поширеним матеріалом для CVD-покриттів в архітектурних застосуваннях завдяки його прозорості у видимому спектрі та відбивній здатності у далекому інфрачервоному діапазоні, що сприяє низькому коефіцієнту випромінювання та покращеній теплоізоляції [26]. Подальший розвиток процесів CVD має потенціал з часом замінити

модифікацію складу скла як основного способу зміни оптичних властивостей флоат-скла [3].

Методи нанесення покриттів "поза лінією", такі як фізичне осадження з парової фази (PVD - Physical Vapor Deposition), також відіграють вирішальну роль у виробництві високоякісного скла з покриттям [28]. Магнетронне розпилення, поширений метод PVD, передбачає бомбардування матеріалу мішені іонами у вакуумній камері, що призводить до вибивання атомів та їх осадження у вигляді тонкої плівки на скляну підкладку. Напилені покриття, які часто називають "м'якими" ("soft-coat"), можуть складатися з багатьох шарів металевих та оксидних матеріалів. Це дозволяє краще контролювати оптичні та теплофізичні властивості скла [28, 30].

Еволюція низькоемісійних (Low-E) покриттів стала основним рушієм підвищення енергоефективності будівель [11]. Покриття Low-E призначені для пропускання видимого світла при мінімізації пропускання ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання, тим самим зменшуючи теплопередачу через вікна [33]. Спочатку покриття Low-E наносилися за допомогою піролітичних методів CVD під час флоат-процесу [32]. Однак сучасні покриття Low-E зазвичай є багатошаровими покриттями на основі срібла, що наносяться поза лінією за допомогою магнетронного розпилення для досягнення покращеної прозорості та нижчого коефіцієнта випромінювання [32]. Ефективність покриттів Low-E значно зросла за роки, прогресуючи від покриттів з одним шаром срібла до подвійних, потрійних і навіть чотирьохшарових срібних покриттів. Кожне наступне покоління пропонувало покращені можливості блокування сонячного теплопоглинання при збереженні високого рівня пропускання видимого світла [33].

Покриття для сонячного контролю (сонцезахисні) є ще однією важливою категорією інновацій [2]. Ці покриття призначені для зменшення кількості сонячного тепла, яке потрапляє в будівлю, допомагаючи підтримувати прохолоду в приміщеннях та знижувати витрати на кондиціонування повітря. Для досягнення сонячного контролю використовуються різні методи, включаючи

додавання барвників під час виробництва флоат-скла (тоноване скло) та нанесення металевих покриттів (рефлекторне скло) як на лінії, так і поза лінією [2]. Останні досягнення включають розробку біоінспірованих покриттів, які не тільки забезпечують необхідний ступінь прозорості, але й мають самоочисні властивості та надзвичайно гладку поверхню, що свідчить про тенденцію до багатофункціональних покриттів на склі [34].

Технології самоочисного скла також зазнали значного прогресу [4]. Ці покриття зазвичай поділяються на дві категорії: гідрофобні та гідрофільні [37]. Гідрофільні покриття, часто на основі діоксиду титану, використовують фотокаталіз для розщеплення органічного бруду на поверхні скла під дією сонячного світла. Подальша надзвичайна гідрофільність покриття дозволяє дощовій воді змивати розщеплений бруд, залишаючи скло чистим з мінімальними розводами [37].

Інтеграція автоматизації та цифровізації у виробництво

Галузь виробництва флоат-скла все частіше впроваджує автоматизацію та цифровізацію для оптимізації виробничих процесів, покращення контролю якості та підвищення загальної ефективності [11]. Автоматизація впроваджується на різних етапах виробництва, від обробки сировини до штабелювання готових листів скла [43]. Автоматизовані системи можуть виконувати завдання з більшою точністю та послідовністю, ніж ручна праця, що призводить до зменшення помилок, збільшення пропускну здатності та зниження виробничих витрат [40].

Штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання відіграють трансформаційну роль в оптимізації процесів та контролі якості [44]. Системи машинного зору на базі ШІ розгортаються для перевірки поверхні в реальному часі та здатні виявляти навіть мікроскопічні дефекти на високих швидкостях виробництва [44]. Ці системи можуть навчатися на основі проблем якості, постійно покращуючи свою точність та ефективність у виявленні та класифікації дефектів [46]. Аналіз величезних обсягів виробничих даних за допомогою алгоритмів машинного навчання надає цінні відомості для

оптимізації параметрів процесу, зменшення відходів та прогнозування можливих відмов обладнання [47].

Сенсорні технології та аналітика даних забезпечують моніторинг критичних параметрів у реальному часі по всій лінії виробництва флоат-скла [39]. Це дозволяє виробникам оперативно виявляти та усувати відхилення процесу, забезпечуючи стабільну якість продукції. Прогнозне технічне обслуговування, що полегшується аналізом даних датчиків та історичних тенденцій, допомагає передбачати потреби в обслуговуванні обладнання, мінімізуючи незаплановані простої та максимізуючи експлуатаційну ефективність [39].

Інтегровані системи керування мають вирішальне значення для оптимізації складної послідовності операцій на лінії виробництва флоат-скла. Ці системи об'єднують різні функції, від приймання скла з печі відпалу до різання, сортування та штабелювання готових листів [41]. Об'єднуючи всі ці функції на єдиній платформі автоматизації, виробники можуть досягти кращої координації, знизити виробничі витрати та збільшити пропускну здатність [41]. Платформи низькорівневого кодування (Low-code) також стають цінними інструментами для виробників скла, дозволяючи їм швидко цифровізувати різні аспекти своєї діяльності, включаючи відстеження продукції, управління виробництвом та контрольні списки якості, що призводить до значної економії часу та покращення прозорості [42].

Нові тенденції та спеціалізовані види флоат-скла

Ринок флоат-скла показує зростаючий попит на спеціалізовану продукцію з покращеними функціональними можливостями, що зумовлено мінливими потребами в різних секторах [2]. Виробники все більше зосереджуються на розробці скла з покращеною теплоізоляцією, сонячним контролем та акустичними характеристиками. Загартоване скло набуває популярності в архітектурних застосуваннях, таких як фасади та дахи, для оптимізації природного денного освітлення [11].

Технології смарт-скла (розумного скла) є новою тенденцією в галузі [31]. Смарт-скло, також відоме як скло зі змінними властивостями, може динамічно змінювати свої характеристики, такі як непрозорість або відтінок, у відповідь на зовнішні умови або дії користувача [31]. Ця технологія, найчастіше реалізована на полімерно-дисперсних рідких кристалах (PDLC - Polymer Dispersed Liquid Crystals), пропонує покращений контроль над природним освітленням та енергоефективністю в будівлях [31]. Розробляються різні типи смарт-скла, включаючи ламіновані, загартовані, акустичні та варіанти у вигляді самоклеючої плівки, що задовольняють широкий спектр застосувань у будівництві, автомобілебудуванні та дизайні інтер'єру [50].

Зростаюча глобальна увага до відновлюваної енергетики стимулює удосконалення флоат-скла для сонячної енергетики [11]. Флоат-скло є ключовим компонентом фотоелектричних панелей, забезпечуючи захист та пропускання світла для перетворення сонячної енергії [49]. Зростає попит на високоефективні фотоелектричні модулі та надпрозоре флоат-скло, спеціально розроблене для сонячних елементів [11]. Інтеграція фотоелектричного скла у фасади та вікна будівель також є новою тенденцією, що дозволяє будівлям виробляти власну енергію [31].

Здатність флоат-процесу виробляти скло в широкому діапазоні товщин, від надтонкого (до 4 мм) до надтовстого (до 25 мм), також розширює його застосування [1]. Ця універсальність дозволяє використовувати флоат-скло у спеціалізованих областях поза традиційними вікнами, наприклад, в електроніці та передових технологічних пристроях [57].

ВИСНОВКИ

Цей огляд висвітлює значні сучасні інновації у виробництві листового скла флоат-методом, що з'явилися в період з 2014 по 2025 рік. Галузь продемонструвала сталу схильність до вдосконалення технологій печей та плавлення для підвищення ефективності та виробничих можливостей. Значна увага до сталого розвитку стимулювала дослідження альтернативних видів

палива, збільшення використання переробленого скла та розробку технологій уловлювання вуглецю. Інновації в технологіях нанесення покриттів на скло призвели до створення високоякісної продукції з покращеною енергоефективністю, сонячним контролем та іншими функціональними можливостями. Зростаюча інтеграція автоматизації та цифровізації, включаючи III та машинне навчання, змінює виробничі процеси, покращуючи контроль якості та уможлиблюючи прогнозне технічне обслуговування. Нарешті, розробка спеціалізованих видів флоат-скла, таких як смарт-скло та сонячне скло, відкриває нові ринки, які постійно розширюються. Разом ці досягнення демонструють динамічний та інноваційний характер галузі виробництва флоат-скла, яка відіграє життєво важливу роль у сучасному суспільстві, одночасно вирішуючи критичні виклики 21-го століття.

Список літератури:

1. Nascimento, M. L. F. (2014). Brief history of the flat glass patent – Sixty years of the float process. *World Patent Information*, 38, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2014.04.006>
2. Pilkington, A. (1969). The float glass process. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 314(1516), 1-25. <https://doi.org/10.1098/rspa.1969.0212>
3. Племянніков, М. М., Яценко, А. П., Пилипенко, І. В., Корнілович, Б. Ю. (2018). Інноваційні технології у виробництві спеціального та побутового скла [Електронний ресурс]: підручник для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізації «Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 1 файл (5,94 Мбайт). 298 с.
4. Pilkington. The float process. <https://www.pilkington.com/en/global/knowledge-base/glass-technology/the-float-process/the-float-process>
5. Cheng, B., Feng, H., Wu, F., Liang, X., & Li, M. (2024). Study on the Characteristics of Molten Glass in a Float Glass Process with a New Structure. *Materials*, 17(20), 4989. <https://doi.org/10.3390/ma17204989>
6. Forglass Engineering Sp. z o.o. (2021). Furnace for simultaneous continuous melting of multiple glasses (EP Patent No. 3907196A1). European Patent Office. <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.2/patents/EP3907196NWA1/document.html>
7. Xinyi Electronics (Wuhu) Co., Ltd. (2012). Float glass furnace (Китайський патент № CN202139161U). Державне управління інтелектуальної власності Китайської Народної Республіки. <https://patents.google.com/patent/CN202139161U/en>
8. Cheng, B., Feng, H., Wu, F., Liang, X., & Li, M. (2024c). Study on the Characteristics of Molten Glass in a Float Glass Process with a New Structure. *Materials*, 17(20), 4989. <https://doi.org/10.3390/ma17204989>
9. Justia Patents. Glass furnace with furnace charging means patents and patent applications (Class 65/335). <https://patents.justia.com/patents-by-us-classification/65/335>

10. Decarbonizing flat glass. US Glass Magazine Insights. <https://usglassmag.com/insights/2024/09/decarbonizing-flat-glass/>
11. Float glass market report | Industry analysis, size & forecast... <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/float-glass-market>
12. Carbon footprint of glass industry 101: Understanding the environmental impact of glass production. <https://glassforum.org/carbon-footprint-of-glass-industry/>
13. AGC Glass Europe. Environmental impact. <https://www.agc-glass.eu/en/sustainability/decarbonisation/environmental-impact>
14. Pilkington. Sustainability FAQs. <https://www.pilkington.com/en/us/window-manufacturers/sustainability/sustainability-faq>
15. ToughGlaze. How the glass industry is embracing sustainability. <https://www.toughglaze.com/how-the-glass-industry-is-embracing-sustainability>
16. Taufique, M., Akram, T., & Fatima, T. (2024). The performance of glass industry in India: A study of temporal analysis. International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM), 9(11), 150–156. <https://doi.org/10.35291/2454-9150.2024.0041>
17. Elstner, M., Contino, A., & Zaccaria, M. (2024, June). Recycle glass: A contribution to the circularity of flat glass. In Challenging Glass Conference Proceedings (Vol. 9). DOI: <https://doi.org/10.47982/cgc.9.572>
18. Capturing geogenic CO₂ from glass making. Pollution Solutions Online. <https://www.pollutionsolutions-online.com/news/air-clean-up/16/sbh4-gmbh/capturing-geogenic-co2-from-glass-making/55970>
19. Airovation Technologies. Glass industry. <https://www.airovation-tech.com/glassindustry>
20. C-Capture's pioneering carbon capture project reaches UK glass awards final. <https://c-capture.co.uk/c-captures-pioneering-carbon-capture-project-reaches-uk-glass-awards-final/>
21. GEA. (2022). GEA unveils CO₂ capture technologies for a more sustainable glass industry at glasstec 2022. <https://www.gea.com/en/news/trade-press/2022/gea-co2-capture-technology-at-glasstec/>
22. NSG Group. (2024). Successful start to Europe's first carbon capture trial in flat glass industry. <https://www.nsg.com/en/media/ir-updates/announcements-2024/carbon-capture-trial>
23. Sphinx Glass. Sustainable glass supports a greener planet. <https://www.sphinxglass.com/sustainable-glass/>
24. Glass Bulletin. Sustainable glass: How to reduce the ecological footprint with water filtration systems. <https://glassbulletin.com/latest-updates/sustainable-glass-how-to-reduce-the-ecological-footprint-with-water-filtration-systems/>
25. Glass Magazine. World of glass 2025 report. <https://www.glassmagazine.com/article/world-glass-2025-report>
26. McCamy, J. CVD coatings on glass [Lecture notes]. Lehigh University, Institute for Metal Forming. https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProcess/Lectures/Lecture11_McCamy_CVD%20Coatings%20On%20Glass.pdf
27. A case study of chemical vapor deposition (CVD) methods. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/industries_technologies/imf/pdfs/glasscoatingsstudy.pdf
28. Selecting the best float glass coating technology. <https://www.glassonweb.com/news/selecting-best-float-glass-coating-technology>
29. Innovations in glass coating technology: High-performance equipment and industrial applications. <https://www.agc-plasma.com/innovations-in-glass-coating-equipment/>

30. Tien, C. (2023). Special issue “Advanced Coating Technology by Physical Vapor Deposition and Applications.” *Coatings*, 13(2), 467. <https://doi.org/10.3390/coatings13020467>
31. Glass industry trends in 2024. <https://architecturalglass.com/blogs/news/glass-industry-trends-in-2024>
32. Khaled, K., & Berardi, U. (2021, August). Advancements in glazing coating technologies (pp. 1–12). Paper presented at the 8th International Building Physics Conference (IBPC 2021), Copenhagen, Denmark. https://www.researchgate.net/publication/354150643_Advancements_in_glazing_coating_technologies
33. Vitro Architectural Glass. The science of low-e coatings. Vitro Glass Education Center. <https://glassed.vitroglazings.com/topics/the-science-of-low-e-coatings>
34. Vogel, N., Belisle, R. A., Hatton, B., Wong, T., & Aizenberg, J. (2013). Transparency and damage tolerance of patternable omniphobic lubricated surfaces based on inverse colloidal monolayers. *Nature Communications*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms3176>
35. Saint-Gobain Glass India. Glass manufacturing process | How is glass made. <https://in.saint-gobain-glass.com/knowledge-center/glass-manufacturing-process>
36. Glass Academy. Float glass production process. <https://glass-academy.com/float-glass-production-process/>
37. Xue, S., Yang, S., Li, X., Li, Q., & Hu, B. (2024). A comprehensive review on self-cleaning glass surfaces: durability, mechanisms, and functional applications. *RSC Advances*, 14(46), 34390–34414. <https://doi.org/10.1039/d4ra06680d>
38. Pilkington Clear Advantage. The Pilkington process changed the way auto glass is made. <http://www.pilkingtonclearadvantage.com/home/HowItsMade>
39. Isra Vision. Innovative inspection solutions for float glass. <https://www.isravision.com/en-en/industries/glass/float-glass>
40. Glastory. Key applications of automation in glass processing. <https://www.glastory.net/key-applications-of-automation-in-glass-processing/>
41. Integrated controls automation enables high-speed float-glass stacking. <https://www.automate.org/motion-control/news/integrated-controls-automation-enables-high-speed-float-glass-stacking>
42. Mendix. Vivix transforms glass manufacturing for a clearer future. <https://www.mendix.com/customer-stories/vivix-transforms-glass-manufacturing-for-a-clearer-future/>
43. Robots.com. Automation of glass manufacturing. <https://www.robots.com/articles/automation-of-glass-manufacturing>
44. Robovis AI Labs. Securing an industrial giant for float glass surface inspection. <https://robovis.ai/home/f/securing-an-industrial-giant-for-float-glass-surface-inspection>
45. Beautipak. Automation revolutionizing glass bottle production. <https://beautipak.com/automation-in-glass-bottle-production/>
46. Bucher Emhart Glass. (2024, July). Artificial intelligence [Feature document]. <https://emhartglass.com/sites/default/files/2024-07/AI%20Feature.pdf>
47. Glasstec Online. Deep learning: AI in the machine technology of the flat glass industry. https://www.glasstec-online.com/en/Media_News/Magazine/Stories/Deep_Learning_AI_in_the_machine_technology_of_the_flat_glass_industry
48. The RoviSys Company. Automating process perfection - Glass manufacturing. <https://www.rovisys.com/success-stories/automating-process-perfection-glass-manufacturing/>
49. Business Wire. (2024, November 19). Construction glass industry research report 2024-2033... <https://www.businesswire.com/news/home/20241119375937/en/Construction-Glass-Industry-Research-Report-2024-2033-Innovations-in-Smart-Glass-Low-emissivity->

[Coatings-and-Advanced-Glazing-Technologies-Fueling-the-160-Billion-Market---ResearchAndMarkets.com](#)

50. Emergen Research. Global float glass market size, growth, industry trends. Northeast News Channel Nebraska. <http://northeast.newschannelnebraska.com/story/52675745/global-float-glass-market-size-growth-industry-trends-emergen-research>
51. Intelligent Glass. Everything you need to know about smart glass. <https://intelligentglass.net/everything-need-know-smart-glass/>
52. EB Glass. How switchable opaque glass and PDLC smart film are made. <https://ebglass.net/manufacturing-process/>
53. PDLCGlass.com. Complete guide: Switchable smart glass production process. <https://www.pdlcglass.com/complete-guide-switchable-smart-glass-production-process/>
54. Huichi Industrial Development Co.,Ltd. Smart glass production method. Knowledge. <https://www.huichipdlc.com/info/smart-glass-production-method-44686523.html>
55. Intelligent Glass. Manufacturing process of smart glass. <https://intelligentglass.net/why-choose-us/manufacturing-process/>
56. IBISWorld. Flat glass manufacturing in the UK - Market research report (2014-2029). <https://www.ibisworld.com/united-kingdom/industry/flat-glass-manufacturing/1230/>
57. AZoM. Float glass - Properties and applications. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=89>

References:

1. Nascimento, M. L. F. (2014). Brief history of the flat glass patent – Sixty years of the float process. World Patent Information, 38, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2014.04.006>
2. Pilkington, A. (1969). The float glass process. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 314(1516), 1-25. <https://doi.org/10.1098/rspa.1969.0212>
3. Plemiannikov, M. M., Yatsenko, A. P., Pylypenko, I. V., Kornilovych, B. Yu. (2018). Innovatsiini tekhnolohii u vyrobnytstvi spetsialnoho ta pobutovoho skla [Elektronnyi resurs]: pidruchnyk dlia studentiv spetsialnosti 161 «Khimichni tekhnolohii ta inzheneriia», spetsializatsii «Khimichni tekhnolohii neorhanichnykh keramichnykh materialiv». Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 1 fail (5,94 Mbait). 298 s.
4. Pilkington. The float process. <https://www.pilkington.com/en/global/knowledge-base/glass-technology/the-float-process/the-float-process>
5. Cheng, B., Feng, H., Wu, F., Liang, X., & Li, M. (2024). Study on the Characteristics of Molten Glass in a Float Glass Process with a New Structure. Materials, 17(20), 4989. <https://doi.org/10.3390/ma17204989>
6. Forglass Engineering Sp. z o.o. (2021). Furnace for simultaneous continuous melting of multiple glasses (EP Patent No. 3907196A1). European Patent Office. <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.2/patents/EP3907196NWA1/document.html>
7. Xinyi Electronics (Wuhu) Co., Ltd. (2012). Float glass furnace (Китайський патент № CN202139161U). Державне управління інтелектуальної власності Китайської Народної Республіки. <https://patents.google.com/patent/CN202139161U/en>
8. Cheng, B., Feng, H., Wu, F., Liang, X., & Li, M. (2024c). Study on the Characteristics of Molten Glass in a Float Glass Process with a New Structure. Materials, 17(20), 4989. <https://doi.org/10.3390/ma17204989>
9. Justia Patents. Glass furnace with furnace charging means patents and patent applications (Class 65/335). <https://patents.justia.com/patents-by-us-classification/65/335>
10. Decarbonizing flat glass. US Glass Magazine Insights. <https://usglassmag.com/insights/2024/09/decarbonizing-flat-glass/>

11. Float glass market report | Industry analysis, size & forecast... <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/float-glass-market>
12. Carbon footprint of glass industry 101: Understanding the environmental impact of glass production. <https://glassforum.org/carbon-footprint-of-glass-industry/>
13. AGC Glass Europe. Environmental impact. <https://www.agc-glass.eu/en/sustainability/decarbonisation/environmental-impact>
14. Pilkington. Sustainability FAQs. <https://www.pilkington.com/en/us/window-manufacturers/sustainability/sustainability-faq>
15. ToughGlaze. How the glass industry is embracing sustainability. <https://www.toughglaze.com/how-the-glass-industry-is-embracing-sustainability>
16. Taufique, M., Akram, T., & Fatima, T. (2024). The performance of glass industry in India: A study of temporal analysis. International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM), 9(11), 150–156. <https://doi.org/10.35291/2454-9150.2024.0041>
17. Elstner, M., Contino, A., & Zaccaria, M. (2024, June). Recycle glass: A contribution to the circularity of flat glass. In Challenging Glass Conference Proceedings (Vol. 9). DOI: <https://doi.org/10.47982/cgc.9.572>
18. Capturing geogenic CO₂ from glass making. Pollution Solutions Online. <https://www.pollutionsolutions-online.com/news/air-clean-up/16/sbh4-gmbh/capturing-geogenic-co2-from-glass-making/55970>
19. Airovation Technologies. Glass industry. <https://www.airovation-tech.com/glassindustry>
20. C-Capture's pioneering carbon capture project reaches UK glass awards final. <https://c-capture.co.uk/c-captures-pioneering-carbon-capture-project-reaches-uk-glass-awards-final/>
21. GEA. (2022). GEA unveils CO₂ capture technologies for a more sustainable glass industry at glasstec 2022. <https://www.gea.com/en/news/trade-press/2022/gea-co2-capture-technology-at-glasstec/>
22. NSG Group. (2024). Successful start to Europe's first carbon capture trial in flat glass industry. <https://www.nsg.com/en/media/ir-updates/announcements-2024/carbon-capture-trial>
23. Sphinx Glass. Sustainable glass supports a greener planet. <https://www.sphinxglass.com/sustainable-glass/>
24. Glass Bulletin. Sustainable glass: How to reduce the ecological footprint with water filtration systems. <https://glassbulletin.com/latest-updates/sustainable-glass-how-to-reduce-the-ecological-footprint-with-water-filtration-systems/>
25. Glass Magazine. World of glass 2025 report. <https://www.glassmagazine.com/article/world-glass-2025-report>
26. McCamy, J. CVD coatings on glass [Lecture notes]. Lehigh University, Institute for Metal Forming. https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProcess/Lectures/Lecture11_McCamy_CVD%20Coatings%20On%20Glass.pdf
27. A case study of chemical vapor deposition (CVD) methods. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/industries_technologies/imf/pdfs/glasscoating_study.pdf
28. Selecting the best float glass coating technology. <https://www.glassonweb.com/news/selecting-best-float-glass-coating-technology>
29. Innovations in glass coating technology: High-performance equipment and industrial applications. <https://www.agc-plasma.com/innovations-in-glass-coating-equipment/>
30. Tien, C. (2023). Special issue “Advanced Coating Technology by Physical Vapor Deposition and Applications.” Coatings, 13(2), 467. <https://doi.org/10.3390/coatings13020467>

31. Glass industry trends in 2024. <https://architecturalglass.com/blogs/news/glass-industry-trends-in-2024>
32. Khaled, K., & Berardi, U. (2021, August). Advancements in glazing coating technologies (pp. 1–12). Paper presented at the 8th International Building Physics Conference (IBPC 2021), Copenhagen, Denmark. https://www.researchgate.net/publication/354150643_Advancements_in_glazing_coating_technologies
33. Vitro Architectural Glass. The science of low-e coatings. Vitro Glass Education Center. <https://glassed.vitroglazings.com/topics/the-science-of-low-e-coatings>
34. Vogel, N., Belisle, R. A., Hatton, B., Wong, T., & Aizenberg, J. (2013). Transparency and damage tolerance of patternable omniphobic lubricated surfaces based on inverse colloidal monolayers. Nature Communications, 4(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms3176>
35. Saint-Gobain Glass India. Glass manufacturing process | How is glass made. <https://in.saint-gobain-glass.com/knowledge-center/glass-manufacturing-process>
36. Glass Academy. Float glass production process. <https://glass-academy.com/float-glass-production-process/>
37. Xue, S., Yang, S., Li, X., Li, Q., & Hu, B. (2024). A comprehensive review on self-cleaning glass surfaces: durability, mechanisms, and functional applications. RSC Advances, 14(46), 34390–34414. <https://doi.org/10.1039/d4ra06680d>
38. Pilkington Clear Advantage. The Pilkington process changed the way auto glass is made. <http://www.pilkingtonclearadvantage.com/home/HowItsMade>
39. Isra Vision. Innovative inspection solutions for float glass. <https://www.isravision.com/en-en/industries/glass/float-glass>
40. Glastory. Key applications of automation in glass processing. <https://www.glastory.net/key-applications-of-automation-in-glass-processing/>
41. Integrated controls automation enables high-speed float-glass stacking. <https://www.automate.org/motion-control/news/integrated-controls-automation-enables-high-speed-float-glass-stacking>
42. Mendix. Vivix transforms glass manufacturing for a clearer future. <https://www.mendix.com/customer-stories/vivix-transforms-glass-manufacturing-for-a-clearer-future/>
43. Robots.com. Automation of glass manufacturing. <https://www.robots.com/articles/automation-of-glass-manufacturing>
44. Robovis AI Labs. Securing an industrial giant for float glass surface inspection. <https://robovis.ai/home/f/securing-an-industrial-giant-for-float-glass-surface-inspection>
45. Beautipak. Automation revolutionizing glass bottle production. <https://beautipak.com/automation-in-glass-bottle-production/>
46. Bucher Emhart Glass. (2024, July). Artificial intelligence [Feature document]. <https://emhartglass.com/sites/default/files/2024-07/AI%20Feature.pdf>
47. Glasstec Online. Deep learning: AI in the machine technology of the flat glass industry. https://www.glasstec-online.com/en/Media_News/Magazine/Stories/Deep_Learning_AI_in_the_machine_technology_of_the_flat_glass_industry
48. The RoviSys Company. Automating process perfection - Glass manufacturing. <https://www.rovisys.com/success-stories/automating-process-perfection-glass-manufacturing/>
49. Business Wire. (2024, November 19). Construction glass industry research report 2024-2033... <https://www.businesswire.com/news/home/20241119375937/en/Construction-Glass-Industry-Research-Report-2024-2033-Innovations-in-Smart-Glass-Low-emissivity-Coatings-and-Advanced-Glazing-Technologies-Fueling-the-160-Billion-Market---ResearchAndMarkets.com>

50. Emergen Research. Global float glass market size, growth, industry trends. Northeast News Channel Nebraska. <http://northeast.newschannelnebraska.com/story/52675745/global-float-glass-market-size-growth-industry-trends-emergen-research>
51. Intelligent Glass. Everything you need to know about smart glass. <https://intelligentglass.net/everything-need-know-smart-glass/>
52. EB Glass. How switchable opaque glass and PDLC smart film are made. <https://ebglass.net/manufacturing-process/>
53. PDLCGlass.com. Complete guide: Switchable smart glass production process. <https://www.pdlcglass.com/complete-guide-switchable-smart-glass-production-process/>
54. Huichi Industrial Development Co.,Ltd. Smart glass production method. Knowledge. <https://www.huichipdlc.com/info/smart-glass-production-method-44686523.html>
55. Intelligent Glass. Manufacturing process of smart glass. <https://intelligentglass.net/why-choose-us/manufacturing-process/>
56. IBISWorld. Flat glass manufacturing in the UK - Market research report (2014-2029). <https://www.ibisworld.com/united-kingdom/industry/flat-glass-manufacturing/1230/>
57. AZoM. Float glass - Properties and applications. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=89>

MODERN INNOVATIONS IN FLOAT GLASS MANUFACTURING TECHNOLOGY

Ihor PYLYPENKO

PhD, Assistant,
Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute

Abstract. *The article investigates innovations in float glass manufacturing. The object of the study is the float process itself and its key improvements introduced between 2014 and 2025. The purpose of this review is to analyze significant technological advancements driven by the global focus on environmental sustainability and overall technological progress. The main findings of the study highlight progress in several areas: improvements in melting furnace designs to enhance energy efficiency and production flexibility; the integration of sustainable practices, including the use of alternative fuels, increased cullet usage, and the development of carbon capture technologies; the evolution of coating technologies (low-emissivity [Low-E], solar control, self-cleaning); the growing role of automation, artificial intelligence (AI), and digitalization for process optimization; and the emergence of specialized glass types (smart glass, solar glass).*

Key words: *hydrogen, decarbonization, deposition, recycling, furnace, melting, coating, smart glass, float process.*