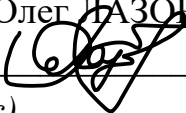


Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Фізичний факультет
Кафедра загальної фізики

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри загальної фізики
проф. Олег ЛАЗОРЕНКО

(підпис)
« 16 » 06 2025 р.

Оцінка « 60 (задовільно) »
/ Голова ЕК
проф. 
(підпис)
« 19 » 06 2025 р.

РОЗІТ Ілля Андрійович

Фізичні властивості вітражного скла та вплив на них домішок металів

Кваліфікаційна робота
на здобуття освітнього ступеня
«Бакалавр» за спеціальністю
104 – «фізика та астрономія»
освітньо-професійна програма «фізика»

(підпис студента)

Науковий керівник – доцент кафедри
загальної фізики, канд. фіз.-мат. н.,
Олена САВЧЕНКО

(підпис)

Рецензент – старший викладач кафедри
фізичної оптики
Валентин ЛИМАР

(підпис)

Консультант – аспірант 2 року навчання
фізичного факультету
Любов ПАЩЕНКО

(підпис)

Харків 2025

АНОТАЦІЯ

Розіт І. А. «Фізичні властивості вітражного скла та вплив на них домішок металів»

Дипломна робота на отримання освітнього ступеня «Бакалавр» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія», освітньо-професійна програма – «Фізика» – Харків, 2025 – 27 с. – 13 рис.

У даній роботі досліджено фізичні властивості вітражного скла та вплив на них домішок металів, зокрема оксидів кобальту, міді, заліза, марганцю та хрому. Представлено історичний і технологічний контекст розвитку вітражного мистецтва від античності до сучасності, з особливою увагою до взаємозв'язку між хімічним складом скла, методами виробництва й експлуатаційними властивостями.

У роботі проведено аналітичний огляд складів скла та методів виготовлення, експериментально досліджено оптичні, механічні та теплові характеристики зразків з різним вмістом домішок. Особливу увагу приділено процесам склування, фазовим перетворенням та мікроструктурним змінам при різних температурах випалу.

Результати дослідження показали, що точний добір домішок дозволяє керувати кольором, прозорістю, міцністю, термостійкістю та хімічною стійкістю скла. Отримані дані можуть бути корисними для виробництва декоративного та функціонального скла у вітражному мистецтві, архітектурі та технічних застосуваннях.

Ключові слова: вітражне скло, фізичні властивості, металеві домішки, оптичні характеристики, мікроструктура, температурний випал.

ABSTRACT

Rozit I. A. “Physical properties of stained glass and the influence of metal impurities on them”

Thesis for the degree "Bachelor" in specialty 104 – “Physics and Astronomy”, educational and professional program – “Physics” – Kharkiv, 2025 – 27 p. – 13 fig..

This thesis explores the physical properties of stained glass and the influence of metal impurities such as cobalt, copper, iron, manganese, and chromium oxides. The work presents both the historical and technological context of stained glass development—from antiquity to the present—focusing on the relationship between glass composition, production techniques, and performance characteristics.

An analytical overview of glass compositions and manufacturing methods is provided, along with an experimental study of optical, mechanical, and thermal properties of samples containing various impurities. Special attention is paid to glass transition processes, phase transformations, and microstructural changes at different firing temperatures.

The research results demonstrate that precise selection of metal additives enables control over color, transparency, strength, thermal stability, and chemical resistance. The findings can be applied in the production of both decorative and functional glass for stained glass art, architecture, and technical applications.

Key words: stained glass, physical properties, metal impurities, optical properties, microstructure, thermal firing.

ЗМІСТ	
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ.....	6
1.1. Давні витоки та Середньовічний розквіт.....	6
1.2. Технології виробництва скла у XX–XXI ст. та сучасне застосування.....	8
1.3 Основні фізичні характеристики кольорового скла	9
1.4 Процес складання вітражу	11
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА. ЗВ'ЯЗОК ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ТЕХНОЛОГІЇ.....	16
2.1 Зразки та експериментальні методики.....	16
2.2 Результати та обговорення.....	18
ВИСНОВКИ.....	26
ЛІТЕРАТУРА.....	27

ВСТУП

У дипломній роботі розглядається проблема отримання кольорового скла з бажаними фізичними характеристиками. Скло як матеріал використовується людством з давніх часів у вигляді природних мінералів, а також як продукт, отриманий за допомогою технологій. Під час виготовлення, починаючи з шихти і закінчуючи режимами охолодження, багато факторів впливають на кінцеві якості отриманого скла. Оскільки скло має дуже широкий спектр застосування від мистецтва і архітектури до медицини і науково-технічної сфери, відповідні дослідження зв'язку фізичних властивостей та технологій є, безумовно, важливими та актуальними.

З фізико-хімічної точки зору скло – неорганічна речовина, ізотропне тверде тіло з аморфною структурою, чому іноді розглядається як рідина з надзвичайною в'язкістю. Всі види скла утворюються в процесі охолодження расплавів шихти зі швидкістю, достатньою для уникнення кристалізації.

Отже, *об'єктом* розгляду в даній роботі є силікатне скло з додаванням різних модифікаторів. *Предмет* аналітичного дослідження - фізико-хімічні властивості кольорового скла і вплив на них параметрів технологічного процесу отримання. *Мета роботи* - прослідити покроковий аналіз підготовки зразків, умов виготовлення та контролю характеристик отриманого скла.

Основна увага приділяється оптичним, механічним та тепловим характеристикам. А саме: контролю кольору через точний добір домішок Со, Си, Fe для зберігання прозорості скла; міцності скла, яка є важливою для вітростійкості фасадів; лінійному коефіцієнту теплового розширення, критичному для уникнення тріщин під час експлуатації; хімічній стабільності під впливом зовнішнього середовища.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ ВІТРАЖНЕ СКЛО: ІСТОРИЧНИЙ НАРИС ТА СУЧАСНЕ ВИКОРИСТАННЯ

1.1. Давні витоки та Середньовічний розквіт

У Давньому Єгипті та Межиріччі ($\approx 1500\text{--}1000$ рр. до н. е.) скло як матеріал активно застосовували [1] для біжутерії, намист, амулетів. Найдавніші артефакти, знайдені в Єгипті, включають намиста, виготовлені за методом фрит-фрит обпикання (Рис. 1), де суміш піску, соди й оксидів металів сплавлялася для отримання барвистого матеріалу.



Рис. 1. Намисто Давнього Єгипту (1 ст. до н.е.)

В Індії й Середземномор'ї знайшли приклади кольорового скла, особливо арабо-перські рецепти, у «Книзі прихованої перлини» Джабіра ібн-Хайяна (VIII–IX ст.), де наведені рецепти синього, зеленого та жовтого скла для оздоблення мечетей та палаців. Починаючи з I ст. н.е., римляни використовували кольорове скло в мозаїках, термах і приватних будинках. Скляні вставки використовувалися в підлогах і освітленні палаців. Відомі декоративні артефакти часів Римської імперії (IV–V ст. н. е.), зокрема чаша Лікурґ [10], дихроїчне скло з наночастками золота та срібла, що змінює колір залежно від освітлення - зелена ззовні, червона — під світлом.

Пізніше, за часів Раннього середньовіччя (VII–XI ст.). у монастирі Джерроу (Англія) знайдені фрагменти кольорового скла з використанням олова, заліза, срібла – залишки раннього вітражу, який ймовірно служив освітлювальним елементом культового простору.

Початок масового використання вітражу починається з готики (XII–XIV ст.). Він пов’язаний із бенедиктинцями (Рис. 2.) — зокрема абатом Сюже з Сен-Дені (†1151), який уніфікував концепцію “*lux continua*” — безперервного світла, що символізує Божий промінь. Він прагнув створити інтер’єри, освітлені багатобарвним склом, утворюючи духовний настрій у соборі.



Рис. 2. Вітраж із Бенедиктинського абатства Монсеррат

В цей час відпрацьовувались також технічні прийоми: використання смальти (дрібне синє скло), і складна свинцева рама. Монахи та майстри використовували окисли міді, кобальту, заліза для отримання кольору, а

пізніше додавався срібний нітрат («silver stain [4]») для отримання жовтого відтінку. Прикладами поширення готичного вітражу в Західній Європі є собори у Шартрі, Реймсі, Кельні, Йорку, Солсбері, де скло заповнювало до 80 % зовнішніх стін.

У XV–XVI ст. (ренесанс і бароко) відбувся перехід до реалізму в тематиці вітражів : сцени з міфів, світської тематики, вигравірувані як живописні композиції. Прикладами можуть слугувати відомі об'єкти: вітражі для Дуомо у Флоренції, Кінгс-Коледж у Кембриджі, Палац дожів у Венеції. Особливе поширення набуло тонування тонких скляних листів — поверхні клеїлися, обпалювалися, використовували фарбу й срібне забарвлення .

1.2. Технології виробництва скла у XX–XXI ст. та сучасне застосування

З 1950-х років завдяки процесу ковзання скла по розплавленому металу (Float glass [2]) отримали рівну безтурбулентну поверхню. Стандарти EN 572 й ASTM C1036 визначають властивості та допустимі допуски, суттєво поширюють розміри та підвищують фізичні характеристики : Low-E — низькоемісійне покриття, яке підвищує енергоефективність, знижуючи тепловтрати; PVB-ламіноване — елемент безпеки, що при розбитті утримує осколки; Fusion glass / смальт — скло розміром із баскетбольний майданчик (впроваджене Judson Studios) для Часовні Воскресіння в Канзасі, що стало новою епохальною подією в сучасному мистецтві вітражу [.] ; вітражі-екрани для приватних будинків і готелів ; вітражі із пам'яттю, наприклад, панно про пустельну бурю на Сахарі (Pierre Marie або Brandon Schubert з Лондона); Львівська Опера та Римо-католицький собор демонструють поєднання традиційної свинцевої техніки з сучасною ламінованою технологією, що забезпечує безпеку скляних панелей.

Результативно інтегрують кольорові вітражні елементи і сучасні фасади , наприклад, будівля у Вроцлаві із сонячними фотоелементами під склом, а також релігійні простори старого й нового типу, такі як Колоннінські лабіринти або собор Нотр-Дам (нова диспута про сучасні вітражі

у каплицях). Прикладом новаторства, що демонструє поєднання класичного кольорового скла з фотокаталітичним покриттям та адаптивною вентиляцією є купол Рейхстагу в Берліні.

Ці приклади свідчать про те, що кольорове скло завдяки своїм унікальним фізичним властивостям, не втрачає своєї актуальності в архітектурі, мистецтві та науково-технічній сфері і сьогодні.

1.3 Основні фізичні характеристики кольорового скла

Хімічний склад скла суттєво впливає на його колір, прозорість та міцнісні характеристики.

Хімічний склад скляної матриці та роль модифікаторів:

SiO_2 (70-75 % за масою) – основа [6], що формує жорстку, аморфну систему.

- Na_2O (10–15 %) – знижує температуру плавлення [2] (флюс).
- CaO (5–10 %), MgO (0–5 %) – стабілізатори структури і підвищення хімічної стійкості.
- Al_2O_3 (0,1–3 %) – зміцнює в'язкість, зменшує чутливість до гігроскопічності.

Дуже важлива хімічна стійкість скла. Стійкість становить до pH 4–9 без ацидофіксації відповідно ISO 719 / ISO 695 . Лужні умови ($> \text{pH } 9$) призводять до поверхневої ерозії SiO_2 матриці; потребує загартування або покриття. На корозійну стійкість можуть впливати пігментні оксиди:

- CoO , Cr_2O_3 , TiO_2 не знижують стійкість.
- Fe^{2+} може створювати точки посилення корозії.

Нижче, у Таблицях 1-3 наведені основні фізичні характеристики кольорового скла.

Таблиця 1. *Оптичні параметри кольорового скла*

Пігмент (оксид)	Колір скла	Коефіцієнт заломлення (n)	Світлопропускання T(550 нм), %	Довжина хвилі поглинання λ_{max} , нм
CoO	Насичено-синій	1,520	60–70	620–640
Cu ₂ O	Бірюзовий/червоний	1,518	55–65	490 (бірюза), 800–900 (червоне)
Fe ₂ O ₃ / FeO	Зеленувато-бурий	1,515	70–85	500–550
MnO ₂	Фіолетовий	1,522	50–60	560–580
Cr ₂ O ₃	Темно-зелений	1,519	65–75	480–510

Оксиди Co, Cu, Fe, Mn утворюють кольори через d–d переходи або зарядові переносні стани. З наведених даних видно, наприклад, що Fe²⁺/Fe³⁺ співвідношення визначає відтінок від зеленого до жовтого, а Co²⁺ навіть у малих концентраціях надає склу глибокий синій колір.

Таблиця 2. *Механічні характеристики кольорового скла*

Тип скла / пігмент	Модуль Юнга, ГПа	Твердість (Vickers), кгс/мм ²	Міцність на згин, МПа	на Загартоване (+)
Базове содове скло	70	500–520	35–45	–
+ CoO (0,05– 0,1 mol%)	72–74	570–600	45–60	до 120
+ Cu ₂ O	71	540–560	40–55	до 110

Тип скла / Модуль пігмент	Юнга, ГПа	Твердість (Vickers), кгс/мм ²	Міцність на згин, МПа	на Загартоване (+)
+ Fe ₂ O ₃	69–71	520–550	38–50	до 105
+ MnO ₂	71–73	530–560	40–52	до 110

Міцність залежить від внутрішніх напруг: їх можна розраховувати через вимірювання твердість.

Таблиця 3. *Теплові властивості кольорового скла*

Склад скла	T _g , °C	LSTE (ppm/°C)	Теплопровідність, Вт/м·К	Стійкість до термошоку (°C)
Базове скло	570	9,2	0,9	~90
+ CoO	580	13–15	0,85	~120
+ Cu ₂ O	575	11–13	0,88	~115
+ Fe ₂ O ₃	565	12–14	0,87	~110
+ Cr ₂ O ₃	573	10–12	0,89	~115

* T_g - Перехідна температура

** LSTE - Лінійний коефіцієнт розширення

Для того, щоб продемонструвати важливість цих характеристик розглянемо поетапно процес складання вітражу.

1.4 Процес складання вітражу

Кожен вітраж починається зі створення художнього проекту. В проекті враховуються всі кольори та лінії олова(зазвичай на рисунку робляться чорними лініями).

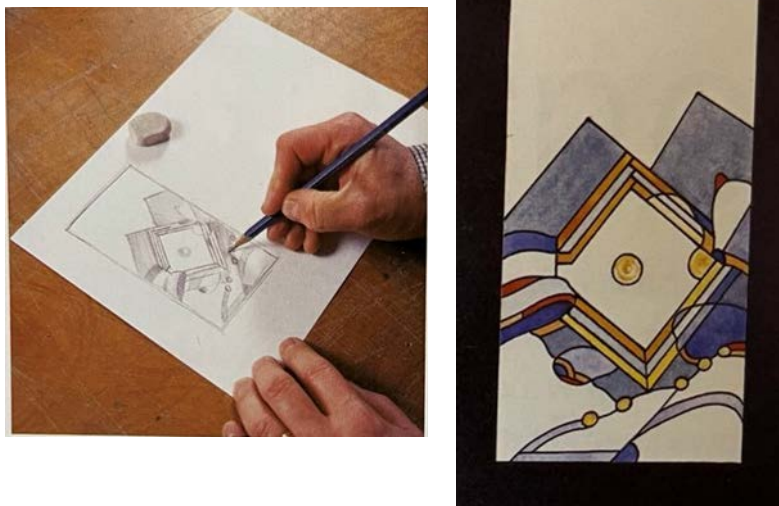


Рис. 3. Створення художнього проекту.

Далі відбувається процес підбору кольорового скла та емалей, котрих ми хочемо використати, при цьому необхідно врахувати *оптичні характеристики*



Рис. 4. Підбор кольорового скла та емалей

Наступною дією є отримання шаблону та подальше вирізання скла.

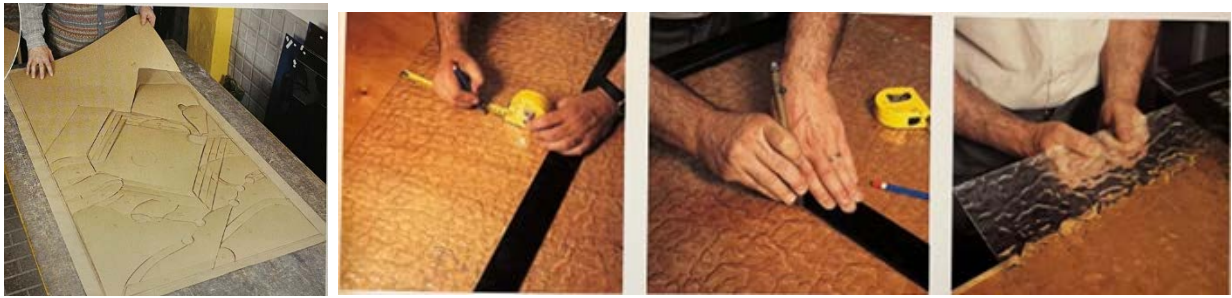


Рис. 5. Процес вирізання скла

При вирізання скла за шаблонами вирішальними є *механічні характеристики* та відповідний інструментарій. Існує кілька видів ножів до скла. На рисунку нижче представлені найчастіше використовуваний (а) та найдорожчий та найбільш ефективний (б) ріжучі інструменти



а



б

Рис. 6. (а) Ріжучий інструмент із масляним резервуаром у ручці. Він оснащений однією головкою з невеликим колесом , і завдяки постійному змащенню є надзвичайно міцним пристроєм. Ці типи інструментів, які випускаються у багатьох видах, підходять для різання промислового скла та товстих плит.

(б) Замість ріжучого колеса має діамант. Використовується для різання дуже твердого скла. При різанні деяких видів скла алмазом немає звуку і не з'являються білі лінії.

В залежності від проекту далі на скляні елементи накладають емалії та малюють, потім випалюють в вітражних пічках (зазвичай температура випалу 650 С) - зрозуміла важливість *термохарактеристик*.

Термічні та механічні властивості мають бути враховані також на етапі складання вітража. Він полягає в тому, щоб фрагменти скла поєднати олов'яними стрічками та в місцях з'єднань спаяти їх.

Процес починається з фіксації елементів та вирізання олов'яних стрічок потрібної довжини (Рис. 7. а, б, в, г) Далі скло треба вкласти в стрічки та зафіксувати

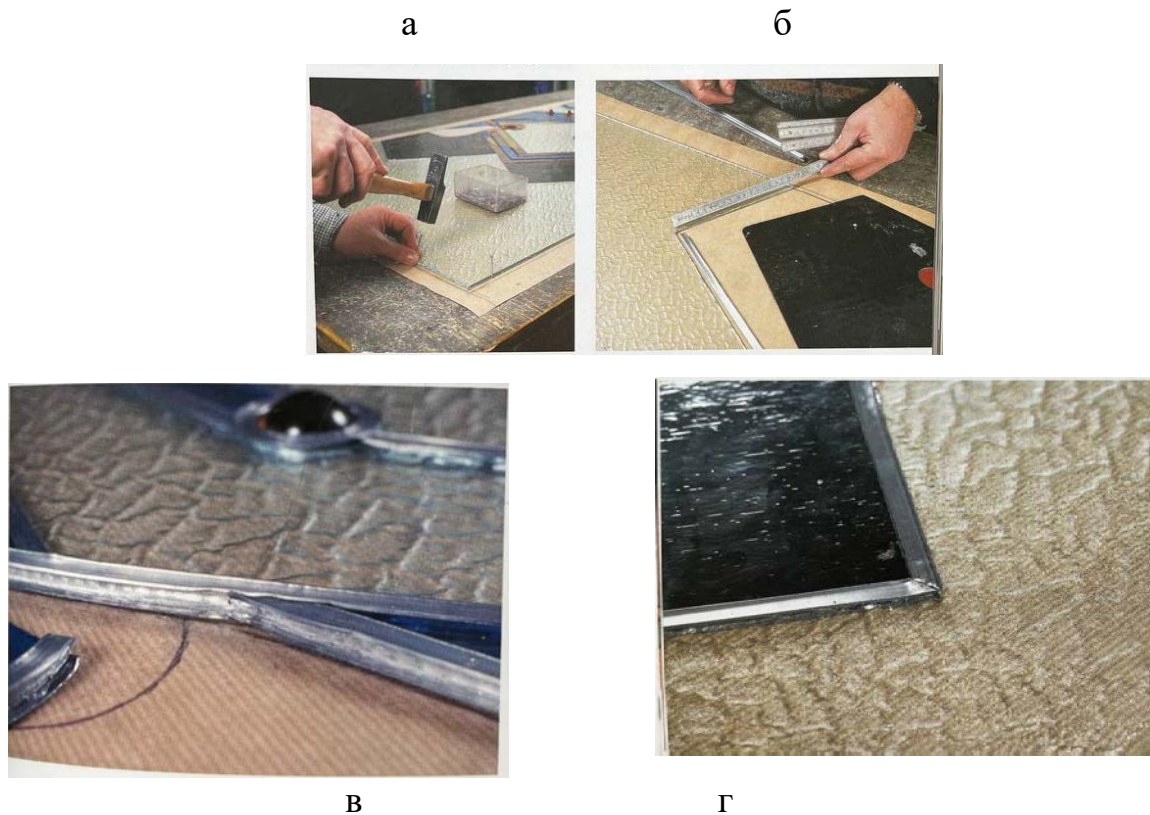
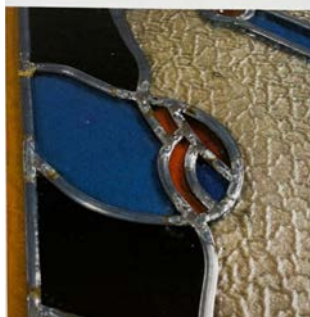


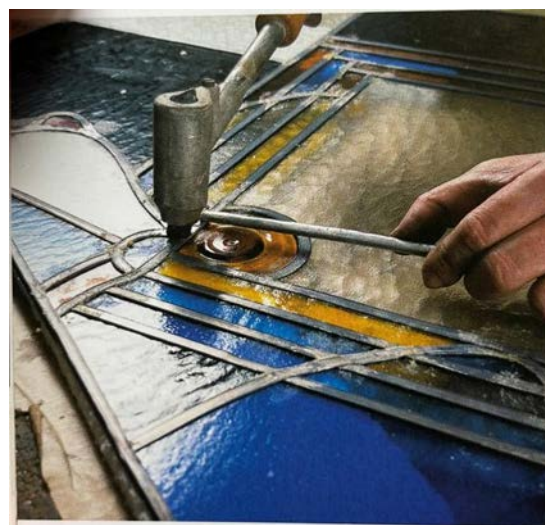
Рис. 7 Фіксація елементів та вирізання олов'яних стрічок

Процес спайки (Рис. 8. а, б, в) полягає у змащуванні з'єднань стеарином та спайки циною для зміцнення олов'яного профілю (*механічні та хімічні властивості*).

а



б



в

Рис. 8. Процесс спайки

РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА. ЗВ'ЯЗОК ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ТЕХНОЛОГІЇ

Знання впливу різних фізико-хімічних факторів на кінцевий продукт у випадку кольорового скла є надважливою багатокomпонентною задачею. Адже такі знання дають нам інструменти впливу на всі етапи процесу і можливості керування ним.

2.1 Зразки та експериментальні методики

Зразками для аналітичного дослідження були скла з різним хімічним складом, які були спеціально виготовлені з метою вивчення впливу окремих оксидних компонентів на фізико-хімічні властивості скломатеріалів. Основу всіх зразків становив діоксид кремнію (SiO_2), який є головною плівкоутворювальною речовиною в силікатних стеклах. Залежно від конкретного складу, до скла додавалися різні кількості оксидів лужних, лужноземельних та інших елементів.

До основних компонентів досліджуваних складів належали: SiO_2 (65–75%), Na_2O (10–18%), CaO (5–12%), а також домішки Al_2O_3 , K_2O , MgO та Fe_2O_3 . Зміна концентрації кожного з компонентів дозволила оцінити його роль у формуванні термічної стабільності, хімічної стійкості та механічної міцності скла. Особливу увагу приділяли зразкам з підвищеним вмістом Al_2O_3 , що, за даними попередніх досліджень, позитивно впливає на структуру аморфної сітки скла та підвищує його термостійкість.

Для визначення та кількісного вимірювання фізичних характеристик скла застосовуються такі відомі методики:

А) Для визначення оптичних параметрів:

Спектрофотометрія — застосовується для вимірювання пропускання та поглинання світла в УФ-, видимому та ІЧ-діапазонах. Наприклад, для скла, яке використовується у фотоніці, важливим є високий рівень прозорості в УФ-діапазоні (200–400 нм).

Рефрактометрія — використовується для визначення показника заломлення скла. Наприклад, рефрактометр Abbe дозволяє вимірювати n_d з точністю до 0.0001, що критично для оптичних лінз.

Полярископія [6] — визначає внутрішні напруження в склі шляхом спостереження за анізотропією під поляризованим світлом. Це важливо при виробництві оптичних вікон і лабораторного посуду.

Б) Для механічних характеристик:

Метод Віккерса [6] — дозволяє оцінити мікротвердість скла шляхом втискання алмазного індентора з подальшим вимірюванням відбитку. Наприклад, твердість лабораторного боросилікатного скла становить близько 500 кг/мм².

Випробування на згин — триточкове навантаження використовується для визначення межі міцності. Типове значення для віконного скла — 45–70 МПа.

Тест на ударну в'язкість (наприклад, за методом Шарпі) — дозволяє оцінити стійкість скла до раптових навантажень, що важливо для захисного скління.

В) Для теплових характеристик:

Диференціально-сканувальна калориметрія (DSC) — застосовується для визначення температури склування (T_g [3]) та кристалізації. Наприклад, T_g для звичайного содово-вапняного скла — близько 560 °C.

Дилатометрія — вимірює коефіцієнт лінійного теплового розширення (КЛТР). Для боросилікатного скла це приблизно $3,3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Лазерна флеш-методика — дозволяє точно вимірювати теплопровідність скла. Наприклад, для кварцового скла значення становить близько 1,4 Вт/м·К при 25 °C.

2.2 Результати та обговорення

В цій частині роботи виконаний та продемонстрований аналіз зв'язку фізичних характеристик і технології, підбираючи які можна впливати на кінцевий результат – отримання скла з заданими властивостями.

Температурні режими та фазові перетворення

Неоднорідність структури скла (рис.9) можна побачити на мікрофотознімках елементів старих мозаїк.

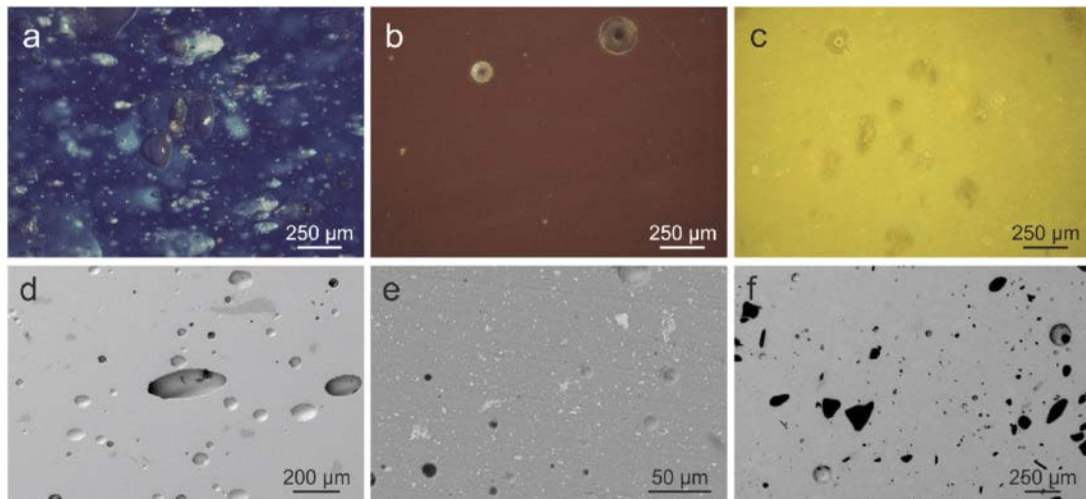


Рис. 9. Середньовічні мозаїчні тессери (синій, коричневий, жовтий). Видно великі вбудовані бульбашки та кристали кварцу й каситериту, характерні для високоборного або свинцево-олов'яного скла

Якісне скло отримується при плавке за температур 1350–1450 °С, що забезпечує однорідність розплаву.

Фазова діаграма системи $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O--CaO}$ [3] показує (рис.10), що при температурах нижче T_g (≈ 600 °С) можливий фазовий розклад із утворенням анортиту та кварцу. Введення Al_2O_3 підвищує температуру склування (T_g) на 20–40 °С, що знижує ризик кристалізації та покращує термостійкість скла.

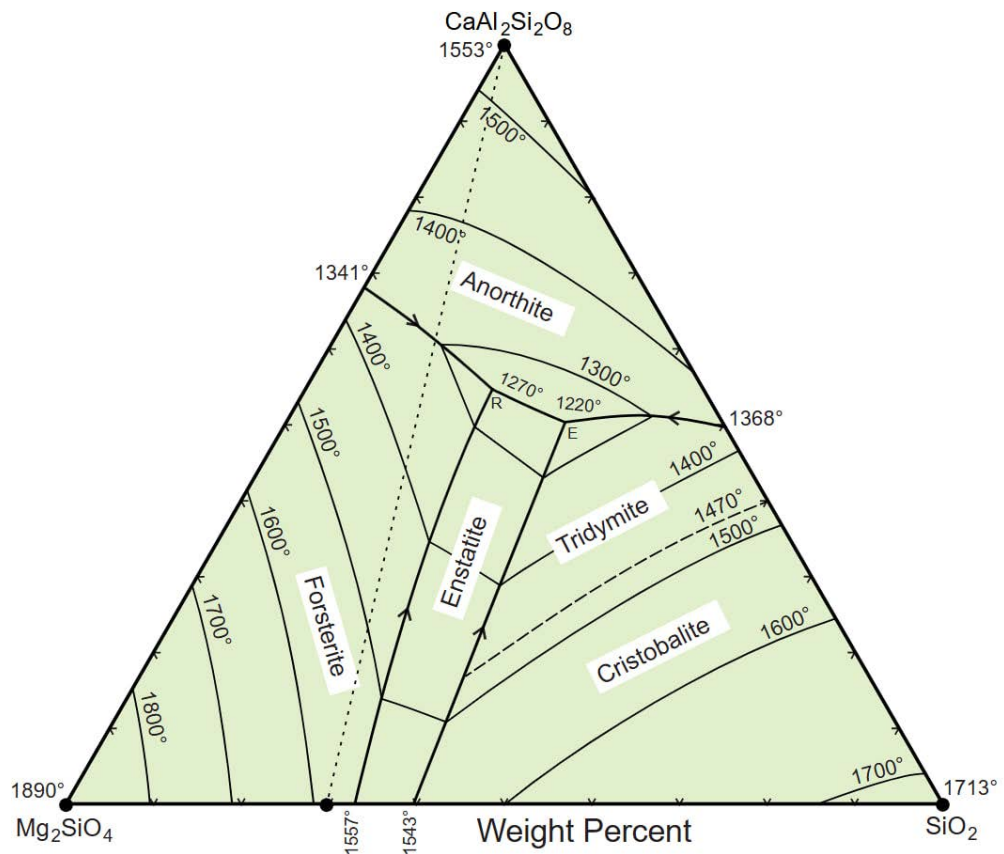


Рис. 10. Фазова діаграма системи $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O--CaO}$ [3]

Після плавки значення охолодження критичне:

- Повільне (прибл. $50\text{ }^\circ\text{C/год}$): зменшує внутрішні напруги, але створює ризик кристалізації.
- Швидке ($>200\text{ }^\circ\text{C/год}$): призводить до загартовування, враховуючи тісний розподіл стискання у шарі скла.
- Відпал при $550\text{ }^\circ\text{C}$ тривалістю 1–2 год знижує напруги і стабілізує структуру, але дещо зменшує твердість.

Нижче наведений вплив **випалу** на мікроструктуру скла (Рис.11). Можна побачити, як з ростом температури випалу відбувається мікроструктурна еволюція.

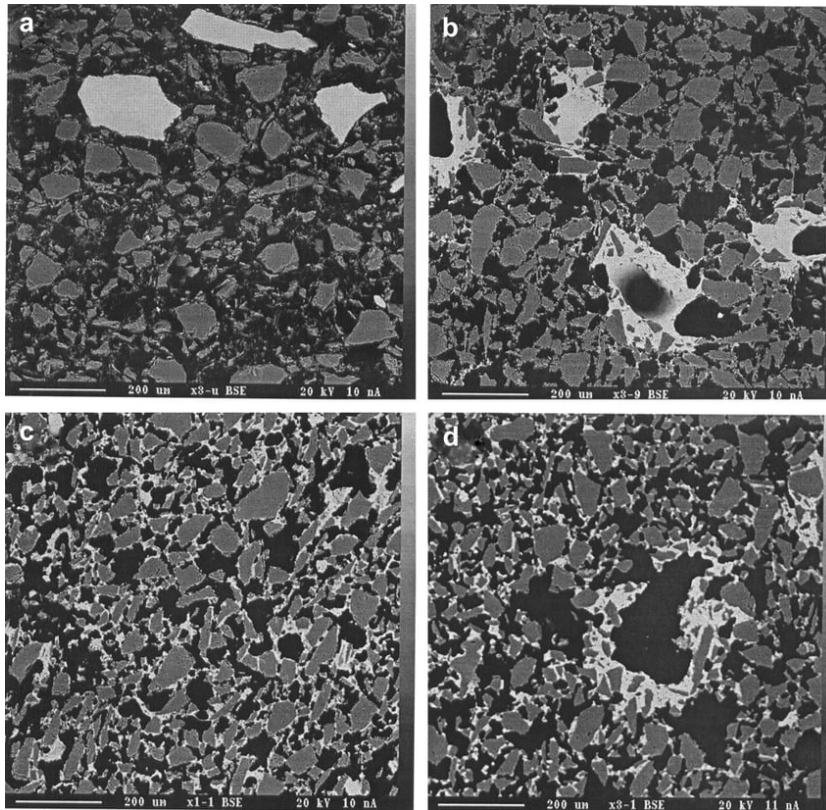


Рис. 11. Скло–кварцові пасти (stonepaste ceramics) – зображення змін мікроструктури: порожнини в стеклах і формування інтерфазних зв’язків по мірі підвищення температури випалу.

- а) Початкові стадії ($\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$). Яскраві фрагменти стекла (світло-сірі) ще зберігають форму, центральні порожнини всередині скляних фрагментів починають формуватися.
- б) Середні температури ($\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$). Скляні фрагменти розпадаються й реагують із кварцовими частинками $\rightarrow$ з’являються порожнини, фрагменти зливаються з кварцом.
- в) Високі температури ($1100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Більшість скляних фрагментів втрачає форму та перетворюється на міжчасткове скло $\rightarrow$ формуються інтерфазні скляні зв’язки між кварцовими зернами.
- г) $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Уся структура стає більш суцільною: інтерчасткове скло об’єднує кварц повністю, створюючи скло-кварцовий композит із щільним скляним зв’язком.

Оптичні властивості

Характерний *коефіцієнт заломлення (n)* для скла становить 1,5–1,52, і може змінюватися в залежності від PbO або TiO₂. Збільшення n веде до інтенсивнішого блиску і контрасту кольору.

Світлопропускання (T) залежить від шкали від 50 до 90 % залежно від концентрації пігменту.

Таблиця показників

Пігмент	n	T при 550 нм (%)	λ_{max} погл. (нм)
CoO	1,520	60	630
FeO/Fe ₂ O ₃	1,515	70	550?
CuO	1,518	65	800–1000

Спектри поглинання

Домішки кольорових оксидів-пігментів вже у невеликих відсотках змінюють відтінок скла.

Оксид	Колір	Концентрація (мол/мас)
CoO	синій	0,05–0,1 mol %
Cu ₂ O / CuO	червоний, бірюзовий	0,1–0,5 mol %
Fe ₂ O ₃ /FeO	зелений/жовтувато-бурий	0,2–1,0 mol %
MnO ₂	фіолетовий	0,05–0,2 mol %
Cr ₂ O ₃	темно-зелений	0,1–0,3 mol %

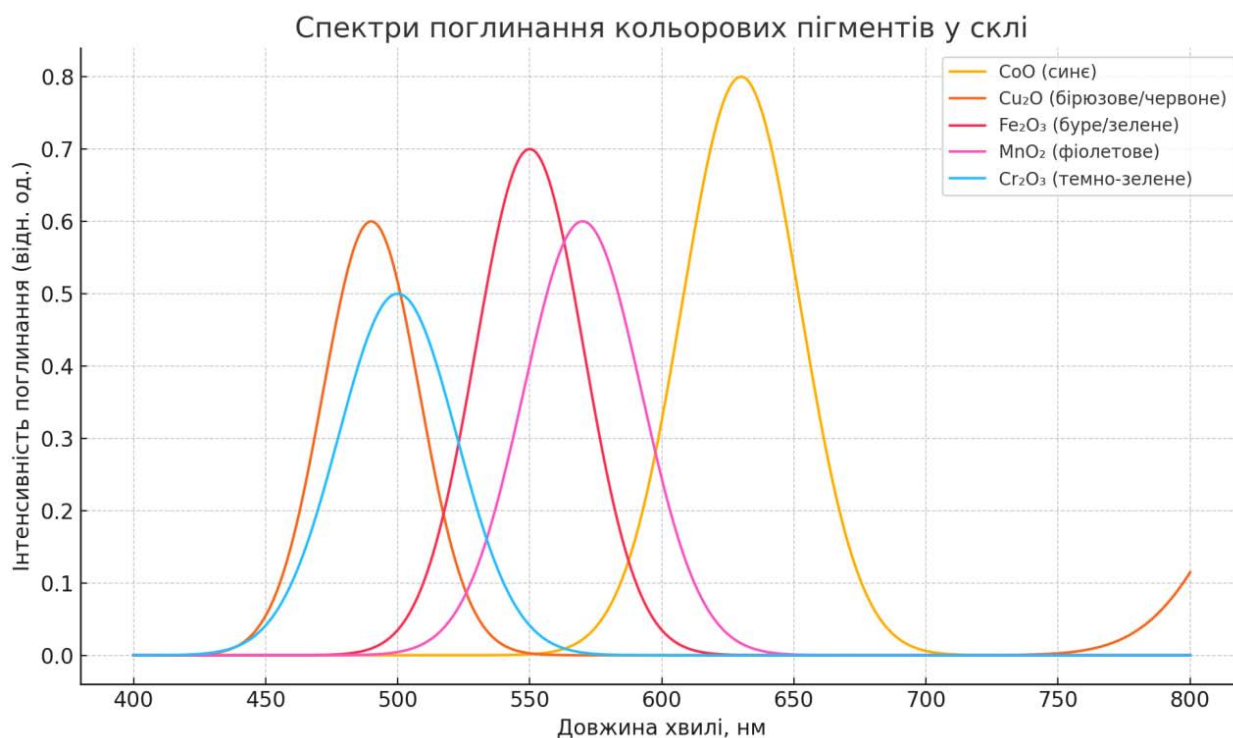


Рис. 12 – Спектри поглинання [8] Co, Fe, Cu скла (λ довжини).

- Со-скло: поглинає світло на 630 нм $\rightarrow$ глибокі сині відтінки.
- Fe-скло: максимум поглинання 500–600 нм $\rightarrow$ зелено-бурі тону.
- Cu-скло: дві смуги поглинання — ≈ 800 –1000 нм (Jahn–Teller) і ≈ 490 нм — бірюзовий відтінок .
- MnO₂ додає фіолетовий блиск.

Отже, вплив складу на оптичні властивості:

- Додавання CoO у кількості від 0,05 до 0,1 mol % призводить до яскраво вираженого глибоко-синього кольору за рахунок d-d-переходів іонів Co²⁺.
- Надлишок CoO зумовлює утворення кристалічних включень Co₂SiO₄ (фаяліт), що знижують прозорість.
- Співвідношення Fe²⁺/Fe³⁺ залежить від атмосфери плавлення: при відновній атмосфері утворюються іони Fe²⁺, які надають зеленуватих або блакитних тонів.

Механічні властивості

Модуль Юнга (E)

- Содово-кальцієве скло – ≈ 70 ГПа
- Загартоване [6] – залишається в діапазоні 70–75 ГПа, але механізм руйнування змінюється завдяки внутрішнім напруженням.

Міцність на розтяг і стиск

- Невідпалене: 30–50 МПа.

Загартоване [6]: може досягати 120 МПа, що в 2–4 рази більше стандартної форми. Твердість (H) (Рис. 11)

- Твердість Vickers: ~ 500 – 600 kgf/mm².

Додавання 2–5 mol % CoO підвищує її на ~ 15 % (раніше 500 $\rightarrow$ 575 kgf/mm²).

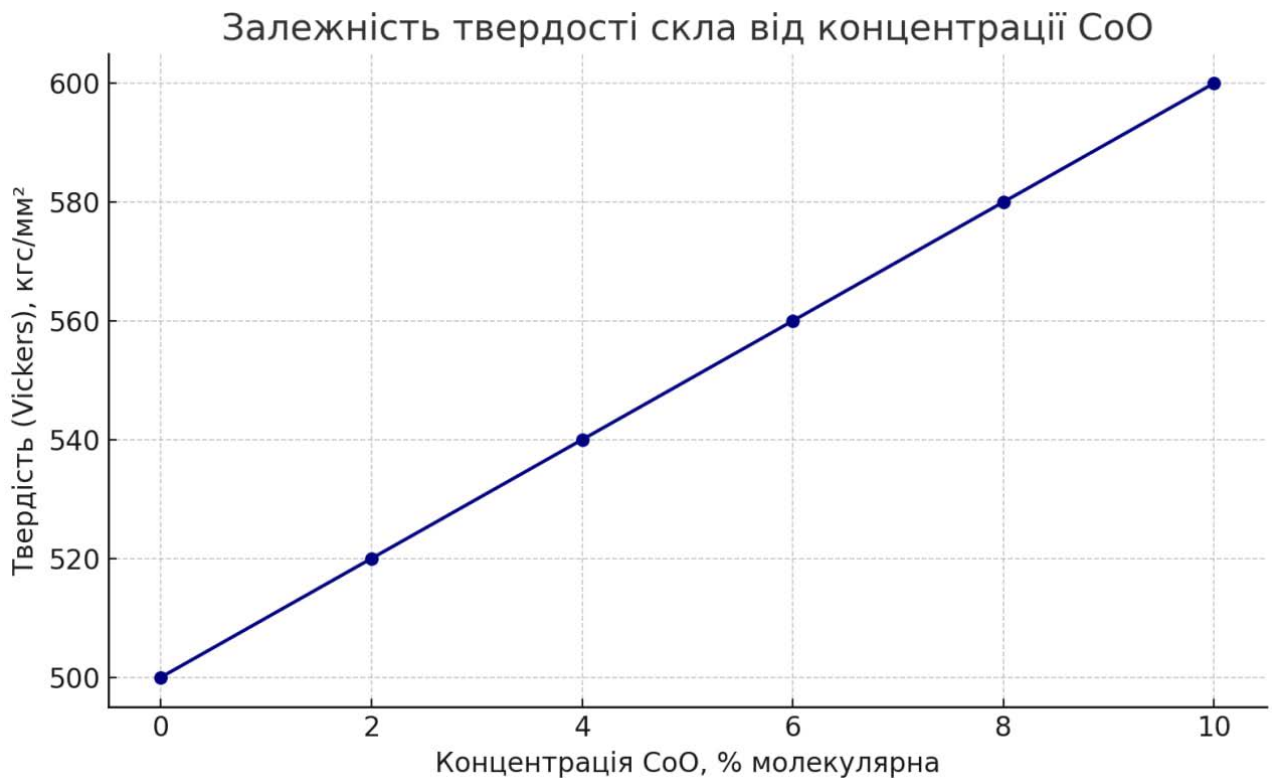


Рис. 13. – Графік залежності твердості від концентрації CoO.

Fusing при 700–800 °C дозволяє поєднувати шари скла з різними кольорами без застосування високого тиску чи тертя, що особливо важливо при виготовленні художніх виробів. Загартування повітрям створює рівномірний

розподіл стиснення в зовнішніх шарах скла, підвищуючи його міцність і термостійкість. Ламінація за допомогою полівінілбутиралу (PVB) суттєво підвищує безпеку — при руйнуванні шар залишається цілим, утримуючи уламки на місці.

Теплові властивості

Перехідна температура T_g

- Содово-кальцієві $\rightarrow \approx 573^\circ\text{C}$
- Боросилікатні (Pyrex) $\rightarrow \approx 536^\circ\text{C}$.
- Для кольорових скла — $T_g \approx 500\text{--}600^\circ\text{C}$.

Лінійний коефіцієнт розширення (LCTE)

- Soda-lime: $\sim 9\text{ ppm/K}$.
- Borosilicate: $\sim 3,3\text{ ppm/K}$.
- Ультранизького розширення (ULE): $< 1\text{ ppm/K}$ (тільки $\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2$).

Ефект включення CoO (+14,67) або Fe_2O_3 (+13,33) підвищує LCTE; MgO та CaO додають стабільність ($\sim 13\text{--}16\text{ ppm/K}$).

Теплопровідність (κ)

- $\approx 0,8\text{--}1,0\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ для кольорового скла.
- Важливо для керування термонавантаженнями у фасадах з PVB.

Зв'язок технології отримання й властивостей скла

Технологічні параметри напряму впливають на кінцеві властивості скла. Наприклад, поєднання температури плавлення 1400°C , швидкого охолодження ($> 200^\circ\text{C/год}$) і наступного відпалу при 550°C дає скло з високою прозорістю та ударостійкістю. Термоударостійкість різко зростає при оптимізації режиму загартування. Стандарти Ceram. Int. [15] (2023) вказують на можливість

досягнення +40 % підвищення міцності при ретельному доборі технологічних умов.

Останні дослідження демонструють значний вплив складу та режимів обробки на властивості скла. Зокрема, згідно з J. NonCryst. Solids (2022), введення 2–5 mol % CoO забезпечує збільшення твердості на 15 %. Інше дослідження, опубліковане в Ceram. Int. [15] (2023), показало, що поєднання швидкого охолодження зі структурованим відпалом може збільшити термоударостійкість на 40 %. Етапи експериментального процесу включали контроль температури плавлення, варіювання хімічного складу, тестування за допомогою DSC, SEM та проведення механічних випробувань.

ВИСНОВКИ

1. Контроль кольору через точний добір оксидів Co, Cu, Fe – зберігає інтенсивність та прозорість скла.
2. Міцність і твердість – позитивно корелюють із концентрацією CoO ; важливо для безпеки та вітростійкості фасадів.
3. Теплові властивості – LCTE від 9 до 15 ppm/K, критично для уникнення тріщин під час експлуатації.
4. Хімічна стабільність обмежена pH 4–9; для агресивного середовища потрібні зміцнюючі добавки або захисні покриття.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ящишин Й. М. Технологія скла у трьох частинах: Ч. 1. Фізика і хімія скла: Підручник. - Львів: Видавництво “Бескид Біт”, 2008. - 204 с.
2. Shelby, J.E. *Introduction to Glass Science and Technology*. — Royal Society of Chemistry, 2005. — 298 p.
3. Zanutto, E.D. “Glass Crystallization and Phase Separation.” *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 219, 1997, pp. 1–8.
4. Newton R., Davison S. *Conservation of Stained Glass in Architecture*. — Routledge, 2011. — 240 p.
5. Пентилюк М.І., Нікітіна Л.М. Матеріалознавство скла. — Львів: Видавництво ЛНУ, 2013. — 215 с.
6. Bingham, P.A., Parker, J.M. *Physical Properties of Glasses*. In: “Modern Glass Characterization”. Springer, 2020. — pp. 47–89.
7. Власюк В.П., Скляренко О.М. Технологія художнього скла. — Київ: Либідь, 2010. — 160 с.
8. MDPI Open Access Journals — www.mdpi.com
9. ResearchGate.net – міжнародна платформа наукових публікацій.
- 10.En.wikipedia.org – Статті про склад, властивості і виробництво скла.
- 11.Grafiati.com – бібліографічна база та генератор цитат.
- 12.Msciencework.com – наукова база з досліджень матеріалів.
- 13.Architecturaldigest.com – про сучасне застосування кольорового скла.
- 14.J. Non-Crystalline Solids, Elsevier – міжнародний науковий журнал.
- 15.Ceramics International, Elsevier – видання з матеріалознавства