

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

О. В. САВВОВА
О. В. БАБІЧ
Ю. О. СМІРНОВА
Т. В. ФАЛЬКО

ПРАКТИКУМ ПО ТЕХНОЛОГІЇ СКЛОМАТЕРІАЛІВ.
Ч. 1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2026

УДК 666.1(075.8)

П69

Автори:

Саввова Оксана Вікторівна, доктор технічних наук, завідувач кафедри хімії та інтегрованих технологій ХНУМГ ім. О. М. Бекетова;

Бабіч Олена Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій ХНУМГ ім. О. М. Бекетова;

Смирнова Юлія Олегівна, ст. викладач кафедри хімії та інтегрованих технологій ХНУМГ ім. О. М. Бекетова;

Фалько Тетяна Валентинівна, начальник хімічної лабораторії ТОВ «Малинівський склозавод»

Рецензенти:

Зайчук Олександр Вікторович, доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, завідувач кафедри хімічних технологій кераміки, скла та будівельних матеріалів Українського державного хіміко-технологічного університету;

Луцюк Ірина Володимирівна, доктор технічних наук, професор, заступник директора з науково-педагогічної роботи Інституту хімії та хімічних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

*Рекомендовано до друку Вченою радою ХНУМГ ім. О. М. Бекетова,
протокол № 8 від 27 березня 2026 р.*

Практикум по технології скломатеріалів : навч. посіб. : у 2 ч.
П69 Ч. 1. Технологічні та механічні властивості / О. В. Саввова, О. В. Бабіч, Ю. О. Смирнова, О. І. Фалько ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. – 151 с.

ISBN 978-966-695-650-0

ISBN 978-966-695-651-7 (Ч. 1)

Навчальний посібник присвячений вивченню сучасних методів дослідження та оцінювання технологічних і механічних характеристик скломатеріалів. У виданні систематизовано теоретичні основи та практичні підходи до визначення властивостей стекел, що формують їх експлуатаційні можливості та визначають ефективність застосування у різних галузях техніки й промисловості. Рекомендовано для здобувачів закладів вищої освіти, фахових коледжів і технікумів, які навчаються за спеціальністю «Хімічні технології та інженерія», а також для аспірантів, науковців, фахівців та інженерно-технічних працівників підприємств і установ силікатної галузі.

УДК 666.1(075.8)

ISBN 978-966-695-650-0

ISBN 978-966-695-651-7 (Ч. 1)

© О. В. Саввова, О. В. Бабіч,

Ю. О. Смирнова, Т. В. Фалько, 2026

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	6
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТЕКОЛ.....	10
1.1 Температура початку розм'якшення скла	10
1.1.1 Визначення температури початку розм'якшення скла.....	10
Контрольні запитання.....	14
Тестові завдання.....	16
1.2 В'язкість скла.....	18
1.2.1 Визначення в'язкості стекол в області пластичного стану.....	24
1.2.2 Метод розрахунку в'язкості стекол.....	29
Контрольні запитання	31
Тестові завдання.....	32
1.3 Поверхневий натяг скла.....	34
1.3.1 Визначення поверхневого натягу методом втягування у скломасу полого циліндра.....	37
1.3.2 Визначення поверхневого натягу за вагою вільно падаючих крапель скломаси.....	42
1.3.3 Визначення поверхневого натягу за методом найбільшого тиску у бульбашці.....	45
1.3.4 Метод розрахунку поверхневого натягу скла.....	46
Контрольні запитання	47
Тестові завдання.....	48
1.4 Розтікання та кут змочування скла.....	50
Контрольні запитання	54
Тестові завдання.....	56
1.5 Кристалізаційна здатність стекол та матеріалів на їхній основі.....	58
1.5.1 Залежність швидкості росту кристалів та швидкості утворення центрів кристалізації від температури.....	60
1.5.2 Вплив хімічного складу стекол на їхню кристалізаційну здатність.....	63
1.5.3 Визначення кристалізаційної здатності стекол градієнтним методом.....	67

1.5.4	Визначення кристалізаційної здатності стекол за методом масової кристалізації.....	69
1.5.5	Визначення кристалізаційної здатності стекол методом вертикально-градієнтної печі.....	70
1.5.6	Визначення кристалізаційної здатності стекол методом загартування.....	71
1.5.7	Методи якісної оцінки.....	72
	Контрольні запитання	76
	Тестові завдання.....	77
РОЗДІЛ 2 МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТЕКОЛ.....		80
2.1	Щільність скла.....	83
2.1.1	Метод гідростатичного зважування.....	85
2.1.2	Метод пікнометра.....	87
2.1.3	Розрахунковий метод.....	89
	Контрольні запитання	89
	Тестові завдання.....	91
2.2	Пружність скла.....	93
2.2.1	Визначення модуля пружності методом стріли прогину проби скла.....	95
2.2.2	Визначення модуля Юнга при згині.....	98
2.2.3	Розрахунковий метод визначення пружності скла.....	100
	Контрольні запитання	102
	Тестові завдання.....	104
2.3	Міцність скла.....	106
2.3.1	Визначення межі міцності скла на стиск	107
2.3.2	Визначення межі міцності скла на розтяг	110
2.3.3	Визначення межі міцності скла на вигин.....	113
2.3.4	Визначення межі міцності скла на удар.....	115
2.3.5	Визначення межі міцності скла на ударний вигин.....	117
2.3.6	Розрахунковий метод визначення міцності скла.....	120
	Контрольні запитання	122
	Тестові завдання.....	124
2.4	Твердість скла.....	126
2.4.1	Визначення твердості скла за Віккерсом.....	126
2.4.2	Визначення абразивної твердості скла.....	129
	Контрольні запитання	130

Тестові завдання.....	131
2.5 Мікротвердість скла.....	133
2.5.1 Визначення мікротвердості скла.....	134
2.5.2 Розрахунковий метод визначення мікроміцності скла.....	137
Контрольні запитання	138
Тестові завдання.....	139
2.6 Тріщиностійкість скла.....	141
2.6.1 Визначення тріщиностійкості скла.....	143
Контрольні запитання	144
Тестові завдання.....	145
СПИСОК ДЖЕРЕЛ	148

ПЕРЕДМОВА

Навчальний посібник «Практикум з технології скломатеріалів. Частина 1. Технологічні та механічні властивості» узагальнює основні сучасні теоретичні положення та методики визначення технологічних і механічних характеристик скломатеріалів. Видання систематизує фундаментальні знання та практичні підходи, необхідні для формування у здобувачів цілісного розуміння закономірностей формування властивостей матеріалів залежно від умов їхнього одержання та обробки.

Особливу увагу приділено логічній послідовності викладення матеріалу та висвітленню взаємозв'язку між технологічними параметрами виробництва скломатеріалів і їхніми експлуатаційними властивостями. Такий підхід сприяє формуванню системного мислення та розвитку професійних компетентностей майбутніх фахівців.

Посібник підготовлено відповідно до оновлених навчальних планів підготовки здобувачів спеціальності «Хімічні технології та інженерія» та включено до єдиного комплексу навчально-методичних видань, що готуються до друку кафедрою хімії та інтегрованих технологій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. Використання цього видання в освітньому процесі сприятиме підвищенню якості професійної підготовки завдяки розвитку здатності творчо застосовувати набуті знання для розв'язання типових і ситуаційних науково-технологічних завдань.

Під час підготовки посібника було використано сучасні наукові публікації, підручники, навчальні посібники та монографії з технічного матеріалознавства, опубліковані впродовж останніх років.

Навчальний посібник є результатом колективної праці викладачів кафедри хімії та інтегрованих технологій, які спеціалізуються у сфері скломатеріалів.

Автори висловлюють щиру подяку рецензентам – професору, доктору технічних наук О. В. Зайчуку та професору, доктору технічних наук І. В. Луцюк за цінні рекомендації, надані під час підготовки видання, а також із вдячністю приймуть зауваження й пропозиції, що сприятимуть подальшому вдосконаленню посібника в процесі його апробації.

ВСТУП

Практикум «Практикум з технології скломатеріалів. Частина 1. Технологічні та механічні властивості» розроблено відповідно до освітніх програм підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю «Хімічні технології та інженерія» та призначено для формування системних знань і практичних навичок у галузі технології неорганічних склоподібних матеріалів. Навчальний посібник орієнтований на поєднання фундаментальних положень матеріалознавства, фізичної хімії скла та інженерних аспектів сучасних технологічних процесів.

Технологія стекол і ситалів є важливою складовою хімічної технології неорганічних матеріалів і належить до базових інженерних дисциплін, що забезпечують підготовку висококваліфікованих фахівців для промисловості та науково-дослідної діяльності. Сучасний розвиток матеріалознавства висуває підвищені вимоги до рівня розуміння взаємозв'язку між хімічним складом, структурою та властивостями склоподібних систем, що зумовлює необхідність поглибленого вивчення технологічних і механічних характеристик стекол як функціональних матеріалів.

У посібнику розглянуто теоретичні та практичні аспекти розділів «Технологічні властивості стекол» і «Механічні властивості стекол». Значну увагу приділено закономірностям формування властивостей стекол у процесі синтезу та термічної обробки, оцінюванню в'язкісно-температурних характеристик, міцності, твердості, крихкості та інших параметрів, що визначають експлуатаційні можливості матеріалу. Матеріал викладено з урахуванням сучасних наукових уявлень про структуру склоподібного стану та механізми руйнування стекол.

Метою практикуму є закріплення теоретичних знань, отриманих під час вивчення профільних дисциплін, і набуття здобувачами практичних

компетентностей у сфері дослідження властивостей стекол. У результаті опрацювання матеріалу здобувач повинен знати: фізико-хімічні основи склоутворення; технологічні параметри виробництва; закономірності формування механічних властивостей; сучасні методи дослідження та оцінювання характеристик склоподібних матеріалів. Здобувач повинен уміти: аналізувати вплив складу й режимів обробки на властивості стекол; виконувати розрахунки технологічних показників; проводити експериментальні дослідження та обробляти їхні результати; обґрунтовувати вибір матеріалів залежно від умов експлуатації.

Методи визначення властивостей, подані у посібнику, спрямовані на формування навичок роботи з лабораторним обладнанням, опанування методик визначення технологічних і механічних властивостей стекол, а також розвиток інженерного мислення та здатності до самостійного аналізу експериментальних даних. Для самоконтролю рівня засвоєння матеріалу після кожного розділу наведено контрольні питання та тестові завдання для поточного контролю, що сприяють систематизації знань і підготовці до поточного та підсумкового оцінювання.

Запропонований практикум може бути використаний під час аудиторної та самостійної роботи здобувачів, а також як допоміжний навчально-методичний матеріал під час виконання лабораторних і дослідницьких завдань у галузі хімічної технології скла та ситалів.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТЕКОЛ

1.1 Температура початку розм'якшення скла

Початок розм'якшення скла характеризується температурою, за якої величина в'язкості набуває значення приблизно $10^{11.5}$ Па · с. Для звичайних промислових складів стекол початок розм'якшення настає за температури 400–550 °С. Температуру закінчення розм'якшення скла приймають таку, за якої величина в'язкості дорівнює 2×10^7 Па · с, що відповідає температурі від 700 °С до 750 °С.

У практиці склоробства величина температури початку розм'якшення скла має важливе значення. Цій температурі відповідає стан скла, за якого воно під дією деякого навантаження починає деформуватися. Таким чином, якщо відома температура початку деформації скла, то неважко визначити вищу температуру відпалу скловиробів, яка зазвичай на 10–15° нижче температури початку розм'якшення скла.

На температуру початку розм'якшення дуже впливає хімічний склад скла. Зокрема, зниженню температури початку розм'якшення скла, як і його в'язкості, сприяють такі оксиди: V_2O_5 , BaO , Na_2O , K_2O , Li_2O , Fe_2O_3 , MnO і PbO . Підвищують температуру початку розм'якшення та в'язкість Al_2O_3 , CaO , MgO , SiO_2 , ZrO_2 , TiO_2 .

1.1.1 Визначення температури початку розм'якшення скла

Нижче розглядається найпростіший та поширений метод визначення температури початку розм'якшення скла з точністю до 5°. В основу цього методу покладено визначення температури, за якої скляна нитка, що розтягується під дією постійного навантаження, подовжується на певну

величину. Для цієї мети застосовують прилад, принципову схему якого наведено на рисунку 1.1.

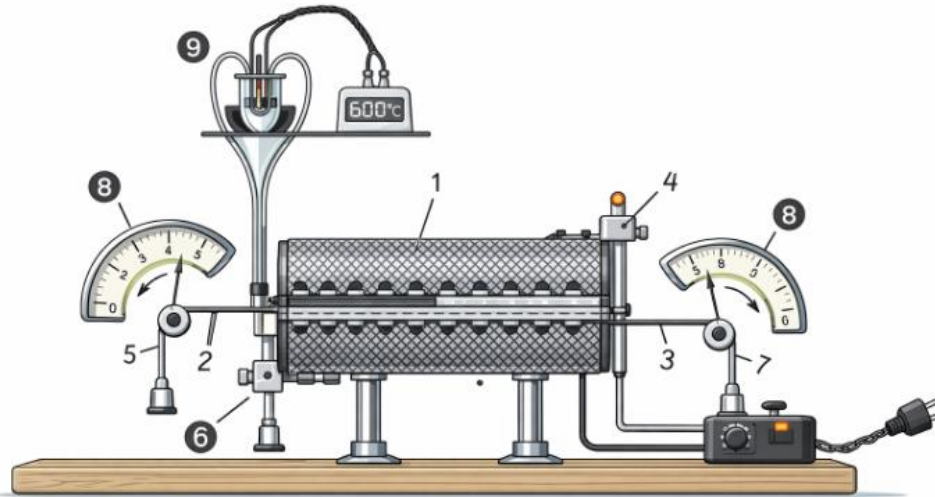


Рисунок 1.1 – Принципова схема установки для визначення температури початку розм'якшення скла

Термін «точка розм'якшення» скла застосовують за аналогією з точкою плавлення чистої кристалічної рідини, однак аморфні або склоподібні речовини, як відомо, не мають точки плавлення, а її виражають у певних температурних межах, тобто розтягнутий інтервал розм'якшення, тому правильніше буде казати не про точку розм'якшення скла, а про початок і кінець його розм'якшення.

Прилад становить горизонтально розташовану трубчасту електропіч 1, в її частині, що обігривається, поміщені дві скляні нитки: верхня 2 і нижня 3, розташовані на відстані 1,5–2 мм одна від іншої. Правий кінець верхньої скляної нитки закріплений у тримачі 4, а до лівого кінця, вигнутого у вигляді гачка, прикріплена бавовняна нитка, перекинута через блок 5, з підвішеним до неї вантажем. Нижня скляна нитка розташована паралельно верхній: лівий кінець її закріплений у тримачі 6, а правий виведений на праву сторону трубчастої печі і так само, як верхня нитка, її

перекинуто через блок 7. До блоків нерухомо прикріплені стрілки-показчики, вільні кінці яких пов'язані з лівою та правою кутовими шкалами 8. Таким чином, прилад дозволяє вести одночасно два паралельні визначення.

Температуру в електропечі вимірюють хромалюменієвою термопарою. Плавне регулювання температури здійснюють автотрансформатором ЛАТР-1 або реостатом. Довжина трубчастої електропечі складає 300–350 мм, а внутрішній діаметр труби – 25–30 мм. У середній частині труби має бути зона рівних температур, що має довжину 140–150 мм. Для того щоб визначити довжину цієї зони, одну термопару встановлюють нерухомо в центрі печі, а іншу поступово переміщують праворуч і ліворуч від її центру на 10–20 мм. З отриманих даних будують графік, де віссю абсцис слугує довжина печі, а віссю ординат – температура. За цим графіком визначають довжину зони рівних температур. Для створення цієї зони у внутрішню частину жарової порожнини печі вставляють металеву трубку завдовжки 140–150 мм.

Довжина скляних ниток має бути не менше 400–420 мм, діаметр 0,6–0,7 мм. Для кожного визначення витягують дві нитки. Кінці ниток з одного боку загинають у вигляді гачків, а з іншого оплавляють у формі куль діаметром, дещо більшим, ніж діаметр самої нитки (до 1 мм). Як вантажі використовують 20-грамові гирі технічних ваг. Оголений корольок термопари, якщо це можливо, поміщають між скляними нитками, торкатися яких він не повинен.

Для спостереження за подовженням скляних ниток за кутовими шкалами приладу встановлюють два мікроскопи Брінелля з ціною розподілу шкали окуляра в 0,1 мм. Відлік ведуть одночасно по гальванометру, кутовим шкалам та секундоміру.

На початку досліду стрілки шкал приладу встановлюють у нульове положення. Потім включають електропіч і регулюють температуру

автотрансформатором з таким розрахунком, щоб швидкість нагрівання скляних ниток не перевищувала 5–6 град/хв. За положенням лівої та правої стрілок приладу стежать за допомогою мікроскопів Брінелля. У момент початку руху стрілок за шкалою відзначають температуру, що показується гальванометром, і одночасно включають секундомір. Потім час і температуру фіксують у той момент, коли показання шкали збільшиться на 10 поділів. Дослід вважається закінченим, коли кожна з ниток почне швидко подовжуватися, а стрілка приладу прискорено переміщатиметься за кутовою шкалою при малих змінах температури в печі.

У таблиці 1.1 як приклад наведено порядок запису результатів одного з дослідів щодо визначення початку розм'якшення скла.

Таблиця 1.1 – Порядок запису результатів досліду з визначення початку розм'якшення скла

Температура скляної нитки, °C	Тривалість підйому температури		Показник кутової шкали приладу, градуси шкали
	хв	с	
536	0	0	0,5
540	0	30	1
550	2	30	3
560	4	30	7
570	5	30	17
589	8	30	30
590	10	30	55

На підставі отриманих даних графічним методом визначають температуру початку розм'якшення скла. Для цього будують графік (рис. 1.2).

Швидкість нагрівання скляної нитки визначають у такий спосіб: з будь-яких точок (А і В) прямої II опускають перпендикуляри на праву ординату температур CD і вісь абсцис, тобто абсцису часу MN. Частку від ділення відрізків CD на MN виражає швидкість нагрівання зразка.

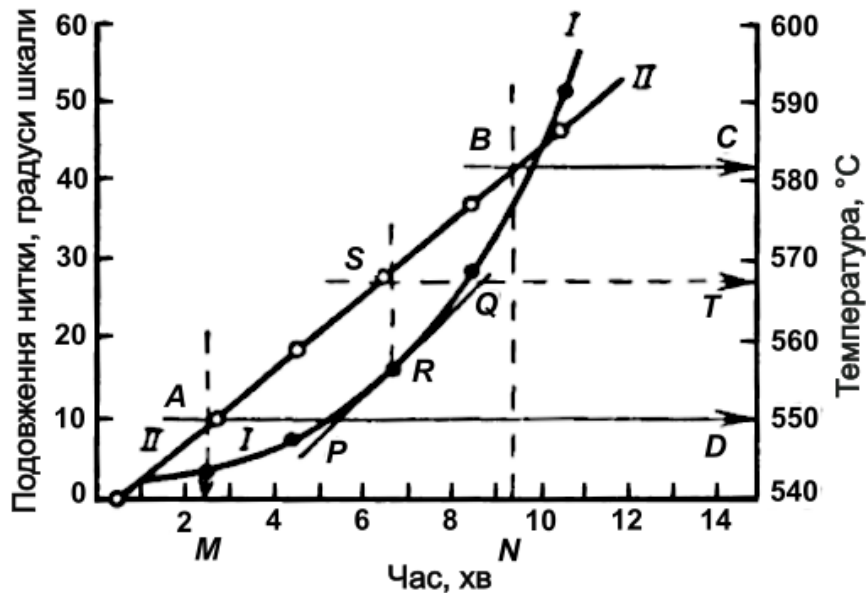


Рисунок 1.2 – Графічне визначення температури початку розм'якшення скла

Температуру початку розм'якшення зразка скла визначають у такий спосіб: спочатку проводять дотичну PQ до кривої I під кутом 45° до осі абсцис. Далі з точки дотику R проводять пряму, паралельну осі ординат, до перетину з прямою II у точці S. Надалі з точки S проводять пряму, паралельну осі абсцис, до перетину з правою ординатою в точці T (відповідає 567°C), яка є необхідною температурою початку розм'якшення скла. Для кожної скляної нитки будують окремий графік. Середнє значення беруть із двох паралельних визначень з відхиленнями, що не перевищують $4\text{--}5^\circ$.

Контрольні запитання

1. Яким значенням в'язкості характеризується початок розм'якшення скла?

2. Яким значенням в'язкості характеризується кінець розм'якшення скла?
3. У якому температурному інтервалі настає початок розм'якшення промислових стекол?
4. У якому температурному інтервалі відбувається закінчення розм'якшення скла?
5. Яке технологічне значення має температура початку розм'якшення у склоробстві?
6. На скільки градусів температура відпалу нижча за температуру початку розм'якшення скла?
7. Чому стан початку розм'якшення пов'язують із початком деформації під навантаженням?
8. Як хімічний склад впливає на температуру початку розм'якшення скла?
9. Які оксиди знижують температуру розм'якшення та в'язкість скла?
10. Які оксиди підвищують температуру розм'якшення та в'язкість скла?
11. Чому для скла недоцільно використовувати термін «точка плавлення»?
12. Який фізичний принцип покладено в основу методу визначення температури початку розм'якшення?
13. Яка будова та основні елементи установки для визначення температури початку розм'якшення скла?
14. Які вимоги ставляться до довжини та діаметра скляних ниток для проведення дослідів?
15. Яка швидкість нагрівання повинна підтримуватися під час експерименту і чому?

16. Яку роль відіграє зона рівних температур у трубчастій електропечі?
17. Як визначають довжину зони рівних температур у печі?
18. Які прилади використовують для вимірювання температури та подовження ниток?
19. За якою ознакою фіксують початок розм'якшення під час експерименту?
20. Як графічним методом визначають температуру початку розм'якшення скла за результатами дослідів?

Тестові завдання

1. Початок розм'якшення скла відповідає в'язкості:
- а) 10^6 Па · с;
 - б) $10^{11.5}$ Па · с;
 - в) 10^2 Па · с;
 - г) 10^1 Па · с.
2. Температура початку розм'якшення звичайних стекол:
- а) 200–300 °С;
 - б) 400–550 °С;
 - в) 800–900 °С;
 - г) 1 000–1 200 °С.
3. Температура закінчення розм'якшення скла становить приблизно:
- а) 300–350 °С;
 - б) 500–600 °С;
 - в) 700–750 °С;
 - г) 900–1 000 °С.

4. Що відбувається зі склом при температурі початку розм'якшення:

- а) воно плавиться;
- б) починає деформуватися під навантаженням;
- в) кристалізується;
- г) розкладається?

5. Який оксид знижує температуру розм'якшення:

- а) SiO_2 ;
- б) Al_2O_3 ;
- в) Na_2O ;
- г) ZrO_2 ?

6. Який оксид підвищує температуру розм'якшення:

- а) PbO ;
- б) Li_2O ;
- в) SiO_2 ;
- г) MnO ?

7. Основний елемент установки для дослідження:

- а) розривна машина;
- б) маятниковий копер;
- в) трубчаста електропіч;
- г) гідравлічний прес.

8. Яка довжина скляних ниток використовується для дослідження:

- а) 50 мм;
- б) 100 мм;
- в) 400–420 мм;
- г) 1 м?

9. Яка швидкість нагрівання допускається під час експерименту:

- а) $20\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$;
- б) $10\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$;
- в) $5\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$;
- г) $1\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$?

10. Температуру початку розм'якшення визначають:

- а) за кольором скла;
- б) за масою зразка;
- в) за графіком залежності температури і подовження;
- г) за щільністю скла;

1.2 В'язкість скла

В'язкість – це фізична властивість рідин та аморфних матеріалів, що характеризує їхній опір деформації під дією зовнішніх сил. У випадку скла, яке перебуває у в'язкотекучому або напівсклоподібному стані при високих температурах, в'язкість визначає швидкість його течії, здатність до формування виробів та стабільність структури під час охолодження.

В'язкість скла безпосередньо впливає на процеси його формування та обробки: відливання, пресування, витягування ниток або листів. Вона визначається як опір переміщенню одного шару скла відносно іншого і залежить від температури, хімічного складу, наявності домішок та ступеня відпалу.

У наукових дослідженнях та практичному виробництві особлива увага приділяється температурній залежності в'язкості, оскільки навіть невеликі зміни температури можуть суттєво змінити текучість скла. Зазвичай для вимірювання в'язкості застосовують методи кручення, витікання та обертання циліндрів, що дозволяє оцінити динамічний коефіцієнт в'язкості та передбачити поведінку скла під час технологічної обробки.

Таким чином, розуміння та контроль в'язкості є ключовим фактором для забезпечення високої якості скляних виробів і ефективності виробничих процесів.

В'язкість кількісно характеризується динамічним коефіцієнтом в'язкості, який позначається літерою η . Величина, зворотна в'язкості, називається плинністю і виражається формулою 1.1:

$$\varphi = \frac{1}{\eta}. \quad (1.1)$$

З погляду молекулярно-кінетичної теорії виникнення в'язкості пов'язане як з рухом самих молекул, так і з наявністю молекулярної взаємодії між ними, а також залежить від форми та розмірів молекул. Міжмолекулярні сили взаємодії особливо великі у в'язких рідинах. Основний закон в'язкого перебігу рідин, встановлений Ньютоном у 1687 р., виражається рівнянням 1.2:

$$f = \eta S \frac{v_2 - v_1}{x_2 - x_1}, \quad (1.2)$$

де v_1 та v_2 – швидкість двох змішаних шарів, відстань між якими дорівнює $x_2 - x_1$;

S – контактна площа взаємодії вказаних шарів рідини;

η – коефіцієнт внутрішнього тертя або в'язкість.

Таким чином, в'язкість чисельно дорівнює тангенціальній силі, необхідній для підтримки різниці швидкостей, що дорівнює одиниці, між двома паралельними дотичними шарами рідини, відстань між якими також дорівнює одиниці. У метричній системі в'язкість вимірюється в $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Часто поряд із динамічним коефіцієнтом в'язкості застосовують так званий кінематичний коефіцієнт в'язкості ν (см²/с), який одержують як відношення динамічного коефіцієнта в'язкості рідини до щільності цієї ж рідини за відповідних температурних умов за формулою 1.3:

$$\nu = \frac{\eta}{d}. \quad (1.3)$$

Для високов'язких асоційованих рідин, таких як скло маса та розплавлені шлаки, у практиці застосовують формулу Ле Шательє, яка була уточнена П. П. Лазаревим (1.4):

$$\lg \lg \frac{\eta}{\eta_3} = A - Bt, \quad (1.4)$$

де A та B – постійні;

t – температура, °С

Висока в'язкість звичайних промислових стекол протидіє їхній кристалізації, обумовлюючи певною мірою збереження їхнього склоподібного стану. Багатообразні процеси, що протікають при варінні, виробленні та обробці скла, нерозривно пов'язані з однією з найголовніших його фізичних властивостей – в'язкістю.

Величина в'язкості дуже впливає на процеси склоутворення, освітлення та гомогенізації скло маси при варінні скла. Залежно від в'язкості скло маси встановлюють необхідні способи та режими її вироблення. Отже, при виробленні виробів зі скла ручним способом в'язкість скло маси знаходиться у межах $(1-3) \cdot 10^2$ Па · с. При моліруванні скла в'язкість його досягає 10^8 Па · с, а при відпалі – $5 \times 10^{11} - 5 \times 10^{12}$ Па · с.

Температура, за якої в'язкість скла досягає 10^{12} Па · с відповідає переходу скла з в'язкого стану у крихкий і позначається T_g . Якісно такий стан скла характеризується тим, що після натискання твердим тілом на поверхню скляної пластинки на ній виникають тріщини.

Для звичайних складів промислового скла температура T_g коливається в межах $400\text{--}600^\circ\text{C}$. Температура, за якої в'язкість скла досягає 10^9 Па · с, позначається T_f ; для звичайних промислових стекол вона знаходиться приблизно на рівні $680\text{--}700^\circ\text{C}$. За температури вище T_f у склі починають проявлятися властивості, типові для рідкого стану. Інтервал температур між T_g та T_f , так званий «інтервал розм'якшення», є характерним для силікатних стекол перехідної області, всередині якої стекла існують у високов'язкому пластичному стані.

В'язкість скла залежить також від його хімічного складу. До оксидів, що підвищують в'язкість скла, належать SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , проте останній, введений в малій кількості, знижує в'язкість скла за високої температури.

Оксид магнію в більшості випадків підвищує в'язкість скла, але меншою мірою, ніж оксид алюмінію.

При заміні кремнезему на Li_2O , Na_2O , K_2O , BaO та PbO в'язкість скломаси як при високих, так і при низьких температурах зменшується. Оксид цинку в більшості випадків також знижує в'язкість скла.

Збільшення вмісту у склі оксиду алюмінію веде до підвищення його в'язкості, особливо значно в області низьких температур. Після заміни SiO_2 на Al_2O_3 в'язкість скла також зростає.

Борний ангідрид у кількості до 15 % значно знижує в'язкість за високих температур, а за знижених, навпаки, підвищує її, і тільки при вмісті його вище 15 % в'язкість скла знову знижується.

Оксид кальцію помітно підвищує в'язкість скла за знижених температур, а за високих температур (введення до 10 %), навпаки, знижує

в'язкість; при більш значному вмісті СаО в'язкість скла за тих же температурних умов суттєво зростає. Після заміни у склі оксиду кальцію на оксид магнію в'язкість зазвичай підвищується.

Основною технологічною характеристикою промислових стекол, яка визначає процеси варіння й вироблення і, відповідно, вихід придатної продукції, є температурний хід їхньої в'язкості, або технологічна шкала в'язкості.

Окремим етапам технологічної обробки стекол відповідають так звані характеристичні точки й температурні інтервали, які визначають типову поведінку скла і його розплаву на різних стадіях технологічного процесу та прийняті як міжнародні (табл. 1.2).

До них, зокрема, належать:

– $T_{\text{варіння}}$ – технологічна температура варіння скла (ТТВС). Чисельно цей параметр дорівнює температурі, при якій в'язкість скла конкретного складу дорівнює $10 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Вище цієї температури оптимальне видалення бульбашок з розплаву і його гомогенізація важкодоступні.

Максимальна температура (T_{max}) в промисловій скловарній печі зазвичай підтримується трохи вище, ніж ТТВС. Чим вище різниця між цими параметрами, тим швидше йде варіння скла і з'являється додаткова можливість для збільшення продуктивності скловарної печі й, відповідно, більш ефективної експлуатації сучасного високопродуктивного склоформуючого устаткування.

В умовах реального виробництва потрібно також ураховувати, що підвищення в'язкості призводить до збільшення, а її зниження – до зменшення тривалості процесу корозії вогнетривких матеріалів, що перебувають у контакті зі скломасою. Тому необхідно здійснювати вибір T_{max} з урахуванням як $T_{\text{варіння}}$ (ТТВС) скла, так і вогнетривкої кладки для кожної конкретної печі індивідуально;

– $T_{\text{Літ}}$ – температура Літтона, якій відповідає той ступінь в'язкості ($10^{6,65}$ Па · с), за якого явна деформація скла настає під його власною масою і позначається як температура розм'якшення;

– $T_{\text{краплі}}$ – відповідає значенню в'язкості 10^2 Па · с і характеризує для виробництва тарних стекол температуру формування краплі, для листових – «цибулини» скла;

– $T_{\text{в.в}}$ – верхня температура відпалу (10^{12} Па · с);

– $T_{\text{н.в}}$ – нижня температура відпалу ($10^{13,5}$ Па · с). Ці температури обмежують критичну зону відпалу скла. Нижче $T_{\text{н.в}}$ і вище $T_{\text{в.в}}$ за період реального відрізка часу цієї технологічної операції релаксація залишкових напруг у склі неможлива.

Таблиця 1.2 – Характеристичні точки технологічної шкали в'язкості стекол

Назва технологічного процесу	В'язкість, Па · с	Позначення, символи
1	2	3
Варіння, освітлення і гомогенізація скломаси	10	$T_{\text{варіння}}$
Інтервал формування (ручний та механізований): – початок; – кінець	10^2 10^8	$T_{\text{краплі}}$
Ручне формування дрібних виробів (скломаса придатна для машин з вакуумним живленням)	10^2	–
Ручне формування скла (при цій в'язкості скло має консистенцію тіста)	$10^{2,5}$	–
Формування виробів на машинах з крапельним живленням	10^3	–
Обробка скла на пальниках	10^4	–
Скло набуває форми та зберігає її впродовж короткого часу	10^5	–
Скло можна ще пресувати, але воно дуже тверде	10^6	–

Продовження таблиці 1.2

1	2	3
Температура Літлтона	$10^{6,65}$	$T_{Лит}$
В'язкість, при якій лист скла можна ще гнути	10^7	–
Спікання скла	10^7-10^{11}	–
Температура початку розм'якшення	10^8	T_f
Дилатометрична температура початку деформації	10^{10}	T_d
Початок формування скла під впливом власної ваги	10^{10}	–
Температура склування	$10^{12,3}$	T_g
Інтервал склування	10^8-10^{12}	–
Відпал: вища температура відпалу;	10^{12}	$T_{в.в}$
нижча температура відпалу	$10^{13,5}$	$T_{в.н}$
Верхня межа крихкого стану	10^{14}	–
Температура деформації	$10^{14,6}$	–
Значне зменшення зростання в'язкості при подальшому зниженні температури	10^{15}	–
В'язкість при температурі довіклія	10^{19}	–

1.2.1 Визначення в'язкості стекол в області пластичного стану

В'язкість скла в області пластичного стану, тобто приблизно в інтервалі температури розм'якшення ($450-700^\circ \text{C}$), зазвичай визначають за методом розтягування скляної нитки або скляного стрижня.

В'язкість промислового скла у зазначеному інтервалі температур знаходиться в межах $4,5 \times 10^6-10^{15} \text{ Па} \cdot \text{с}$. На віскозиметрі, який застосовується за цього методу, можна визначити в'язкість від $10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}$ до $10^{11,5} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

З практики відомо, що подовження зразка скла під час нагрівання пропорційне його плинності або зворотно-пропорційне до в'язкості. На рисунку 1.3 наведено графік, що характеризує залежність подовження скляного зразка (стрижня) від тривалості дослідження. З графіка видно, що за низьких температур спостерігається пружне подовження зразка (ділянка

ОА). Ділянка АВ характеризує уповільнено-пружне подовження зразка, а ділянка ВС – рівномірне подовження зразка, що перебуває у стані пластично в'язкої течії. Прямолінійна ділянка ВС власне і приймається до уваги, коли визначають в'язкість скла при заданій постійній температурі.

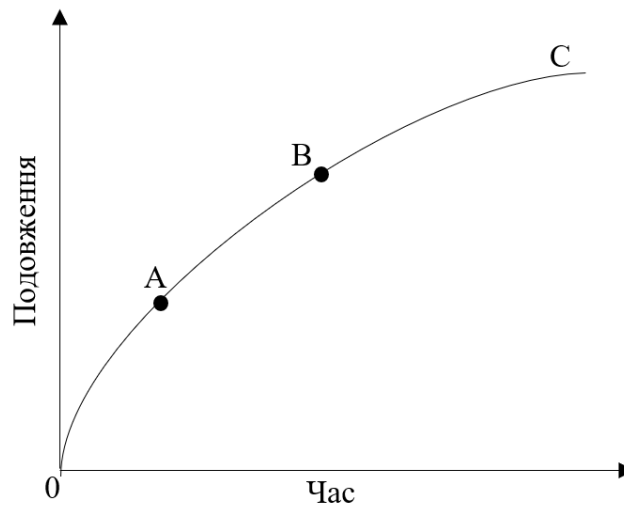


Рисунок 1.3 – Залежність подовження скляного зразка від тривалості дослідження

Прилад визначення в'язкості скла в інтервалі пластично-в'язкого стану зображений на рисунку 1.4.

Основну частину приладу складає трубчаста електропіч опору (1) з ніхромовою обмоткою та автоматичним регулюванням температури. Електропіч встановлена у вертикальному положенні та закріплена на двотавровій балці (2), загорнутій одним кінцем у капітальну стіну. Вогнетривка циліндрична трубка (3) виготовлена з шамотної або порцелянової маси; на зовнішню поверхню трубки намотаний ніхромовий дріт певного перерізу. У внутрішню порожнину жарової трубки вмонтовано металевий циліндр (4) (з бронзи або латуні). Цей циліндр призначений для вирівнювання температури в середній ділянці жарової трубки завдовжки 90–100 мм. Довжина зони постійних температур повинна бути дещо більшою, ніж довжина скляного стрижня, що

випробовується. Для зменшення втрати тепла та пов'язаного з цим зменшення охолодження металеві трубки зверху та знизу впритул до її торців вставлені теплоізоляційні кільцеподібні пробки (5), виготовлені з піношамоту.

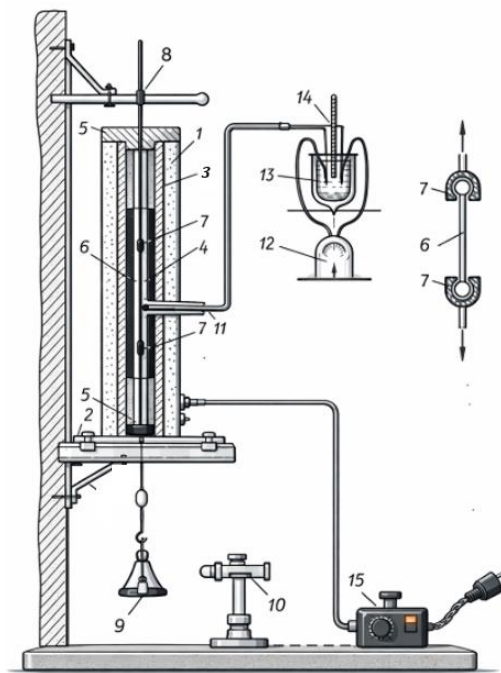


Рисунок 1.4 – Прилад для визначення в'язкості при низьких температурах

Скляний зразок (6) встановлюють в металеві муфти (7) через бічні пази, при цьому його головки повинні розташовуватися в лунках патронів, не викликаючи перекосів. Верхній кінець дротяного тримача пропущений крізь тонкий отвір, просвердлений у трубі, і закріплений гвинтом (8). До нижнього вільного кінця дротяного тримача підвішена чашка з вантажем (9).

Для визначення подовження скляного стрижня при його випробуванні зазвичай використовують відліковий мікроскоп Брінелля (10) з ціною розподілу 0,1 мм і шкалу, що нерухомо встановлена на нижній гілці дроту. Температуру в печі вимірюють на рівні середньої частини зразка хромель-алюміневою термопарою (11), приєднаної до стрілочного

гальванометра (12). Холодні спаї термопари занурюють в посудину Дюара (13). Температуру води у посудині вимірюють ртутним термометром (14), а тривалість досліду секундоміром. Температуру в печі на необхідному рівні підтримують автотрансформатором (15) (типу ЛАТР-1).

Для отримання правильних результатів зразок у печі розташовують у зоні постійних температур у строго вертикальному положенні. Піч нагрівають зі швидкістю 3–3,5 град/хв.

Для випробування потрібен скляний стрижень діаметром 1,2–1,5 мм, довжиною 75–80 мм з кулястими потовщеннями на кінцях (їх оплавляють у полум'ї газового пальника). Відхилення у діаметрі стрижня за його довжиною не повинно перевищувати $\pm 0,02$ мм. Через можливість утворення різної товщини зразок вимірюють через кожні 2 см і знаходять середнє значення діаметра.

Зразок поміщають у жарову порожнину печі тільки після того, як буде досягнуто необхідної температури. Після встановлення зразка у печі температура в ній дещо знижується і її вирівнюють протягом 2–3 хв. Потім на чашку поміщають відповідний вантаж і за допомогою мікроскопа Брінелля відзначають вихідне положення стрілки приладу. При подовженні зразка (приблизно після проходження одного поділу шкали) включають секундомір. Дослід вважають закінченим.

При дуже великих значеннях в'язкості скла потрібно перевірити, чи досягнуто стан рівноваги в'язкості у випробуваному зразку. Для цього записують тривалість проходження кожного поділу шкали. Якщо на проходження кожного поділу шкали витрачається однаковий час, то рівновагу досягнуто. Якщо цього немає, то зразок витримують в печі при заданій температурі приблизно на 5–10 хв більше.

Після першого визначення в'язкості зразок скла витягають з печі, а піч охолоджують на 25–30°; потім дослід повторюють вже за наступної,

нижчої температури і т. д.

Розрахунок в'язкості проводиться за формулою 1.5:

$$\mu = \frac{mgl}{3\pi r^2 \Delta l}, \quad (1.5)$$

де m – маса підвішеного до скляного зразка вантажу, кг;

r і l – радіус і довжина зразка, м;

Δl – подовження зразка, м, за час дослід, с;

g – прискорення сили тяжіння, м/с²;

μ – в'язкість, Па · с.

Вимірювання починають після досягнення зразком постійної температури печі. Для кожної точки температури потрібен окремий зразок скла. Варто враховувати, що чим більша в'язкість скла, тим триваліша витримка зразка за заданої температури дослід (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Дані про величини вантажу та тривалість витримки зразка під час визначення в'язкості скла в області їхнього пластичного стану

В'язкість скла, Па · с	Величина вантажу, г	Тривалість витримки зразка, хв
10^6 – 10^7	3–5	0,1–2
10^7 – 10^8	5–20	2–5
10^8 – 10^9	20–500	5–20
10^9 – 10^{11}	500–1 000	20–60
10^{11} – 10^{12}	1 000	60–120

При підвищеній температурі необхідно застосовувати мінімальний вантаж (3–5 г), для нижчих температур величина вантажу має бути збільшена (до 1 000 г).

1.2.2 Метод розрахунку в'язкості стекл

Розрахунок в'язкості скла дозволяє прогнозувати його поведінку під час термічної обробки та формування виробів, не вдаючись до дорогих та тривалих експериментальних вимірювань. В'язкість скла залежить від його хімічного складу, температури, ступеня відпалу та наявності домішок.

Методи розрахунку базуються на кореляційних та емпіричних залежностях між хімічним складом і в'язкісними характеристиками. Зазвичай застосовують емпіричні формули та моделі, які враховують внесок основних оксидів у склі (SiO_2 , B_2O_3 , Na_2O , CaO , Al_2O_3 та ін.) у загальний опір матеріалу деформації. Крім того, враховується температурний коефіцієнт, що описує зміну в'язкості зі зміною температури скла.

Розрахункові методи дозволяють оцінити робочу температуру скла, його текучість, оптимальні умови витягування та пресування виробів, а також прогнозувати процеси кристалізації та структурного старіння. Таким чином, методи розрахунку є важливим інструментом у проектуванні скла високої якості та під час оптимізації технологічних режимів його обробки.

Для розрахунку в'язкості залежно від їхнього хімічного складу в заданому інтервалі температур найчастіше використовують рівняння Вогеля – Фалчера – Таммана (ВФТ) за формулою 1.6:

$$\log_{10} \eta = A + \frac{B}{T - T_0}, \quad (1.6)$$

де η – в'язкість виражена в $\text{Па} \cdot \text{с}$;

T і T_0 – температури в $^\circ\text{C}$;

A , B – емпіричні коефіцієнти, що відповідають такій системі.

Хоча застосування такого рівняння обмежене інтервалами вмісту кожного з компонентів скла, проте при використанні правильних

інтервалів дає можливість отримати величини в'язкості з незначним відхиленням від експериментальних даних. У таблиці 1.4 подані коефіцієнти рівняння ВФТ для натрій-кальцій-силікатного скла.

Для побудови залежності в'язкості від температури спочатку розраховують декілька початкових величин, на основі коефіцієнтів, наведених у таблиці 1.3. Для розрахунку температур $T_{0,5}$, $T_{5,6}$ і T_{11} , які відповідають логарифму в'язкості 0,5, 5,6 та 11, використовують таке рівняння 1.7:

$$T_i = k_{SiO_2} + \sum P_i \cdot k_i, \quad (1.7)$$

де k_{SiO_2} – базовий коефіцієнт SiO_2 для заданої в'язкості;

$\sum P_i \cdot k_i$ – сума добутків масового вмісту оксиду на відповідний коефіцієнт при заданій в'язкості.

Таблиця 1.4 – Коефіцієнти рівняння ВФТ для тарного скла

Оксид	Вміст оксидів у мас. %		Коефіцієнти рівняння ВФТ для різних значень в'язкості (Па · с)		
	від	до	0,5	5,6	11
SiO ₂	59,54	81,11	1807,23	882,15	610,16
Al ₂ O ₃	0	8,25	5,46	4,13	4,03
MgO	0	6,72	-9,91	-1,94	-1,67
CaO	6,47	13,33	-16,52	0	3,70
Li ₂ O	0	1,07	-64,65	-53,35	-43,02
Na ₂ O	9,98	15,33	-23,21	-11,29	-6,42
K ₂ O	0,01	8,74	-12,96	-6,51	-4,73
Fe ₂ O ₃	0	1,50	-13,64	-2,37	0
Cr ₂ O ₃	0	0,40	0	0	9,09
Co ₃ O ₄	0	0,20	0	0	0
TiO ₂	0	1,09	-19,37	0	3,43

Контрольні запитання

1. Що характеризує в'язкість рідини з фізичного погляду?
2. Що таке динамічний коефіцієнт в'язкості та яким символом він позначається?
3. Якою формулою визначається плинність і який її фізичний зміст?
4. У чому полягає молекулярно-кінетична природа в'язкості?
5. Якими факторами (форма, розмір молекул, міжмолекулярна взаємодія) пояснюється висока в'язкість скломаси?
6. Яким рівнянням описується закон в'язкого перебігу рідин (закон Ньютона) і який фізичний зміст його параметрів?
7. У яких одиницях вимірюється динамічна в'язкість у системі SI?
8. Що таке кінематичний коефіцієнт в'язкості та як його визначають?
9. Яке рівняння застосовують для опису температурної залежності в'язкості високов'язких рідин (формула Ле Шательє – Лазарева)?
10. Який фізичний зміст мають характеристичні температури T_g та T_f ?
11. Який температурний інтервал називають інтервалом розм'якшення скла?
12. Які значення в'язкості відповідають процесам варіння, формування краплі, температурі Літлтона та відпалу?
13. Як в'язкість впливає на процеси варіння, освітлення та гомогенізації скломаси?
14. Який вплив має в'язкість на корозію вогнетривких матеріалів у скловарній печі?

15. Які оксиди підвищують в'язкість скла та як вони впливають на її температурну залежність?

16. Які оксиди знижують в'язкість скла та як зміна їхнього вмісту впливає на технологічні властивості?

17. Який метод застосовують для визначення в'язкості скла в області пластично-в'язкого стану?

18. Які ділянки кривої подовження зразка (ОА, АВ, ВС) враховують при визначенні в'язкості та що вони характеризують?

19. За якою формулою розраховують в'язкість при методі розтягування скляного стрижня та які параметри вона містить?

20. Яке рівняння використовують для розрахунку температурної залежності в'язкості (рівняння Вогеля – Фалчера – Таммана) та які його емпіричні коефіцієнти?

Тестові завдання

1. В'язкість – це:

- а) здатність до кристалізації;
- б) опір переміщенню шарів рідини;
- в) теплопровідність;
- г) електропровідність.

2. Плинність рідини визначається як:

- а) η^2 ;
- б) $1/\eta$;
- в) $\eta \cdot d$;
- г) $\lg \eta$.

3. Одиниця вимірювання динамічної в'язкості:

- а) Н/м;

б) Дж;

в) Па·с;

г) кг.

4. Температура T_g відповідає в'язкості:

а) 10^6 Па · с;

б) 10^9 Па · с;

в) 10^{12} Па · с;

г) 10^2 Па · с.

5. Температура T_f для промислових стекол приблизно становить:

а) 300 °С;

б) 500 °С;

в) 680–700 °С;

г) 1 200 °С.

6. Який оксид підвищує в'язкість скла:

а) Na_2O ;

б) K_2O ;

в) Al_2O_3 ;

г) PbO ?

7. Метод визначення в'язкості в пластичному стані базується на:

а) стисканні зразка;

б) розтягуванні скляного стрижня;

в) ударному навантаженні;

г) шліфуванні.

8. Формула розрахунку в'язкості при розтягуванні включає:

а) лише температуру;

- б) лише густину;
- в) масу вантажу, подовження та геометрію зразка;
- г) тільки швидкість нагріву.

9. Температура Літлтона відповідає в'язкості:

- а) 10^2 Па · с;
- б) 10^4 Па · с;
- в) $10^{6,65}$ Па · с;
- г) 10^{12} Па · с.

10. Для опису залежності в'язкості від температури застосовують рівняння:

- а) Арреніуса;
- б) Бернуллі;
- в) Вогеля – Фалчера – Таммана;
- г) Менделєєва.

1.3 Поверхневий натяг скла

Відомо, що кожна молекула рідини, що знаходиться в поверхневому шарі, відчуває сильне тяжіння, що направлене всередину рідкої фази, перпендикулярно її поверхні. Такі молекули мають порівняно з іншими молекулами деякий надлишок енергії, який обумовлює поверхневий натяг, що спостерігається у рідин.

Поверхневий натяг, що позначається зазвичай буквою σ , визначається роботою, яку необхідно витратити на утворення одиниці нової поверхні в площині розділу двох фаз при постійній температурі, і вимірюється в Дж/м² або Н/м. У таблиці 1.5 наведено чисельні значення поверхневого натягу скла та деяких інших речовин у рідкому або розплавленому стані.

З наведених даних видно, що скломаса звичайних промислових складів має значний поверхневий натяг, величина якого в 3–4 рази перевищує поверхневий натяг води і наближається до значення цієї властивості для деяких металів у розплавленому стані, таких як свинець, вісмут і сурма.

Сили поверхневого натягу скломаси в окремих випадках суттєво впливають на процес виготовлення скловиробів. Наприклад, при витягуванні листового скла на машинах ВПС під дією сил поверхневого натягу стрічка скла прагне звужити свою ширину.

Таблиця 1.5 – Поверхневий натяг силікатних стекел та інших речовин

Рідина	Температура, °С	Поверхневий натяг, Н/м	Рідина	Температура, °С	Поверхневий натяг, Н/м
Вода	20	0,0728	Залізо (сірий чавун)	1 300	0,880
Сульфат натрію	884	0,196	Мідь	1 200	1,160
Метасилікат натрію	1 130	0,302	Цинк	600	0,770
Метасилікат свинцю	800	0,196	Олово	900	0,510
	1 000	0,200	Свинець	400	0,438
Ртуть у вакуумі	20	0,476	Вісмут	960	0,340
Скломаси промислового складу	1 000–1 400	0,250–0,300	Сурьма	900	0,350

Для збереження сталості ширини та товщини листа скла, як відомо, застосовують цілу низку заходів (витягування стрічки скла за допомогою човника, інтенсивне та рівномірне його охолодження, використання бортоформувальних роликів тощо).

Гостра ріжуча кромка, що утворюється зазвичай у цілого ряду видувних виробів зі скла в процесі їхнього виробництва, усувається, як відомо, шляхом подальшого опалення краю виробів, тобто в результаті теплової обробки. Гострий край виробу оплавляється і в результаті дії сил поверхневого натягу приймає округлу блискучу вогненно-поліровану поверхню. Це особливо чітко проявляється при витягуванні скляних ниток, що мають у поперечному перерізі правильне коло.

Освітлення скломаси в процесі її варіння певною мірою також залежить від величини її поверхневого натягу. Вважають, що освітлення скломаси протікає тим інтенсивніше, чим менше цей натяг. Практикою встановлено, що величина поверхневого натягу скломаси звичайних промислових складів при зміні температури в інтервалі 1 000–1 400° порівняно мало змінюється. На величину значною мірою впливають методи його визначення та відома недосконалість цих методів.

За даними дослідників K_2O , Na_2O , TiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 і V_2O_5 знижують поверхневий натяг скломаси, а MgO , CaO , BaO , ZnO , COO , NiO , FeO_2 , Al_2O_3 підвищують її поверхневий натяг.

На сьогодні використовують низку методів вимірювання поверхневого натягу рідин та розплавів, серед яких варто виділити статичні та динамічні. Статичні методи дозволяють виміряти поверхневий натяг рідин та розплавів за умови практично нерухомих поверхонь, утворених за деякий час до початку вимірювання.

До статичної групи належать такі методи: капілярне підняття рідини; максимального тиску бульбашок; ваги краплі; «лежачої» (нерухомої) краплі; втягування в скломасу порожнистого циліндра; скорочення чи деформації скляної нитки.

До динамічної групи належить метод відриву кільця від поверхні розплаву за допомогою торзійних ваг, а також метод висячої краплі та ін. Динамічні методи дають менш точні результати, проте вони менш тривалі.

До найбільш поширених статичних методів, що застосовуються для визначення поверхневого натягу скломаси, належать: метод, заснований на втягуванні в скломасу порожнистого платинового циліндра, метод вимірювання про вагу крапель, що вільно падають, і метод, заснований на скороченні (деформації) скляної нитки, що застосовується при температурах, що відповідають високов'язкому пластичному стану скломаси.

1.3.1 Визначення поверхневого натягу методом втягування у скломасу полого циліндра

Для визначення поверхневого натягу скломаси методом, заснованим на втягуванні в розплав порожнистого циліндра за заданої температури, використовують прилад, показаний на рисунку 1.5. Він становить підйомну тигельну електропіч (1). Висота жарової порожнини печі дорівнює її діаметру, тобто 10–11 см. Постійність температури у печі підтримують лабораторним автотрансформатором (2) типу ЛАТР-1. Температурний режим контролюють платина-платинородієвою термопарою (3) і гальванометром (4). Прилад забезпечений аналітичними вагами (5). Для попередження нагрівання ваг між ними і піччю встановлений водяний холодильник (6). До чашки (7) лівого плеча коромисла ваг на тонкій платиновій проволочі (8) підвішений відкритий знизу платиновий циліндр (9) висотою 5 см, внутрішнім діаметром 3,5 см та товщиною стінок 0,15 мм. У верхній частині цього циліндра влаштований ряд отворів для проникнення повітря. Циліндр підвішують в електропечі над скломасою, що знаходиться в платиновій чаші (10). До чашки (11) правого плеча коромисла ваг підвішений алюмінієвий циліндр (12), поміщений у скляну посудину (13), заповнену на 80 % вазеліновим маслом. Точне положення коромисла ваг без навантаження і з навантаженням встановлюють за допомогою вимірювального мікроскопа (14). Горизонтальне положення печі регулюють гвинтами (15) і

рівнеміром. Підйомний механізм 16 дозволяє піднімати й опускати піч.

На рисунку 1.5 показано вихідне, або нульове, положення коромисла ваг. При цьому алюмінієвий циліндр частково занурений у вазелінове масло і врівноважує тим порожній платиновий циліндр, розташований у печі над скломасою. Положення коромисла ваг фіксують за допомогою вимірювального мікроскопа, причому верхню його межу встановлюють на перетині хреста ниток окуляра мікроскопа із заздалегідь відомою ціною поділу шкали. Вимірювання виконують з точністю до тисячних часток міліметра.

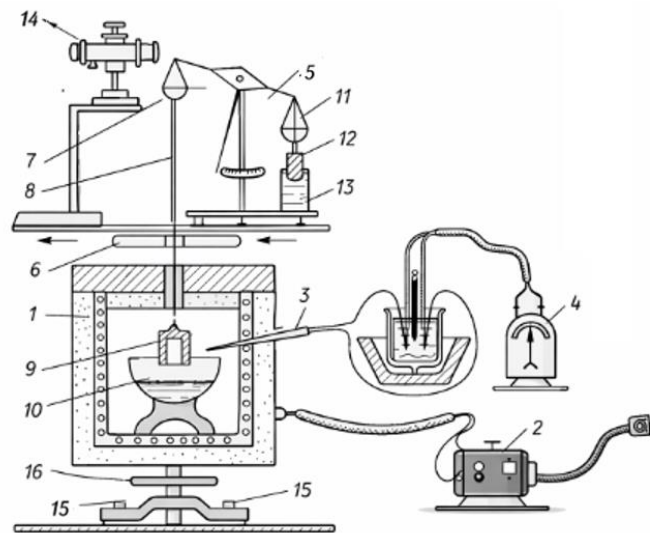


Рисунок 1.5 – Принципова схема приладу для визначення поверхневого натягу скломаси методом втягування платинового циліндра

Після визначення нульової точки вагів на ліву їхню чашку поміщають вантаж вагою 5 г, під дією якого ліве плече коромисла ваг опускається, а праве піднімається, витягаючи з вазелінової олії деяку частину алюмінієвого циліндра. Через деякий проміжок часу чашка терезів приходить у новий стан рівноваги. Потім, обережно опускаючи мікроскоп, знову знаходять вихідну точку нової рівноваги лівого плеча коромисла, встановлюючи її на перехресті ниток окуляра мікроскопа. Знаючи перше і друге положення точки рівноваги, знаходять величину опускання

коромисла, а отже, і величину опускання платиногового циліндра від вантажу вагою 5 г після чого вже виконують дослід.

Для визначення поверхневого натягу скломаси беруть однорідне скло, яке не містить сторонніх включень. Шматочки його поміщають у платинову чашку і розплавляють при відповідній температурі. Платинова чашка має бути заповнена скломасою приблизно на 70 %.

Ваги встановлюють, як це було сказано вище, у нульове положення, а електропіч із платиновою чашкою і скломасою, що знаходиться в ній, розігрітою до температури досліду, плавно піднімають вгору підйомним гвинтовим механізмом доти, поки дзеркало скломаси не доторкнеться до нижньої (відкритої) частини платиногового циліндра, після чого піч закріплюють у нерухомому положенні.

Під впливом поверхневого натягу скломаси платиновий циліндр поступово втягується на деяку глибину. При цьому ліве плече коромисла вагів опускається і його положення фіксується по візирній точці через мікроскоп. Через деякий час платиновий циліндр припинить втягуватися в скломасу і візирна точка займе певне положення.

Сила, під дією якої платиновий циліндр втягується в скломасу, пропорційна величині поверхневого натягу досліджуваної скломаси та довжині кола циліндра. Знаючи нульове та кінцеве положення лівого коромисла вагів, знаходять глибину занурення платиногового циліндра в скломасу.

Поверхневий натяг (Н/м) скломаси визначають за такою формулою:

$$\sigma = \left(\frac{K}{2L} + \frac{d\delta}{2} \right) hg, \quad (1.8)$$

де K – маса, що викликає переміщення платиногового циліндра на 1 см вниз, кг;

d – щільність скла, кг/м³;

δ – товщина стінки платиногового циліндра, см;

g – прискорення сили тяжіння, м\c2;

h – глибина занурення платиногового циліндра у скломасу, см;

L – істина довжина кола циліндра, см;

Величину визначають з даних, отриманих при калібруванні приладу. Припустимо, що вантаж на лівій чашці терезів, що дорівнює 5 г, призводить до опускання лівого коромисла терезів на 0,8142 см, тоді

$$K = \frac{5}{0,8142} = 6,141 .$$

Справжня довжина кола платиногового циліндра дорівнює: $L = C \cdot L_1$ (L_1 довжина кола циліндра, одержувана в результаті безпосереднього виміру, см; C – поправочний коефіцієнт). Справжню довжину кола платиногового порожнистого циліндра (нижньої його частини) визначають за хімічно чистим бензолом і розраховують за рівнянням

$$L = CL_1 = - \frac{Khg}{2\sigma_6 \cos\theta - \delta hgd} , \quad (1.9)$$

де K – маса, що викликає переміщення платиногового циліндра у бензолі, г;

d – щільність бензолу (0,879 г/см³);

h – глибина занурення платиногового циліндра у бензол, см;

δ – товщина стінки платиногового циліндра, см;

σ_6 – поверхневий натяг бензолу (табл. 1.6);

θ – крайовий кут змочування платини бензолом.

Певна невідповідність між істинною величиною довжини кола платиногового циліндра L і безпосередньо виміряною величиною L_1 пояснюється легкою деформованістю тонкої стінки платиногового циліндра (0,015 см).

Оскільки платина добре змочується скломасою, крайовий кут θ можна прийняти рівним нулю і, отже, $\cos \theta = 1$, тому наведене рівняння може бути спрощено:

$$L = \frac{Khg}{2\sigma_{\sigma} - \delta h d g} \quad (1.10)$$

Таблиця 1.6 – Залежність поверхневого натягу хімічно чистого бензолу σ_{σ} від температури

Температура, °C	σ_{σ} , Н/м	Температура, °C	σ_{σ} , Н/м	Температура, °C	σ_{σ} , Н/м
10	0,03	15	0,029	20	0,028
11	0,03	16	0,029	21	0,028
12	0,029	17	0,029	22	0,028
13	0,029	18	0,029	23	0,028
14	0,029	19	0,029	24	0,028

Перш ніж визначати величину поверхневого натягу скломаси, потрібно знайти справжню довжину кола платинового циліндра за бензолом. Для цього визначають величину поверхневого натягу бензолу на тому ж приладі і тим самим методом, як і для поверхневого натягу скломаси. При цьому попереднє калібрування аналітичних ваг приладу виконують при навантаженні на ліву чашку ваг 1 г замість 5 г, прийнятих для скломаси.

У розрахункову формулу вводять заздалегідь відому величину поверхневого натягу бензолу відповідно до температури дослідів з таблиці 1.5.

1.3.2 Визначення поверхневого натягу за вагою вільно падаючих крапель скломаси

Визначення поверхневого натягу за вагою крапель, що вільно падають, засноване на тому, що вага краплі скломаси, що утворюється, еквівалентна вазі краплі утвореного від зразка скла в результаті його розплавлення. Для визначення використовують прилад, поданий на рисунку 1.6.

Основною частиною приладу є піч (1), забезпечена ніхромовою обмоткою. Піч розрахована на максимальну температуру 950 °С. У печі влаштовані два вікна (2), які розташовані горизонтально та закриваються пластинками з термостійкого скла. Електропіч закріплена на підставці (3).

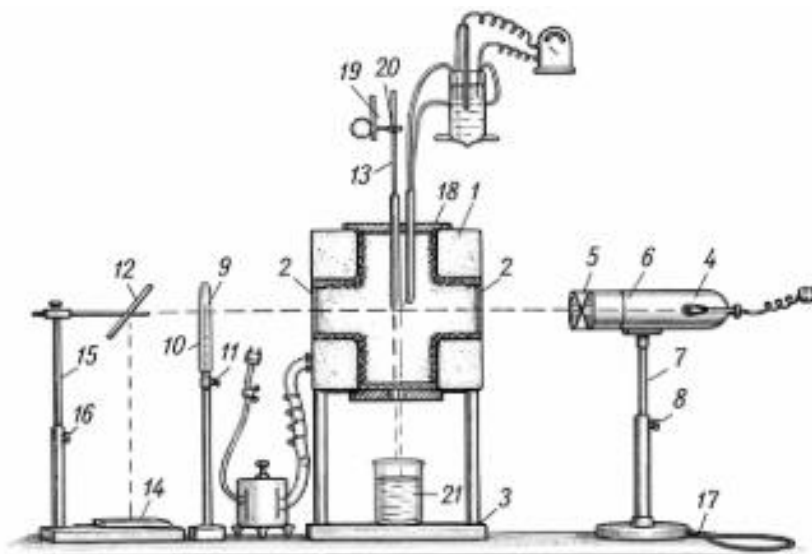


Рисунок 1.6 – Пристрій для визначення поверхневого натягу методом вільно падаючих крапель

Для освітлення зразка слугує освітлювач, що складається з електричної лампочки (4) потужністю не менше 60 Вт, конденсорної лінзи (5), світлорозсіювального матового скла (6) і штатива (7), який можна переміщати по вертикалі для правильної установки освітлювача.

Закріплюють штатив у потрібному положенні затискним гвинтом (8). Тіньове зображення зразка збільшується двоопуклою лінзою (9), розташованою на штативі (10), який має регулювальний гвинт (11). Дзеркало (12), призначене для відображення зображення зразка (13) та проєктування його на екран (14), закріплений у штатив (15) під кутом 45° до горизонтальної лінії. За допомогою регулювального гвинта (16) дзеркало можна переміщати по вертикалі та горизонталі, зберігаючи кут його нахилу. Усі деталі приладу встановлені на столі з двома металевими напрямними (17), що забезпечують співвісність всієї установки.

Для визначення поверхневого натягу скла, глазури або емалі використовують скляні палички або нитки діаметром 1,5–1,7 мм і довжиною 25–30 см, що розміщуються в печі вертикально по її осі. Зразок вводять у пічний простір через центральний отвір у верхній шамотній кришці (18). На кришці печі встановлена кремальєра (19), за допомогою якої зразок можна переміщати у вертикальному напрямку. Зразок закріплюють лапкою (20), що пов'язана з кремальєрою приладу. Нижній отвір печі відчинено. Під піччю встановлено склянку (21) з трансформаторним маслом, куди падають краплі скла. У корпусі печі праворуч або у кришці зверху влаштований канал для термопари, підключеної до гальванометра або потенціометра ПП.

Прилад розташовують у затемненому приміщенні. Стіл приладу встановлюють за рівнемірор і кріплять болтами до металевих кронштейнів, загорнутих у капітальну стіну. Потім на напрямні столу встановлюють піч. Праворуч від печі розміщують освітлювач і гальванометр з приєднаною до нього термопарою, ліворуч – лінзу, дзеркало та екран. Перед вимірюваннями перевіряють готовність приладу до роботи та насамперед співвісність установки. Для цього з бічних трубок печі знімають скляні кришки, а в центрі лінзи та матового скла ставлять кольорові крапки восковим олівцем. Під час увімкнення освітлювача ці точки, спроектовані на екран, повинні збігатися, тобто перебувати на оптичній осі приладу. Якщо вони не збігаються і на екрані проєктуються дві точки, потрібно відрегулювати положення лінзи, освітлювача та

дзеркала відповідними гвинтами.

Потім потрібно отримати чітке зображення зразка на екрані. Для цього освітлювач присувають впритул до віконця печі, послаблюють регулювальний гвинт і, пересуваючи шток патрона лампочки вздовж і навколо оптичної осі, досягають яскравого рівномірного освітлення поля екрану. Потім, закріпивши дзеркало гвинтом і переміщуючи лінзу, одержують чітке зображення контуру зразка. Спай термопари поміщають поряд із зразком, але з таким розрахунком, щоб крапля скломаси, відриваючись від палички, не торкалася термопари.

Перед початком досліду електропіч нагрівають до заданої температури. За допомогою затискного пристрою та кремальєри в центр печі вводять кінець зразка, який у міру розплавлення поступово просувають донизу, зберігаючи вихідне положення нижнього кінця палички. Це положення вибирають з таким розрахунком, щоб процес формування краплі відбувався на кінці палички. Паличку розташовують у фарфоровій трубці внутрішнім діаметром близько 4 мм, яку закріплюють у кришці печі. Нижній кінець скляної палички залишають відкритим на ділянці довжиною 1,5–2 мм, тобто на ділянці, де відбувається процес краплеутворення. Для кожного виду скла одержують дві-три краплі. Краплі скла витягають зі склянки, ретельно протирають і зважують на аналітичних вагах.

Величину поверхневого натягу розраховують в Н/м за формулою (1.11):

$$\sigma = \frac{mg}{\pi D^2} \left(1 + \frac{D_0}{D_{cp}} \right), \quad (1.11)$$

де m – вага краплі, г;

D – діаметр палички, см;

D_{cp} – середній діаметр краплі, см;

g – прискорення сили тяжіння, см/с².

1.3.3 Визначення поверхневого натягу за методом найбільшого тиску у бульбашці

Величину поверхневого натягу розплаву визначають з використанням методу найбільшого тиску у бульбашці, який полягає у тому, що у тигель (3) з розплавом (рис. 1.7), величину поверхневого натягу якого ми визначаємо, занурюється калібрований капіляр (4) радіусом r , виготовлений із хімічно-інертного по відношенню до розплаву матеріалу (в нашому випадку – платиново-родієвий сплав), через який під деяким тиском вдувається повітря.

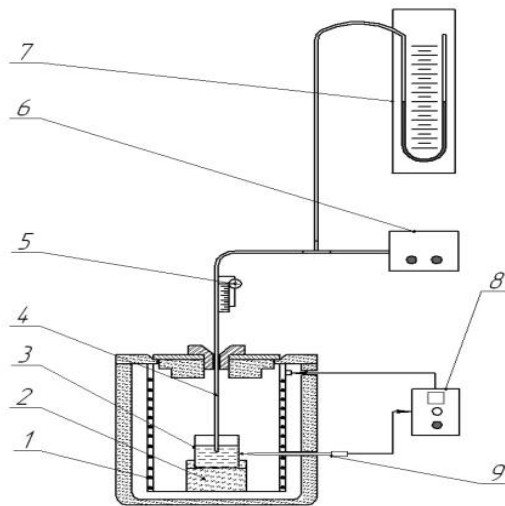


Рисунок 1.7 – Установка визначення поверхневого натягу розплавів:
1 – спіраль електропечі; 2 – підставка; 3 – тигель з розплавом; 4 – капіляр;
5 – мікрометричний пристрій; 6 – мікрокомпресор;
7 – U-подібний манометр; 8 – блок управління; 9 – термопара

Числове значення поверхневого натягу σ може бути визначене за формулою (1.12)

$$\Delta P_m = \frac{2 \cdot \sigma}{r} + g \cdot \rho \cdot h, \quad (1.12)$$

де ΔP_m – тиск в капілярі, що відповідає максимальному діаметру бульбашки; g – прискорення вільного падіння;

ρ – густина розплаву;

h – висота стовпа розплаву над нижнім зрізом капіляра.

1.3.4 Метод розрахунку поверхневого натягу скла

Коефіцієнт поверхневого натягу скломаси при 1 300 °С може бути розрахований з точністю +1,5 % за формулою 1.13:

$$\sigma = \frac{\sum M_i \sigma_i}{\sum M_i}, \quad (1.13)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;

M_i – вміст у склі кожного з оксидів, моль. ч.;

σ_i – усереднені парціальні коефіцієнти поверхневого натягу відповідних оксидів, дин/см (табл. 1.7).

Для орієнтовного визначення поверхневого натягу скломаси за інших температур можна користуватися таким правилом (за А. А. Аппеном): при підвищенні температури на 100° поверхневий натяг скломаси зменшується на 1–2 %. Але це правило справедливе тільки тоді, коли в скломасі відсутні поверхнево-активні компоненти, до яких відносяться: WO_3 , MoO_3 , Cr_2O_3 , As_2O_3 , V_2O_5 , CrO_3 і S_3 .

Таблиця 1.7 – Парціальні коефіцієнти поверхневого натягу окислів, що містяться у склі, при температурі 1 300°С

Оксид	$\underline{\sigma}_i$, Н/м	Оксид	$\underline{\sigma}_i$, Н/м	Оксид	$\underline{\sigma}_i$, Н/м
SiO ₂	0,290	CaO	0,510	MnO	0,390
TiO ₂	0,250	CaF ₂	0,420	FeO, Fe ₂ O ₃	0,490
ZrO ₂	0,350	SrO	0,490	CoO	0,430
SrO ₂	0,350	BaO	0,470	NiO	0,400
Al ₂ O ₃	0,580	ZrO	0,450	LiO ₂	0,450
BeO	0,390	CdO	0,430	Na ₂ O	0,295
MgO	0,520	–	–	–	–

Контрольні запитання

1. Що таке поверхневий натяг рідини та який його фізичний зміст?
2. Яка природа виникнення поверхневого натягу з погляду міжмолекулярної взаємодії?
3. Чому молекули поверхневого шару мають надлишкову енергію?
4. Як визначається поверхневий натяг з термодинамічного погляду?
5. У яких одиницях вимірюється поверхневий натяг у системі SI?
6. Як співвідноситься поверхневий натяг скломаси з поверхневим натягом води?
7. Чому поверхневий натяг скломаси наближається до значень для розплавлених металів?
8. Як поверхневий натяг впливає на процес освітлення скломаси при варінні?
9. Як змінюється поверхневий натяг скломаси в інтервалі температур 1 000–1 400 °С?
10. Які оксиди знижують поверхневий натяг скломаси?
11. Які оксиди підвищують поверхневий натяг скла?
12. Як поверхневий натяг впливає на процес витягування листового скла?
13. Які технологічні заходи застосовують для компенсації дії сил поверхневого натягу при формуванні листового скла?
14. Як сили поверхневого натягу впливають на форму краю видувних скловиробів?
15. Які існують основні групи методів визначення поверхневого натягу розплавів?
16. Чим відрізняються статичні методи визначення поверхневого натягу від динамічних?
17. Які статичні методи найчастіше застосовують для визначення поверхневого натягу скломаси?

18. У чому полягає метод втягування порожнистого платинового циліндра в скломасу?

19. Від яких параметрів залежить сила втягування циліндра в розплав?

20. За якою формулою розраховується поверхневий натяг при методі втягування циліндра?

21. У чому сутність методу визначення поверхневого натягу за вагою вільно падаючих крапель?

22. Які величини необхідно виміряти для розрахунку σ методом крапель?

23. На чому базується метод найбільшого тиску в бульбашці?

24. Які параметри входять у формулу розрахунку поверхневого натягу методом бульбашки?

25. Як розраховується поверхневий натяг скломаси за її хімічним складом та що таке парціальні коефіцієнти поверхневого натягу?

Тестові завдання

1. Поверхневий натяг позначають символом:

а) η ;

б) ν ;

в) σ ;

г) φ .

2. Одиниця поверхневого натягу в СІ:

а) Па · с;

б) кг;

в) Н/м;

г) Вт.

3. Поверхневий натяг скломаси порівняно з водою:

- а) менший;
- б) однаковий;
- в) у 3–4 рази більший;
- г) не залежить від складу.

4. До оксидів, що знижують поверхневий натяг, належить:

- а) MgO ;
- б) Al_2O_3 ;
- в) Na_2O ;
- г) CaO .

5. До оксидів, що підвищують поверхневий натяг, належить:

- а) V_2O_5 ;
- б) K_2O ;
- в) MgO ;
- г) P_2O_5 .

6. До статичних методів визначення поверхневого натягу належить:

- а) відрив кільця;
- б) втягування порожнистого циліндра;
- в) вібродинамічний метод;
- г) ударний метод.

7. Динамічні методи вимірювання поверхневого натягу:

- а) найточніші;
- б) менш точні, але швидші;
- в) не використовуються;
- г) тільки для твердих тіл.

8. Формула визначення поверхневого натягу методом крапель включає:

- а) лише температуру;
- б) лише густину;
- в) масу краплі та геометричні параметри;
- г) тільки час нагрівання.

9. При підвищенні температури на 100 °С поверхневий натяг:

- а) збільшується на 10 %;
- б) зменшується на 1–2 %;
- в) не змінюється;
- г) падає у 10 разів.

10. Поверхневий натяг впливає на:

- а) електропровідність скла;
- б) формування країв та геометрію скловиробів;
- в) магнітні властивості;
- г) радіоактивність.

1.4 Розтікання та кут змочування скла

Здатність скломаси змочувати тверді тіла залежить від співвідношення поверхневого натягу на трьох прикордонних площин розділу: розплав – повітря – $\sigma_{р/п}$; тверде тіло – розплав – $\sigma_{т/р}$; тверде тіло – повітря – $\sigma_{т/п}$.

Ці види поверхневого натягу пов'язані таким співвідношенням:

$$\sigma_{т/п} = \sigma_{р/п} \cdot \cos\theta + \sigma_{т/р}, \quad (1.14)$$

де θ – кут змочування.

Розмір змочування залежить від $\cos \theta$ (рис. 1.8): чим більше значення $\cos \theta$, тим вище змочувальна здатність цієї речовини. Кут змочування, що дорівнює нулю (тобто $\cos \theta = 1$), свідчить про повну змочуваність. Тупий кут свідчить про обмежену змочуваність, і $\cos \theta$ при цьому має негативне значення. Нарешті, коли кут досягає 180° , тобто коли $\cos \theta = -1$, явище змочування повністю відсутнє.

Таким чином, кут змочування визначається ступенем розтікання розплаву по керамічній або іншій пластинці. Найбільш поширений метод визначення кута змочування зводиться фактично до огляду охолодженої разом із керамічною (або металевою) пластинкою краплі скломаси на проєкційному приладі.

Під час вивчення явищ змочування за заданої температури на предметний столик проєкційного приладу встановлюють трубчасту електропіч, в центр якої поміщають зразок циліндричної або конусоподібної форми. Змочуваність поверхонь твердих тіл різної природи значною мірою залежить від фізико-хімічних властивостей самої поверхні, що змочується, і від хімічного складу скломаси.

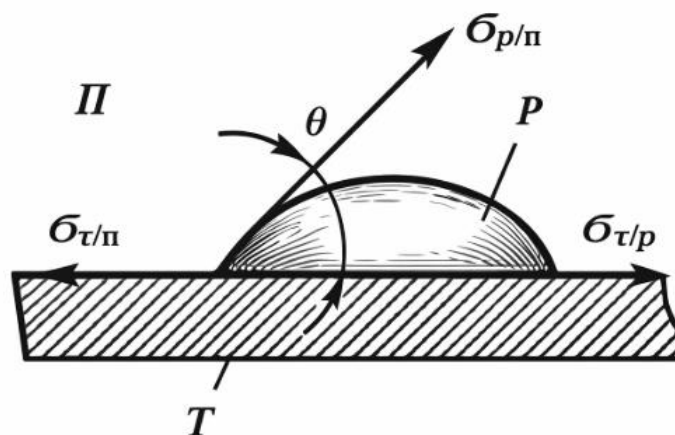


Рисунок 1.8 – Крайовий кут змочування

Для визначення кута змочування з кожного складу звареного скла відбирають найбільш однорідні шматочки у кількості 30–40 г. Невелика

кількість газоподібних включень у склі не впливає на результати визначень. З відібраних шматочків скла готують порошок в агатовій або кварцовій ступці і просівають через сито № 0105. Для кращого формування циліндриків до скляного порошку додають 5–7 % води, в яку вводять невелику кількість декстрину. Штапики циліндричної форми діаметром і висотою 1 см формують на ручному гідравлічному або будь-якому іншому пресі. Відформовані циліндрики злегка підсушують у сушильній шафі, а потім поміщають на підставки (плитки), виготовлені з матеріалу, до якого визначається змочуваність скломасою (кераміка, метал тощо). У лабораторіях скляних заводів як зразки можуть бути використані скляні штапики, нарізані з попередньо витягнутої скляної палички діаметром 1 см, які підшліфовані з торців.

Пластинку зі зразками скла розташовують у муфельній печі в строго горизонтальному положенні і витримують протягом 1 години при заданій температурі. Якщо скло має значну схильність до кристалізації, то час витримки можна скоротити до 30 хв. Після закінчення досліду зразки скла витягають із печі та охолоджують. Крайовий кут змочування вимірюють за допомогою проектного приладу (рис. 1.9).

На предметний столик поміщають краплеподібний зразок разом із пластинкою, а потім включають освітлювач і поєднують деталі приладу з його оптичною віссю, користуючись при цьому відповідними стопорними гвинтами. При цьому чіткість контурного зображення зразка досягається шляхом переміщення предметного столика з таким розрахунком, щоб зразок був розташований у потоці променів діапроектора. За допомогою об'єктива на матовому екрані та шкалі транспортира одержують зображення краплі скла у збільшеному масштабі та перевернутому вигляді (рис. 10).

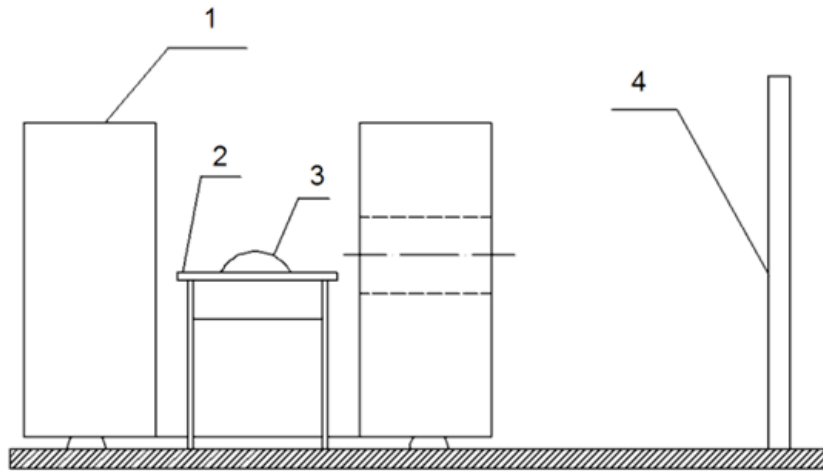


Рисунок 1.9 – Схема пристрою для визначення крайового кута змочування поверхонь рідинами:

1 – діапоектор; 2 – предметний столик; 3 – крапля рідини; 4 – екран

Користуючись регульовальними гвинтами вимірювального екрана, основу краплі скла поєднують з горизонтальною візирною лінією малої шкали, розташовуючи її так, щоб можна було провести дотичну до основи краплі через центр шкал. Потім за ноніусом визначають величину кута змочування.

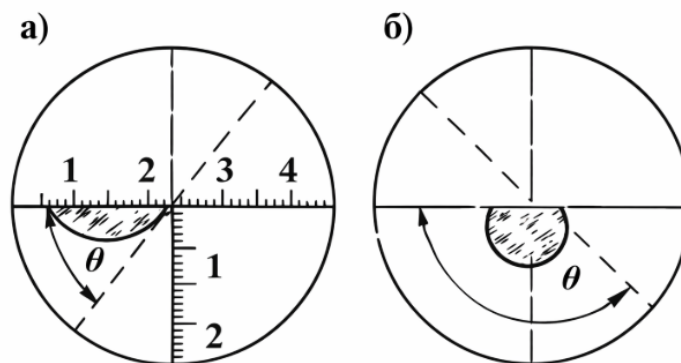


Рисунок 1.10 – Розміщення застиглої краплі скла

а – гострий кут змочування; б – тупий кут змочування

Для вивчення процесу утворення краплі скла при відповідній температурі і заданій витримці на предметний столик встановлюють трубчасту електропіч у горизонтальному положенні, а зразок, що

вивчається, поміщають у центр жарової порожнини печі. У безпосередній близькості від зразка встановлюють термопару, яку підключають до потенціометра або гальванометра. Після встановлення термопари включають електропіч і освітлювач, досягають чіткості зображення зразка на екрані і спостерігають за контурною зміною форми. З підвищенням температури в печі зразок оплавляється, потім за певної температури, характерної для цього скла (глазури або емалі), настає процес краплеутворення, поступове осідання та розтікання краплі по поверхні пластинки. Після початку формування краплі величину кутів змочування відзначають через кожні 20° у двох фронтальних точках. Під час вивчення застиглої краплі скла кут змочування вимірюють у трьох-чотирьох точках по її колу. При динамічній зміні краплі в процесі її нагрівання результати вимірювань оформлюють у вигляді графіка залежності зміни крайового кута змочування від температури. Зазначені вимірювання проводять у затемненій лабораторії або з використанням чорного екрана, встановленого на лабораторному столі. Точність вимірювання крайових кутів не перевищує $+1^\circ$.

Контрольні запитання

1. Від яких складових поверхневого натягу залежить змочувальна здатність скломаси?
2. Яким рівнянням пов'язані поверхневі натяги на межах «тверде тіло – повітря», «розплав – повітря» та «тверде тіло – розплав»?
3. Що таке крайовий кут змочування θ і який його фізичний зміст?
4. Як величина $\cos \theta$ пов'язана зі ступенем змочування поверхні?
5. Що означає кут змочування $\theta = 0^\circ$ ($\cos \theta = 1$)?
6. Що означає кут змочування $\theta = 180^\circ$ ($\cos \theta = -1$)?
7. Про що свідчить гострий і тупий крайові кути змочування?

8. Від чого залежить розтікання скломаси по керамічній або металевій пластинці?
9. Який метод найчастіше застосовують для визначення кута змочування скла?
10. Яке обладнання використовується для визначення крайового кута змочування?
11. Які вимоги ставляться до підготовки зразків скла (маса, подрібнення, просіювання)?
12. Навіщо до скляного порошку додають 5–7 % води з декстрином?
13. Які розміри та форма циліндричних зразків застосовуються у досліді?
14. Чому пластинку із зразками встановлюють у муфельній печі строго горизонтально?
15. Як впливає схильність скла до кристалізації на тривалість витримки?
16. Як здійснюється вимірювання кута змочування застиглої краплі за допомогою проєкційного приладу?
17. У чому полягає методика динамічного спостереження за утворенням краплі під час нагрівання?
18. Як оформлюють результати вимірювання крайового кута змочування при зміні температури?
19. У скількох точках проводять вимірювання кута змочування для застиглої краплі та для динамічного процесу?
20. Яка точність вимірювання крайового кута змочування і які фактори можуть впливати на похибку результатів?

Тестові завдання

1. Кут змочування позначають:

- а) φ ;
- б) θ ;
- в) η ;
- г) ν .

2. Повна змочуваність відповідає значенню:

- а) $\cos\theta = -1$;
- б) $\cos\theta = 1$;
- в) $\cos\theta = 0$;
- г) $\theta = 90^\circ$.

3. Якщо кут змочування тупий, то:

- а) $\cos \theta$ додатний;
- б) $\cos \theta$ від'ємний;
- в) змочування повне;
- г) поверхневий натяг дорівнює нулю.

4. Метод визначення кута змочування базується на:

- а) вимірюванні густини;
- б) спектральному аналізу;
- в) огляді краплі скла на проєкційному приладі;
- г) визначенні електропровідності.

5. Для формування циліндриків до порошку додають:

- а) кислоту;
- б) воду з декстрином;
- в) спирт;
- г) масло.

6. Типова форма зразків скла для досліджу:

- а) кубічна;
- б) циліндрична або конусоподібна;
- в) сферична;
- г) пластинчаста.

7. Пластинку зі зразками витримують у печі приблизно:

- а) 10 хв;
- б) 15 хв;
- в) 1 годину;
- г) 3 години.

8. При динамічному дослідженні кути змочування фіксують:

- а) через кожні 5° ;
- б) через кожні 10° ;
- в) через кожні 20° ;
- г) один раз.

9. З підвищенням температури зразок скла:

- а) кристалізується;
- б) не змінюється;
- в) оплавляється і утворює краплю;
- г) руйнується.

10. Результати зміни кута змочування оформлюють у вигляді:

- а) таблиці густини;
- б) графіка залежності кута від температури;
- в) діаграми складу;
- г) гістограми твердості.

1.5 Кристалізаційна здатність стекол та матеріалів на їхній основі

Скло та матеріали на його основі відрізняються надзвичайно широким спектром властивостей, що дає змогу їхнього використання у різних галузях науки, техніки і промисловості.

Створення нових видів скловиробів з необхідними значеннями показників, що не можуть бути досягнуті в інших класах матеріалів, є складним завданням, яка потребує певних знань про вплив хімічного складу на структуру і властивості стекол у розплавленому і твердому станах та технології їхнього одержання.

Тому проведення дослідження кристалізаційної здатності, як однієї з основних технологічних характеристик скла, є дуже важливим етапом, за результатами якого визначаються «критичний» температурний інтервал, де відбувається кристалізація з певною швидкістю, що є необхідним для встановлення оптимальних режимів варки скла й формування виробів з нього, а також режими термообробки при одержанні емалевих покриттів, полив та ситалів.

Кристалізація – процес, у ході якого зі слабо впорядкованої структури розплаву або скла виникає впорядкована решітка кристалу.

Кристалізація (розклування) при виробленні промислового скла супроводжується зниженням його прозорості, механічної міцності, погіршенням зовнішнього вигляду виробів. Тому процес кристалізації силікатного розплаву в температурній області його виробництва має винятково велике практичне значення для скловаріння. Чим менш виражена здатність скломаси до кристалізації при тривалому її перебуванні у скловарній печі, тим вищі її якісні показники. Разом із тим при правильно організованій (спрямованій) кристалізації можна отримати скловироби з комплексом цінних технічних властивостей.

Здатність речовини у склоподібному стані до переохолодження є неодмінною умовою отримання скловиробів. Для характеристики переохолодженого стану силікатного розплаву першочергове значення мають такі фактори:

- число центрів кристалізації, що утворюються в одиниці об'єму розплаву за одиницю часу (ЧЦК);
- швидкість кристалізації, що становить відношення лінійного росту кристалу до часу (ШРК);
- в'язкість переохолодженого розплаву (рис. 1.11).

Процес кристалізації складається з двох стадій: утворення центрів кристалізації та росту кристалів на цих центрах.

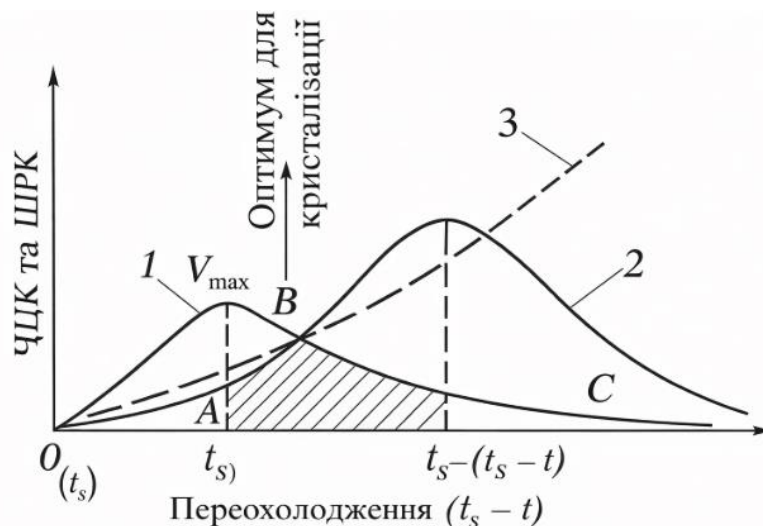


Рисунок 1.11 – Типові криві залежності лінійної швидкості кристалізації (ШРК), швидкості утворення центрів кристалізації (ЧЦК) та в'язкості (η)

від ступеня переохолодження для стекел:

1 – ШРК; 2 – ЧЦК; 3 – в'язкість

Центри кристалізації становлять структурні мікроутворення з упорядкованою будовою, що мають границю розділу фаз з навколишнім

середовищем. Вони можуть зароджуватися гомогенно в результаті локальних флуктуацій складу або структури. У цьому випадку склад кристалів, що виділяються, відповідає складу центрів кристалізації. Гетерогенна кристалізація відбувається на домішкових центрах сторонньої фази. При ній склад кристалів не відповідає складу центрів кристалізації.

Перші ознаки кристалізації з'являються зазвичай по границях розділу фаз і частіше на поверхні, на газових бульбашках, уздовж звивин та інших неоднорідностей, у границь сторонніх включень кристалічного або ліквацийного (не змішувани рідини) характеру. Виникнення кристалів спочатку на поверхні розділу фаз – результат орієнтувальної дії сил на фазовій границі та надмірної поверхневої енергії, що знижує потенціальний бар'єр зародкоутворення.

Характер кристалізації скла або склоутворювального розплаву визначається співвідношенням швидкостей утворення центрів кристалізації (ЧЦК) та росту кристалів (ШРК). При великій швидкості росту кристалів та малій швидкості утворення центрів кристалізації зростають поодинокі кристали та сфероліти. У випадку незначної швидкості росту кристалів та високої швидкості утворення центрів кристалізації вся маса скла пронизана дрібненькими кристаликами.

1.5.1 Залежність швидкості росту кристалів та швидкості утворення центрів кристалізації від температури

Істотне значення в практиці скловаріння мають верхня й нижня температури кристалізації скла. При певній швидкості охолодження розплаву в ньому утворюються центри кристалізації. Температуру, при якій вони виникають, називають верхньою температурою кристалізації. При більш низькій температурі в'язкість скла значно зростає, і кристалічні центри практично не виникають. Температуру, за якої припиняється

утворення центрів кристалізації, називають нижньою температурою кристалізації. Їй відповідають поява й зникнення перших кристалів у скломасі. Якщо температура утворення скломаси збігається або трохи нижча верхньої температури кристалізації, то таку скломасу використовувати для практичних цілей неможливо внаслідок появи продуктів кристалізації (розсклування).

Існують різні види кристалізації:

- поверхнева;
- об'ємна нерівномірна;
- об'ємна дрібнокристалічна рівномірна.

У перших двох випадках у процесі кристалізації зазвичай виділяються крупні кристали, які різко погіршують розтікання склорозплаву і блиск, підвищують крихкість. Тому така кристалізація є дефектом.

Об'ємну дрібнокристалічну кристалізацію (молочні стекла, глушені емалі, поливи, ситали) викликають штучно шляхом підбору хімічного складу, каталізаторів кристалізації та умов термічної обробки. Кількість кристалічної фази у заглушених стеклах, емалях, поливах не перевищує 10–15 %, а у склокристалічних матеріалах (ситалах) може досягати 60–80 %, що суттєво відображається на властивостях останніх. На відміну від звичайних стекол, склокристалічні матеріали мають більш високу температуру розм'якшення, підвищені твердість, міцність на стиск, розтягування.

Оптимальні умови для кристалізації скломаси визначаються температурою, що відповідає найвищій швидкості росту кристалів або утворення центрів кристалізації, тривалістю витримки скломаси при зазначеній температурі, а також складом скла і газовим середовищем.

При зниженні температури після температурного максимуму швидкість кристалізації скломаси швидко зменшується завдяки

гальмівному впливу високої в'язкості (η) і при деякій температурі набуває нульового значення. Тому, якщо скломасу швидко остудити, вона перейде до склоподібного стану і в такому вигляді може існувати тривалий час. Г. Тамман показав, що залежно від характеру взаємного розташування кривої швидкості росту кристалів (ШРК) і кривої швидкості утворення їхніх центрів (ЧЦК) переохолоджений розплав може перейти до склоподібного стану, а також частково або повністю закристалізуватися, причому в процесі кристалізації скла температурний максимум ЧЦК не збігається з температурним максимумом ШРК, який зазвичай спостерігається при більш високих температурах (рис. 1.11).

Безпосередньо нижче температури плавлення t_s або температури ліквідусу знаходиться метастабільна зона, в якій центри кристалізації не утворюються, проте ріст кристалів можливий (якщо введені певні домішки або зародки утворились при нижчій температурі). Чим далі знаходяться один від одного максимуми швидкостей, чим менша швидкість росту кристалів та швидкість утворення центрів кристалізації, тим менше скло схильне до кристалізації.

При утворенні скломаси важливу роль відіграє й тривалість розсклування, тобто час, який необхідний для того, щоб однорідний розплав при зниженні температури почав помітно кристалізуватися.

Для формування виробів зі скломаси потрібний певний час витримки. У межах цього часу температура скломаси повинна залишатися без зміни. Якщо цей проміжок часу збігається з часом розсклування скломаси, то вона не буде придатна для виробітку скловиробів. У зв'язку з цим у виробничих умовах прагнуть до того, щоб за порівняно короткий час скломаси, що перебуває у виробничій частині басейну скловарної печі, повністю оновлювалася, тобто вироблялася.

Виникнення у скломасі центрів кристалізації полегшується внесенням до неї сторонніх домішок, що відіграють роль своєрідних

«зародків». Ці дрібні кристалики, що виникли в розплаві, носять різні найменування: кристалічний зародок, центр кристалізації й т. п. Величина такого елементарного кристалика (зародка) дорівнює приблизно 10 нм.

Головною особливістю ситалів є їхня дрібнокристалічна структура. Розмір кристалів зазвичай не перевищує 1 мкм. Вони сполучені між собою прошарком скла. Така структура надає матеріалу підвищених термомеханічних властивостей. Фазовий склад, тип основної кристалічної фази визначають термічні, електричні, хімічні та механічні властивості ситалів.

1.5.2 Вплив хімічного складу стекол на їхню кристалізаційну здатність

Кристалізація скломаси залежить від таких факторів: хімічного складу та в'язкості скла, виду сировини, що застосовується, взаємної розчинності окремих компонентів, тривалості витримки розплаву при відповідних температурах, наявності активаторів (каталізаторів) кристалізації та умов термічної обробки скла. Найактивніше стекла кристалізуються на границях двох фаз при температурах, що відповідають в'язкості скла 10^3 – 10^4 Па · с.

Для повнішої характеристики кристалізації скла необхідно знати діаграму стану тієї системи, що є основою скла. Встановивши склад скла та користуючись такою діаграмою, можна точно вказати температуру початку кристалізації, природу першої фази, що виділяється, хід зміни складу рівноважної склоутворювальної рідкої фази, всі наступні кристалічні фази та температури кристалізації.

Кварцове скло стійке до кристалізації при температурах нижче за 1 000 °С. Температурний інтервал кристалізації припадає на область 1 000–1 650 °С. У всьому інтервалі виділяється кристобаліт. Максимальна швидкість росту кристалів – при 1 400 °С. Присутність домішок лужних металів сприяє виділенню тридиміту.

Двокомпонентні лужно-силікатні стекла відрізняються більшою схильністю до кристалізації, аніж кварцове скло, оскільки розриви кремнекисневої сітки, що обумовлені лужними катіонами, підвищують рухливість структурних елементів.

Здатність до кристалізації тісно пов'язана з діаграмою стану відповідної системи. Вона зростає по мірі наближення складу скла до стехіометричного складу сполуки та різко знижується при наближенні до евтектики.

Здатність до кристалізації стекол потрійних систем також залежить від наближення до складу евтектики. Мінімум кристалізаційної здатності відповідає такому складу, де як перші фази виділяються з розплаву одночасно два, три або декілька видів кристалічних сполук різного складу (евтектичні точки, границі полів на діаграмах стану), іншими словами, чим нижча температура ліквідусу, тим стабільніше скло.

Підвищена здатність до об'ємної кристалізації спостерігається у склоутворювальних розплавах, склади яких відповідають областям рідкофазного розділення, тобто ліквізації. Однак переважна більшість промислових стекол є багатокомпонентними системами (не менше 4–5 оксидів), для яких немає повних діаграм стану.

На сьогодні вивчені діаграми стану трикомпонентних систем та вплив деяких оксидів, що застосовуються в практиці, на кристалізаційну здатність стекол трикомпонентних систем.

Натрієво-кальцієво-силікатні стекла найменш схильні до кристалізації, якщо в них містяться 74 % SiO_2 та 26 % Na_2O і CaO (близько до евтектики). Встановлено, що заміна SiO_2 на Al_2O_3 до 3 % в натрієво-кальцієво-силікатному склі з 14–16 % Na_2O сприяє зниженню кристалізації. Заміна CaO на MgO до 4 % знижує швидкість росту та температуру появи кристалів.

Різні оксиди, що вводяться до складу скла, неоднаково впливають на його кристалізаційну здатність (табл. 1.8). Часто той самий оксид при

малих концентраціях сприяє збереженню склоподібного стану, а при значних концентраціях призводить до інтенсивної кристалізації стекол. До таких оксидів належать: Al_2O_3 , ZrO_2 , CaO , MgO , BaO , SrO , CdO , ZnO , PbO та інші.

Введення у натрієво-кальцієво-кремнеземисті стекла від 1 % до 2,5 % і навіть до 4 % оксиду алюмінію знижує температуру кристалізації скломаси. Подальше підвищення вмісту Al_2O_3 (до 12,5 %) збільшує схильність його до кристалізації в області 1 000–1 250 °С. Збільшення кількості CaO в стеклах, що містять Al_2O_3 , підсилює їхню схильність до кристалізації.

Одночасне введення V_2O_5 і Al_2O_3 до складу висококремнеземистого скла знижує схильність його до кристалізації. Для зменшення кристалізаційної здатності стекол зі значним вмістом CaO корисно частково його замінити на BaO . У більшості промислових стекол збільшення вмісту лужних оксидів зазвичай зменшує кристалізаційну здатність.

Таблиця 1.8 – Вплив деяких оксидів на кристалізаційну здатність стекол

Оксид	Вплив на кристалізаційну здатність	Характеристика
1	2	3
SiO_2 (кремнезем)	Підвищує	Формує жорстку мережу, сприяє утворенню кристалічних фаз
Al_2O_3 (глинозем)	Підвищує	Стабілізує мережу скла, підвищує температуру кристалізації
V_2O_5 (борний ангідрид)	Підвищує	Прискорює кристалізацію борокремнеземних фаз
MgO , CaO (лужноземельні оксиди)	Підвищує або стабілізує	Сприяють формуванню певних кристалічних фаз (наприклад, шпінель)

Продовження таблиці 1.8

1	2	3
Na ₂ O, K ₂ O (лужні оксиди)	Знижують	Руйнують мережу SiO ₂ , зменшують в'язкість, ускладнюють контрольовану кристалізацію
PbO (свинець)	Знижує	Збільшує аморфність скла, інгібує кристалізацію при низьких температурах
ZnO	Легке підвищення або нейтральна дія	Може стабілізувати деякі фази, залежно від складу

На формування ситалізованої структури впливають хімічний склад вихідного скла та ініціатори об'ємної кристалізації. Механізм дії ініціаторів об'ємної кристалізації здебільшого обумовлено тим, що вони утворюють в об'ємі скла розвинену поверхню розділу фаз, на якій зароджуються кристали внаслідок того, що на поверхні знижується енергетичний бар'єр нуклеації (утворення зародків нової фази).

При примусовій (стимульованій) кристалізації вживають спеціальні заходи до того, щоб викликати в однорідному середовищі утворення багаточисельних зародків майбутніх кристалів. Відомі три шляхи штучного утворення зародків кристалізації:

1) додавання домішкових речовин, що є нуклеаторами (Au, Ag, Pt, Cu; Cr₂O₃, TiO₂, ZrO₂, SnO₂, CeO₂, P₂O₅, MoO₃, WO₃; FeS, MnS, CuS; NaF та інші);

2) опромінювання скла жорсткими променями та частинками, завдяки чому з'являється дефектність структури або виникають фотохімічні реакції, що приводить до утворення кристалічних зародків;

3) використання ліквіаційних явищ, які сприяють рівномірній високодисперсній кристалізації.

На практиці зазвичай визначають температурну область кристалізації, тобто верхню та нижню температури можливої кристалізації

і швидкість росту кристалів при різних температурах, яка здебільшого оцінюється за товщиною поверхневої кристалічної кірки. Температурна область кристалізації, що окреслена в координатах «ШРК – t», слугує практичною мірою кристалізаційної здатності.

Замість визначення ШРК нерідко вдаються до вимірювання об'єму кристалічної фази у відсотках, що утворилася за певний проміжок часу. Цей спосіб застосовується при вивченні розплавів, які швидко кристалізуються.

Контроль кристалізаційної здатності. Кристалізаційну здатність стекол визначають такими методами: методом стабільного падіння температур (градієнтний); методом масової кристалізації; методом вертикально-градієнтної печі; методом загартування.

1.5.3 Визначення кристалізаційної здатності стекол градієнтним методом

Сутність методу полягає у кристалізації в градієнтній печі великої кількості малих зразків досліджуваних стекол, що розміщені у заглибленнях керамічної пластинки-кристалізатора.

Температура печі підтримується автоматично за допомогою термопари та регулюючого потенціометра. Обмотку печі виконують так, щоб зміна температури уздовж печі від найбільшої до найменшої була близькою до рівномірної, що контролюється спеціальною рухомою термопарою або за допомогою декількох (10–12) термопар, що закріплені уздовж кристалізатора.

Одночасно досліджуються стекла 2–4 складів, шматочки яких розташовані паралельними рядками уздовж кристалізатора.

Зразки витримують у печі від 1 год до 24 год.

Принципова схема установки для визначення кристалізаційної здатності скла методом стабільного падіння температур наведена на рисунку 1.12.

Основною частиною установки є трубчаста електрична піч. У середній частині печі підтримують максимальну температуру, а в її торцях температуру знижують до мінімуму. Для цього в обмотці жарової труби печі, що виконано з платиного або іншого жаротривкого дроту, число витків від центру до країв поступово зменшується. При використанні платинового дроту можна досягти максимальної температури: 1 350–1 450 °С.

Жарова труба електропечі має довжину 60–65 см; внутрішній діаметр її не перевищує 3–4 см.

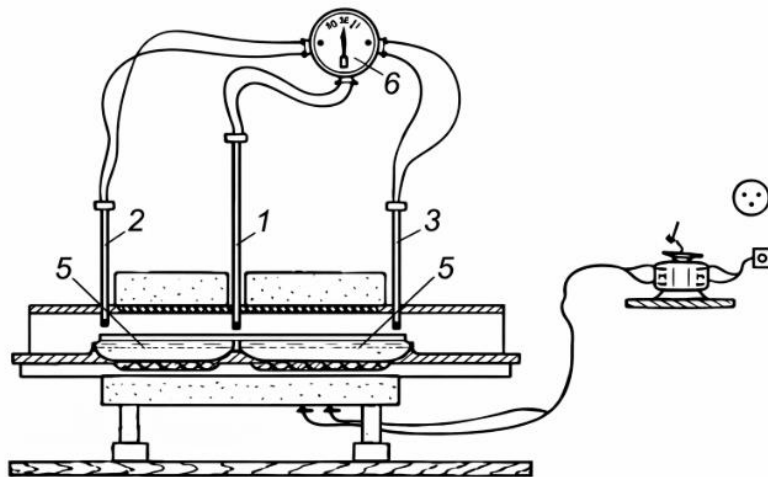


Рисунок 1.12 – Принципова схема установки для визначення кристалізаційних властивостей скла градієнтним методом

Термопари (1), (2) і (3) розташовані по довжині жарової труби, причому в середині її встановлена платина-платинородієва термопара, по краях – хром-алюмелеві. Максимальну температуру в середній частині печі підтримують автотрансформатором (4) типу ЛАТР-І. У жарову порожнину печі вставляють два човники (5) з випробовуваними стеклами.

Перед дослідом перевіряють розподіл температур по довжині печі від її центру до торців. Для цього користуються еталонною платиноплатинородієвою термопарою, гарячий спай якої поміщають у центр печі, а холодні вільні кінці приєднують до гальванометра (б). Після вимірювання температури в середній частині печі термопару поступово пересувають до її торців і вимірюють температуру через кожні 2 см, витримуючи гарячий спай у кожній точці протягом 10 хв.

На підставі отриманих даних будують криву розподілу температур по довжині жарової труби печі (рис. 1.13).

Човники зі стеклами, що кристалізуються, витримують у печі від 1 год до 15 год залежно від схильності стекел до кристалізації. Потім човники швидко витягають із печі й охолоджують на повітрі. За температурним градувальним графіком відмічають розподіл температур по довжині кожного човника. Після цього вивчають результати кристалізації стекел уздовж човників у зонах різних температур.

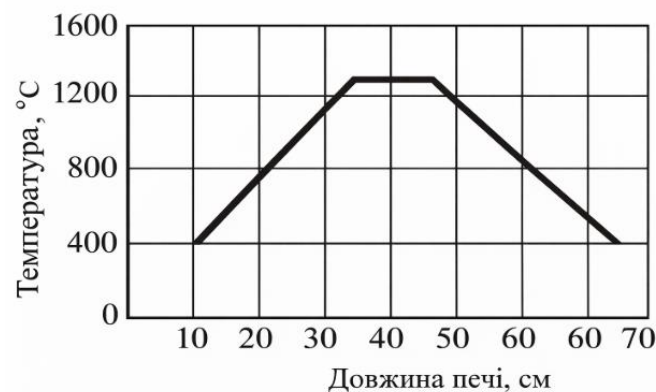


Рисунок 1.13 – Графік розподілу температури в печі

1.5.4 Визначення кристалізаційної здатності стекел за методом масової кристалізації

Метод масової кристалізації дозволяє швидко оцінювати схильність до кристалізації декількох десятків проб різних стекел при заданій температурі.

Шматочки досліджуваних стекол розташовують у керамічні тигельки (1) або в чашки з платинової фольги, що встановлені в керамічний кристалізатор (2), який розміщують в електропечі (3) (рис. 1.14).

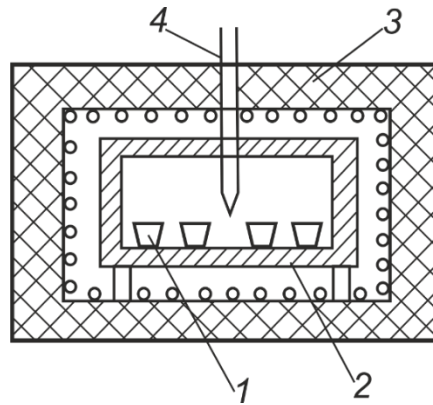


Рисунок 1.14 – Схема установки для визначення кристалізаційної здатності скла методом масової кристалізації

Температуру вимірюють термопарою (4). Зразки витримують при заданій температурі певний час. Досліди повторюють з новими партіями зразків при ступеневому зниженні або підвищенні температури витримки.

1.5.5 Визначення кристалізаційної здатності стекол методом вертикально-градієнтної печі

Метод вертикально-градієнтної печі поєднує переваги методів масової кристалізації та градієнтного. Зразки досліджуваних стекол (1) розміщують на етажерку з керамічних кристалізаторів (2), що встановлені у вертикальну градієнтну піч (3). Температуру на кожному кристалізаторі вимірюють відповідними термопарами (4), які поєднуються з потенціометром через перемикач (рис. 1.15). Температура печі регулюється автоматичним потенціометром за термопарою (5).

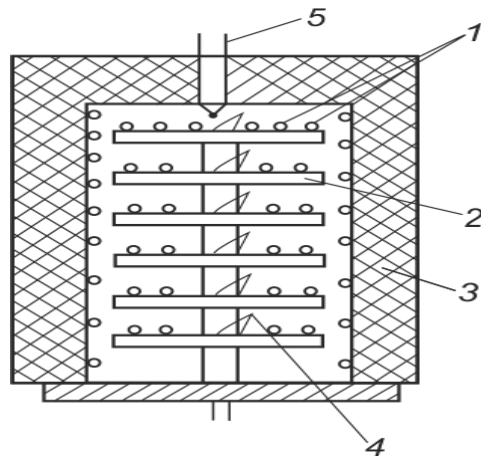


Рисунок 1.15 – Схема визначення кристалізаційної здатності скла методом вертикально-градієнтної печі

1.5.6 Визначення кристалізаційної здатності стекол методом загартування

Основою методу загартування, так само, як і інших методів кристалізації скла, є припущення, що в процесі інтенсивного охолодження в склі зберігається стан, набутий ним при заданій температурі витримки, тобто помітної додаткової кристалізації скла не відбувається.

Цей метод ґрунтується на швидкому охолодженні маленьких зразків скла після витримки в печі при заданій температурі. Зразки після загартування досліджують на вміст кристалів.

Застосовують також швидке введення у розігріту піч частково закристилізованих зразків з наступним загартуванням після витримки при високій температурі. Відповідним підбором температур визначають температури плавлення кристалічних фаз (верхня температура кристалізації), що виділилися.

Схему улаштування печі, що застосовується при визначенні температури кристалізації стекол методом загартування, показано на рисунку 1.16.

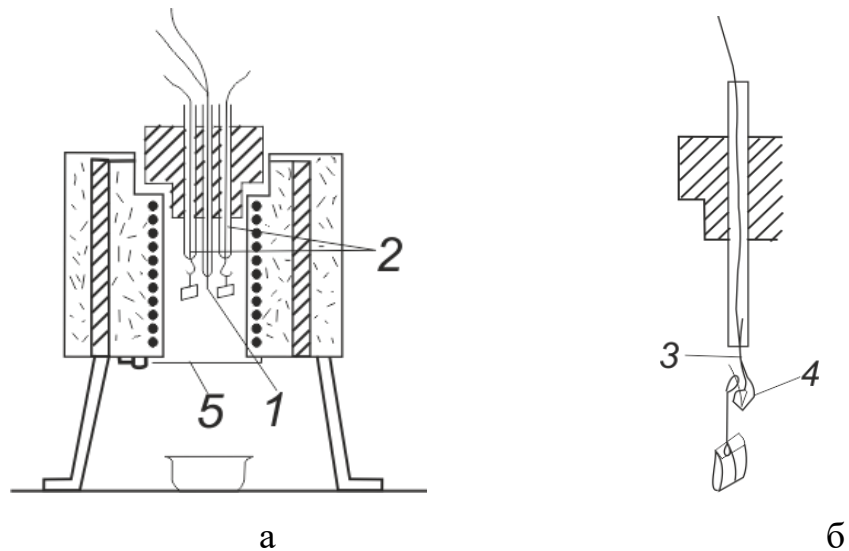


Рисунок 1.16 – Схема печі для визначення температури кристалізації скла методом загартування:

а – піч; б – деталь кришки з підвіскою, з якої видно як улаштований скидач

У кришці печі встановлені термопара (1) і поряд з нею спеціальні підвіски (2) з ніхромового або платиного дроту для закріплення окремих пакетиків (з фольги) зі зразками стекел. Підвіска улаштована так, що за допомогою спеціального дроту (3) пакетик може бути швидко скинутий з гачка (4). Нижній отвір жарової порожнини щільно закривається заслінкою (5). Під піччю може бути встановлено стакан з рідиною (олія, вода) для загартування скла.

У зв'язку з трудомісткістю цей метод використовують тільки в науково-дослідних роботах і не застосовують під час контролю виробництва.

1.5.7 Методи якісної оцінки

Під час розроблення нових стекел та у порівняльних дослідженнях застосовують різні якісні оцінки кристалізаційної здатності, при яких стекла обробляють за одним чи декількома термічними режимами та візуально визначають ступінь їхнього розклування.

Використовують (за К. І. Педдлем) такі методи теплової обробки:

- а) повільне охолодження печі та тиглів з розплавленим склом;
- б) повторний нагрів зразків стекол до температури 800–1 200 °С;
- в) обробка у полум’ї пальника.

Якісну оцінку ступеня кристалізації здійснюють за шестибальною шкалою (табл. 1.8)

Кількісну оцінку кристалізаційної здатності проводять за швидкістю лінійного росту кристалів (швидкості кристалізації) v , що визначається шляхом перегляду закристалізованих ділянок у мікроскопі, та розраховують за формулою 1.25:






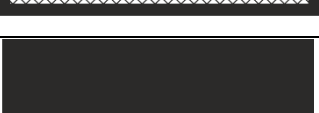
$$v = \frac{\bar{l}}{2t}, \quad (1.15)$$

де \bar{l} – середня довжина кристалів, мкм;

t – час витримки при такій температурі, хв.

Застосовують також підрахунок кількості кристалів у 1 мм³ (або на 1 мм² поверхні шліфу).

Таблиця 1.8 – Шкала якісної оцінки ступеня кристалізації стекол

Бал	Ступінь кристалізації стекол	Умовне позначення ступеня кристалізації
I	Відсутні ознаки кристалізації	
II	Поверхнева кристалізація у вигляді невеличких роз’єднаних відрізків	
III	Поверхнева кристалізація у вигляді суцільної тонкої плівки	
IV	Поверхнева кристалізація у вигляді суцільної товстої кірки з частковим розповсюдженням кристалів у глиб зразка	
V	Розповсюдження кристалізації по всьому об’єму зразка. Кристалічна фаза складає не менше 50–60 %	
VI	Умовно повна кристалізація зразка. Наявність кристалічної фази 60–100 %	

Результати проведених дослідів зазвичай зображують у вигляді діаграми (рис. 1.17).

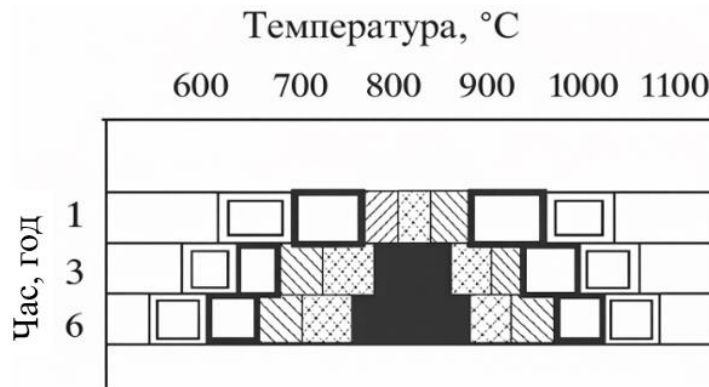


Рисунок 1.17 – Діаграма якісної оцінки кристалізаційної здатності скла

Визначальним при одержанні ситалів є встановлення правильного режиму термообробки скла. Оскільки саме він забезпечить повною мірою заданий фазовий склад та значно скоротить час одержання ситалу з необхідними властивостями.

Під час вибору режимів термообробки варто враховувати, що перша стадія (утворення кристалічних центрів) її знаходиться поблизу температури розм'якшення скла, яка, за С. Д. Стукі, відповідає верхній температурі відпалу скла (в'язкість 10^{10} Па · с) або на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище за неї. Друга стадія термообробки лежить в області вищих температур.

Для наближеного визначення температурних інтервалів різних етапів кристалізації скла використовують градієнтний метод (рис. 1.18).

Температурний інтервал $t_1 - t_2$, у якому спостерігається опалесценція, відповідає температурному стану, свідомо вищому за температуру першої стадії, тому що на цьому відрізку температур уже відбувся ріст центрів кристалізації до часточок видимих розмірів. Виключення становлять деякі склади стекол, у яких опалесценція може бути пов'язана не з початком кристалізації скла, а з його мікроліквіацією.

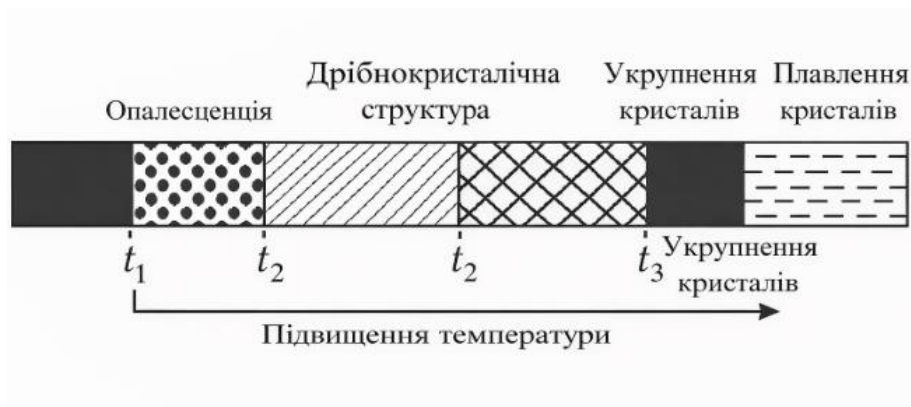


Рисунок 1.18 – Схема структурних змін у склі після витримки у градієнтній печі

У температурному інтервалі t_2-t_3 спостерігається спочатку дрібнокристалічна, потім більш укрупнена структура. При температурі t_3 відбувається плавлення кристалів з появою рідкої фази.

Таким чином, на підставі цього методу можна вважати, що температура першої стадії термообробки перебуває нижче температури t_1 , а температура другої стадії – посередині інтервалу t_2-t_3 . Температура t_3 приблизно відповідає температурі плавлення ситалу з досліджуваного скла.

За градієнтною пробою можна також установити рентгенодифракційним методом фазовий склад, що відповідає безпосередньо тій або іншій температурі.

Аналіз кристалічних фаз, що виділилися, здійснюють петрографічними методами за допомогою поляризаційного мікроскопу або рентгенофазовим аналізом. До методів, що фіксують зміни структури, відносять диференціально-термічний, дилаторметричний, оптичні (ІЧ-спектроскопія), ядерного магнітного резонансу, електронно-мікроскопічні дослідження (сканувальні та просвітлювальні мікроскопи).

Контрольні запитання

1. Дайте визначення терміну «кристалізація скла».
2. Чому процес розкльування є небажаним при виробленні промислового скла?
3. Які основні фактори характеризують переохолоджений стан силікатного розплаву?
4. З яких двох стадій складається процес кристалізації скла?
5. Що таке центри кристалізації та які їхні розміри?
6. У чому відмінність між гомогенною та гетерогенною кристалізацією?
7. Де найчастіше зароджуються перші кристали у скломасі?
8. Як співвідношення швидкості утворення центрів кристалізації (ЧЦК) та швидкості росту кристалів (ШРК) впливає на структуру скла?
9. Що таке верхня та нижня температури кристалізації скла?
10. Що відбувається зі скломасою при швидкому охолодженні після температурного максимуму кристалізації?
11. Назвіть основні види кристалізації стекол та охарактеризуйте їх.
12. Чим відрізняється поверхнева кристалізація від об'ємної дрібнокристалічної?
13. Які особливості структури та властивостей мають ситали?
14. Як хімічний склад скла впливає на його кристалізаційну здатність?
15. Як положення складу відносно евтектичної точки на діаграмі стану впливає на схильність до кристалізації?
16. Який вплив мають оксиди Al_2O_3 , CaO , MgO , BaO та лужні оксиди на кристалізацію стекол?
17. Яку роль відіграють ініціатори (нуклеатори) кристалізації у формуванні ситалізованої структури?

18. Які способи штучного утворення зародків кристалізації застосовують на практиці?
19. Що таке температурна область кристалізації і як її визначають?
20. У чому полягає сутність градієнтного методу визначення кристалізаційної здатності стекол?
21. Які можливості та переваги має метод масової кристалізації?
22. У чому особливість методу вертикально-градієнтної печі?
23. Розкрийте сутність методу загартування при визначенні кристалізаційної здатності.
24. Як здійснюється якісна та кількісна оцінка ступеня кристалізації стекол?
25. Якими методами досліджують фазовий склад і структуру закристалізованих стекол?

Тестові завдання

1. Кристалізація скла – це процес:
 - а) плавлення кристалів;
 - б) переходу з аморфного стану у кристалічний;
 - в) випаровування розплаву;
 - г) зниження в'язкості.

2. Основні стадії кристалізації скла:
 - а) плавлення і охолодження;
 - б) утворення центрів кристалізації та ріст кристалів;
 - в) дегазація і гомогенізація;
 - г) розчинення і дифузія.

3. Який фактор НЕ належить до характеристик переохолодженого розплаву:

- а) швидкість росту кристалів;
- б) число центрів кристалізації;
- в) густина газів;
- г) в'язкість розплаву?

4. Гетерогенна кристалізація відбувається:

- а) без домішок;
- б) тільки при високій температурі;
- в) на сторонніх фазах або домішках;
- г) лише у кварцовому склі.

5. Яка кристалізація є дефектною для більшості стекол:

- а) об'ємна дрібнокристалічна;
- б) поверхнева та об'ємна нерівномірна;
- в) керована ситалізація;
- г) ліквідаційна?

6. Верхня температура кристалізації – це температура:

- а) плавлення скла;
- б) максимального росту кристалів;
- в) виникнення центрів кристалізації;
- г) повного розсклування.

7. Найменшу схильність до кристалізації мають склади, близькі до:

- а) стехіометричних сполук;
- б) евтектики;
- в) області ліквідації;
- г) максимуму ліквідусу.

8. Який метод базується на кристалізації зразків у температурному градієнті печі:

- а) метод загартування;
- б) масова кристалізація;
- в) градієнтний метод;
- г) дилатометричний метод.

9. Основна особливість ситалів:

- а) повністю аморфна структура;
- б) крупнокристалічна структура;
- в) дрібнокристалічна структура з прошарками скла;
- г) відсутність кристалічної фази.

10. Швидкість кристалізації визначають як:

- а) відношення густини до температури;
- б) відношення довжини кристалу до часу;
- в) зміну маси зразка;
- г) різницю температур.

РОЗДІЛ 2

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТЕКОЛ

Сукупність властивостей, що характеризують опір матеріалу до дій, доданих до нього зовнішніх механічних сил (навантажень), прийнято називати механічними властивостями.

Сили можуть бути додані у вигляді навантаження:

- статичне (повільно зростаюче);
- динамічне (зростаюче різко із великою швидкістю);
- повторно-перемінне (многократне додане, що змінюється за значенням і напрямом).

Використовують здебільшого два способи навантаження зразка:

- 1) шляхом його деформації з заданою швидкістю і вимірюванням сил опору зразка цією деформацією;
- 2) подачею постійного навантаження (напруги) на зразок із вимірюванням одержаної при цьому деформації.

Найбільш розповсюджено перший спосіб, який забезпечує можливість безперервного вимірювання та запису сили опору зразка до деформації. Він використовується практично для усіх видів статичних дослідів.

Прикладом використання другого способу навантаження – випробування на повзучість, тривалу міцність та уповільнене руйнування.

Класифікація механічних випробувань

Механічні випробування розподіляють на:

- 1) **статичні:** розтяг, стиск, згин, кручення, твердість (рис. 2.1) – відносно повільне збільшення навантаження від нуля до деякого максимального значення (секунди – хвилини).



Рисунок 2.1 – Види навантаження

Найважливішими є такі різновиди статичних випробувань, які відрізняються схемою додання навантаження на зразок (тобто схемою напруги стану): одноосний розтяг, одноосний стиск (далі – розтяг, стиск), згин, кручення, розтяг та згин зразків із надрізом і тріщиною (плоскі та об’ємні схеми напруги стану);

2) **динамічні** (ударний згин) – збільшення навантаження проходить за дуже короткий проміжок часу (долі секунди).

У результаті динамічних випробувань визначають значення повної або питомої роботи динамічної деформації, а також величину залишкової деформації зразка (абсолютної або відносної). Даних про значення напруг та деформацій в процесі цих випробувань зазвичай не отримують, хоча в принципі це можливо.

Динамічні випробування частіше всього проводять за схемою згину;

3) **циклічні** (втомленість, при повторно-змінному додаванні навантаження) – багатократна зміна навантаження за напрямком і (або) за значенням впродовж від декількох до сотен годин.

Випробування на втомленість проводять при багатократному додаванні до зразка навантаження, що змінюються. Такі випробування зазвичай довготривалі (години – сотні годин), за їхніми результатами

визначають число циклів до руйнування за різних значень напруг, а в кінці, максимальну напругу, яку зразок витримує без руйнування впродовж певного числа циклів навантаження.

У результаті циклічних напруг скломатеріал «втомлюється», міцність знижується, і настає руйнування.

Окрім вказаних статичних, динамічних та втомлених, розрізняють ще дві великі специфічні групи випробувань.

Перша з них – випробування на твердість, в яких оцінюють різні характеристики опору до деформації або, рідше, руйнування поверхневих шарів зразку під час взаємодії їх з іншим тілом – індентором (від англійського indentation – вдавлювання). Більшість випробувань на твердість статичні.

Друга група – випробування на повзучість та довготривалу міцність. Їх зазвичай проводять при підвищених температурах для оцінки характеристик жаростійкості. Зразки протягом всього випробування знаходяться під постійною напругою або навантаженням.

Усі випробування зазвичай проводять у певних умовах на зразках заданої форми та розміру, тобто за міжнародним та за прийнятим стандартом, що забезпечує відповідність одержаних результатів і правильну їхню інтерпретацію.

Як видно, методи проведення механічних випробувань різноманітні. До того ж вони проводяться при різних температурах, починаючи з дуже низьких і закінчуючи температурами, близькими до температур плавлення, в різних середовищах тощо. Все це відображує різноманітність умов експлуатації та обробки матеріалів, які намагаються моделювати випробуваннями.

2.1 Щільність скла

Щільність скла чисельно дорівнює масі одиниці об'єму. Одиницею щільності є кг/м^3 . У технологічній та дослідній практиці часто використовують позасистемні одиниці: г/см^3 , кг/дм^3 , т/м^3 . Існує кілька понять щільності.

Істинна густина – маса одиниці об'єму абсолютно щільного матеріалу. Якщо маса матеріалу m , а його об'єм у щільному стані V_a , то істинна густина розраховується за формулою:

$$\rho = m/V_a . \quad (2.1)$$

Скло у звичайному розумінні характеризується істиною густиною, для основної групи будівельного скла ця величина складає 2,2–2,8 (до 3,5) г/см^3 . Низька густина наприклад, у кварцового скла – 2,203 г/см^3 .

Деякі скловироби будівельного призначення в природному стані мають замкнуті або сполучені пори, заповнені газом чи повітрям. Наприклад піноскло або скловолокнисті плити. Об'єм пористого матеріалу V_e складається з обсягу твердої речовини V_a та об'єму пір V_n :

$$V_e = V_a + V_n . \quad (2.2)$$

Середня густина – маса одиниці об'єму матеріалу в природньому стані:

$$\rho_m = m/V_e . \quad (2.3)$$

Щільність пористих матеріалів завжди менше їхньої справжньої щільності. Наприклад середня густина піноскла складає 150–800 кг/м^3 . Середню густину іноді називають *об'ємною масою*.

Визначають середню густину зважуванням та вимірюванням зразків правильної форми або гідростатичним зважуванням. А справжню щільність пористих матеріалів визначають пікнометричним методом.

Усі сировинні матеріали, що використовуються у виробництві скла, а також напівфабрикати (склогрануляти) та вироби для будівництва (скловата) мають порошкоподібний стан. Для таких матеріалів використовується поняття – «насипна густина» – маса одиниці об'єму рихленасипаних зернистих або волокнистих матеріалів (p_n).

Визначають насипну щільність зважуванням відібраної порції матеріалу. Наприклад, справжня щільність теплоізоляційного піноскла, складає 2 520 кг/м³, середня густина піноскла – 220 кг/м³, а насипна щільність склокришки з цього піноскла – 130 кг/м³.

У практиці скловиробництва застосовується і поняття «питомий об'єм», яким називають об'єм одиниці маси матеріалу. Одиниця виміру питомого об'єму є м³/кг або см³/г.

У будівництві використовується поняття «відносна густина» (d). Вона виражає відношення щільності матеріалу (істинної або середньої) до щільності стандартної речовини при визначених фізичних умовах. Як стандартна речовина переважно приймається вода, що має при температурі при 3,98 °С густину 1 000 кг/м³ або 1 г/см³. Тоді відносна щільність скла складає 2,52 кг/м³, а піноскла – 0,22 кг/м³. Відносна щільність використовується для обчислення коефіцієнта конструктивної якості матеріалів та виробів.

Щільність може бути визначена з великою точністю – до 0,000 1 г/см³ – і по ній можна встановлювати відхилення промислових стекол та контролювати виробництво. Щільність скла визначається методом гідростатичного зважування та пікнометра, а також шляхом підбирання рідини густиною, однаковою зі склом. Окрім того щільність скла можна розрахувати за його хімічним складом, використовуючи правило адитивності.

2.1.1 Метод гідростатичного зважування

Цей метод використовують переважно у тому випадку, якщо за будь-яких причин руйнування скла небажане. Метод засновано на законі Архімеда та зводиться до визначення об'єму рідини, витісненої склом при його зануренні у цю рідину.



Рисунок 2.1 – Гідростатичні ваги для визначення питомої ваги

Під час гідростатичного зважування скла зазвичай використовують дистильовану воду, проте може бути також використана будь-яка рідина відомої щільності, яка добре змочує скло і яка не реагує з ним. Наприклад ксилол, толуол, тощо.

Для визначення відбирають п'ять зразків вагою не менше 5 г, вільних від пухирців та каміння. Зразки мають бути вимитими та сухими, після чого протертими етиловим спиртом та висушеними. Обрані шматочки скла підвішують на тонкий ($d = 0.1-0,05$ мм) металевий дріт до гаку коромисла попередньо врівноважених вагів та визначають вагу у повітрі. Чисту вагу скла отримують, віднімаючи від ваги скла з дротом вагу дроту, яка заздалегідь відома. Потім зразки скла зважують вдруге, але вже у воді, для чого їх на цьому самому дроті опускають у стакан із дистильованою водою.

Під час зважування необхідно уникати появи пухирців повітря на зразках. Зразки не повинні торкатись стінок або дна стакану, а скручена частина дроту має бути покрита водою. Температура води та повітря має бути однаковою.

Для гідростатичного зважування можуть бути пристосовані звичайні аналітичні ваги (рис. 2.2), з яких знімають ліву чашку і замість неї підвішують гирю з гачком. Зразок зважують у стакані, заповненому дистильованою водою.



Рисунок 2.2 – Аналітичні ваги для визначення питомої ваги

Щільність скла розраховується за формулою:

$$d = \frac{G}{G - G_1} (d_p - d_n) + d_n, \quad (2.4)$$

де d – щільність скла, г/см³;

G – вага зразка у повітрі, г;

G_1 – вага зразка у рідині, г;

d_p – густина рідини за температури досліду, г/см³;

d_n – густина повітря за температури досліду, г/см³.

2.1.2 Метод пікнометра

Метод пікнометра дозволяє визначити питому вагу скла з найбільшою точністю. Зазвичай пікнометр становить колбу об'ємом 25 або 50 мл. Вимірювання об'єму значно спрощуються, якщо замість однієї мітки у пікнометра є шкала. Дуже зручний у роботі пікнометр з бічної капілярною трубкою, у якій пробкою слугує тіло термометра. Щільність твердих тіл визначають, занурюючи їх у пікнометр з рідиною.



Рисунок 2.3 – Пікнометр для визначення питомої ваги скла

Під час визначення щільності пікнометричним методом 10–15 г скла подрібнюють у ступі до повного проходження через його сито 10 000 отв/см². Це виключає вплив мікропухирців газу, які можуть бути у склі, на точність визначення його щільності.

Заготовлений порошок скла насипають у бокс та зберігають у ексикаторі. Ретельно вимитий та висушений до постійної ваги пікнометр зважують на аналітичних вагах з точністю до 0,000 1 г (вага G). Потім у пікнометр насипають порошок скла та знову зважують його (вага G1), чиста вага скла визначається за різницею G1 – G після цього пікнометр зі склом наповнюють ксилолом або толуолом до мітки на капілярі або горлі та кип'ятять на піщаній бані протягом 20–30 хвилин для видалення повітря.

Для дуже точного визначення щільності з порошку скла видаляють газ під вакуумом, для чого може бути використаний вакуум-ексикатор, який використовується для визначення щільності керамічних матеріалів.

Далі пікнометр охолоджують на повітрі або у воді, а потім поміщують у шафу аналітичних ваг, де його тримають не менше години для вирівнювання температури всередині шафи та температури пікнометра. Для вимірювання температури у шафі має бути встановлено термометр. Після цього пікнометр обережно доливають ксилолом до мітки і зважують (вага G_2). Потім пікнометр звільняють від ксилолу і скла, ретельно промивають дистильованою водою та ефіром, висушують, охолоджують та після наповнюють ксилолом до мітки та ще раз зважують (вага G_3).

Щільність визначається за формулою:

$$d = \frac{(G_1 - G)(d_k - d_p)}{G_3 + (G_1 - G) - G_2} + d_p, \quad (2.5)$$

де d – щільність скла, г/см³;

d_k – щільність ксилолу за температури дослідів, г/см³;

d_p – густина повітря за температури дослідів, г/см³.

За умови правильного зважування і точному спостережні вказаних вище правил (температура, дисперсність порошку тощо) щільність скла за цим методом можна визначити з точністю до 0,0001 г/см³. Щільність за методом пікнометра зазвичай визначають у двох паралельних пробах та беруть середнє значення.

2.1.3 Розрахунковий метод

Якщо відомий хімічний склад скла, його щільність можна визначити розрахунковим методом з точністю до 1–3 %, використовуючи формулу Вінкельмана – Шотта:

$$\frac{100}{d} = \frac{P_1}{d_1} + \frac{P_2}{d_2} + \frac{P_3}{d_3} \dots + \frac{P_x}{d_x}, \quad (2.6)$$

де d – щільність скла;

P_1, P_2, P_3, P_x – вміст у склі кожного з оксидів, %;

d_1, d_2, d_3, d_x – щільність відповідних оксидів у склі (табл. 2.1)

Таблиця 2.1 – Коефіцієнти для розрахунку щільності скла (за Вінкельманом – Шоттом)

Оксиди	Щільність оксиду у вільному стані, г/см ³	Коефіцієнт	Оксиди	Щільність оксиду у вільному стані, г/см ³	Коефіцієнт
SiO ₂	2,17	2,24	MgO	3,4	3,25
B ₂ O ₃	1,46	1,9	BaO	5	7,2
P ₂ O ₅	2,38	2,55	ZnO	5,65	5,94
As ₂ O ₃	4,09	3,33	PbO	9,32	10,3
Al ₂ O ₃	3,85	4,1	Na ₂ O	2,55	3,2
CaO	3,15	4,3	K ₂ O	2,66	3,2

Контрольні запитання

1. Що розуміють під щільністю скла?
2. Яка основна одиниця вимірювання щільності в системі СІ?
3. Які позасистемні одиниці вимірювання щільності застосовують у технологічній практиці?

4. Що таке істинна густина матеріалу та як її обчислюють?
5. Яка істинна густина будівельного та кварцового скла?
6. З яких складових елементів складається об'єм пористого матеріалу?
7. Як визначається середня густина матеріалу та що вона характеризує?
8. Чому середня густина пористих матеріалів завжди менша за істинну?
9. Приклади середньої густини для піноскла та скловолокнистих плит.
10. Що таке насипна густина і для яких видів матеріалів її використовують?
11. Приклади насипної густини для склокришки та піноскла.
12. Що таке питомий об'єм і в яких одиницях він вимірюється?
13. Що таке відносна густина та яку стандартну речовину застосовують для її визначення?
14. Для чого використовують відносну густину у будівництві та скловиробництві?
15. На якому фізичному законі базується метод гідростатичного зважування?
16. Які умови необхідно дотримуватися при гідростатичному зважуванні скла для отримання точних результатів?
17. Як розраховується щільність скла за формулою при гідростатичному зважуванні?
18. У чому полягає суть пікнометричного методу визначення щільності та як підвищується точність вимірювань?
19. Як проводять підготовку скла до пікнометричного визначення (подрібнення, видалення газу, наповнення рідиною)?

20. Що таке розрахунковий метод визначення щільності скла за формулою Вінкельмана – Шотта та яка точність цього методу?

Тестові завдання

1. Щільність скла – це:

- а) сила деформації;
- б) питомий об'єм;
- в) маса одиниці об'єму;
- г) в'язкість.

2. Істинна густина розраховується за формулою:

- а) $\rho = V/m$;
- б) $\rho = m/Va$;
- в) $\rho = m \cdot V$;
- г) $\rho = Va/m^2$.

3. Низьку густину має:

- а) свинцеве скло;
- б) кварцове скло;
- в) барієве скло;
- г) оптичне скло.

4. Середня густина піноскла становить приблизно:

- а) 2 000 кг/м³;
- б) 1 200 кг/м³;
- в) 150–800 кг/м³;
- г) 50 кг/м³.

5. Насипна густина використовується для:

- а) монолітного скла;
- б) рідин;
- в) порошкоподібних матеріалів;
- г) газів.

6. Відносна густина – це:

- а) різниця щільностей;
- б) сума густин;
- в) відношення щільності матеріалу до щільності стандартної речовини;
- г) середнє значення густини.

7. Метод гідростатичного зважування застосовують, коли:

- а) потрібно розплавити скло;
- б) небажано руйнувати зразок;
- в) потрібен вакуум;
- г) потрібна висока температура.

8. Яку рідину найчастіше використовують при гідростатичному зважуванні:

- а) масло;
- б) спирт;
- в) дистильовану воду;
- г) ацетон?

9. Пікнометр – це:

- а) прес для скла;
- б) нагрівальна піч;

- в) колба для точного визначення щільності;
- г) термopара.

10. Розрахунковий метод визначення щільності використовує:

- а) закон Гука;
- б) закон Паскаля;
- в) формулу Вінкельмана – Шотта;
- г) рівняння Арреніуса.

2.2 Пружність скла

Тверді тіла непластичні. Такими є стекла при невисоких температурах (до 450 °C).

Пружність – здатність тіла після деформації під дією прикладених навантажень повертатися до своєї початкової форми після зняття навантажень. Пружні властивості характеризуються величиною модуля пружності (Юнга) – E . Чим більше E , тим менше деформація тіла:

$$\Delta L = F \cdot L / E \cdot S, \quad (2.7)$$

де ΔL – подовження (деформація) зразка завдовжки L та поперечним перетином S під дією навантаження F .

Вимірюється модуль Юнга (E) в Па. Залежно від хімічного складу скла модуль пружності змінюється від 48 ГПа до 83 ГПа. Для листового скла звичайного складу – від 59 ГПа до 69 ГПа. Модуль пружності загартованого скла зазвичай на 5–7 % нижчий, ніж у випаленого. Для порівняння, модуль пружності сталі – 215 ГПа, алюмінію – 62–73 ГПа, міді – до 98.

Значення модуля пружності скла підвищують оксиди CaO, B₂O₃ у кількості до 12 % у складі скла. Лужні оксиди, навпаки, знижують модуль пружності. Оксиди MgO, ZnO, BaO, PbO, Al₂O₃ при заміщенні ними

кремнезему впливають на збільшення модуля пружності, але меншою мірою, ніж оксиди CaO та B₂O₃.

Статичні випробування для визначення модуля пружності скла передбачають застосування сили до зразка до виникнення деформації. Динамічні методи, такі як ультразвукові або резонансні випробування (ASTM C623-21), аналізують коливання для визначення жорсткості. Ці методи забезпечують точні та надійні результати.

Коефіцієнт Пуассона (μ) або коефіцієнт поперечної деформації – це відношення поперечної деформації ($\xi_{\text{поп}}$) до подовженої ($\xi_{\text{пр}}$):

$$\mu = \xi_{\text{поп}} / \xi_{\text{пр}}. \quad (2.8)$$

Величина, що є зворотною коефіцієнту Пуассона називається постійною (або числом) Пуассона і визначається за формулою:

$$m = 1/\mu. \quad (2.9)$$

Вимірюють коефіцієнт Пуассона за допомогою тензодатчиків (резистивні датчики), які наклеюють на поверхню зразка для вимірювання поздовжньої та поперечної деформацій під час розтягування або стиснення. Резистивні тензодатчики кріпляться на поверхню зразка у двох напрямках: вздовж осі навантаження (для поздовжньої деформації) та перпендикулярно до неї (для поперечної деформації). На зразок прикладається механічне навантаження (наприклад, розтяг), спричиняючи його деформацію. Тензодатчики фіксують зміни електричного опору, які пропорційні деформації зразка. Ці показники дозволяють визначити поздовжню (зсув уздовж осі) та поперечну (звуження або розширення впоперек осі) деформації.

Використовуючи отримані значення деформацій, обчислюють коефіцієнт Пуассона за формулою (2.8). Залежно від хімічного складу скла значення коефіцієнту μ змінюється в межах 0,2–0,3.

Модуль зрушення (G) характеризує здатність скла чинити опір деформації зрушення і дорівнює відношенню дотичної напруги до кута зрушення. Для будівельного скла величина модуля зрушення дорівнює 22–32 ГПа.

Модулі пружності (E) і зрушення (G) і коефіцієнт Пуассона μ пов'язані між собою таким рівнянням:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (2.10)$$

Для характеристики пружних властивостей скла використовують також модулі *кручення* $T_{\text{круч}}$ та *об'ємної пружності* K . Ці модулі пов'язані з модулем Юнга та коефіцієнтом Пуассона такими формулами (2.11) – (2.22):

$$E = \frac{9KT_{\text{круч}}}{3K+T_{\text{круч}}}; \quad (2.11) \quad E = 3K(1 - 2\mu); \quad (2.12) \quad E = 2T_{\text{круч}}(1 + \mu); \quad (2.13)$$

$$E = \frac{3EK}{9K-E}; \quad (2.14) \quad T_{\text{круч}} = \frac{3(1-\mu)}{2(1-\mu)}; \quad (2.15) \quad T_{\text{круч}} = \frac{E}{2(1-\mu)}; \quad (2.16)$$

$$K = \frac{ET_{\text{круч}}}{9T_{\text{круч}}-3E}; \quad (2.17) \quad K = \frac{2T_{\text{круч}}(1-\mu)}{3(1-\mu)}; \quad (2.18) \quad K = \frac{E}{3(1-\mu)}; \quad (2.19)$$

$$\mu = \frac{E-2T_{\text{круч}}}{2T_{\text{круч}}}; \quad (2.20) \quad \mu = \frac{3K-2T_{\text{круч}}}{6K-2T_{\text{круч}}}; \quad (2.21) \quad \mu = \frac{3K-E}{6K}. \quad (2.22)$$

2.2.1 Визначення модуля пружності методом стріли прогину проби скла

Для визначення модуля пружності скломатеріалів використовують прилад, заснований на принципі визначення стріли прогину проб стекл і отриманих у вигляді ниток.

На предметному столику 1 (рис. 2.4) бінокулярної лупи 2 змонтовані дві опорні призми 3, на яких розміщується проба скла у вигляді нитки 4, розміщення якої проводиться так, щоб центр нитки між призмами збігався з оптичною віссю мікроскопу. Її чітка видимість крізь мікроскоп досягається шляхом висвітлення нитки пучком світла відбитого від дзеркала мікроскопа 5.

Прогин нитки досягається шляхом поміщення на її середню частину невеликого вантажу у вигляді рейтера аналітичних ваг (10 мг). Встановлення рейтера проводиться за допомогою пристрою, що становить невеликий гачок із сталевого дроту.

Величина прогину і діаметр нитки встановлюється за допомогою оптичного гвинтового мікрометра 6, що поміщається на мікроскоп. Призми 3 кріпляться до предметного столику за допомогою двох кронштейнів 7.

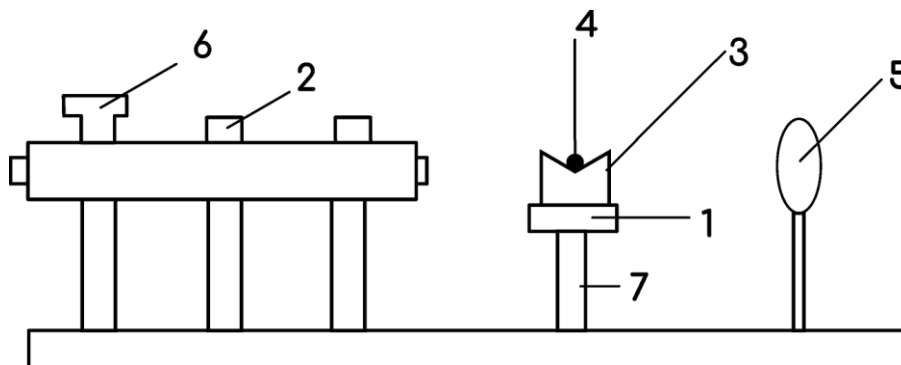


Рисунок 2.4 – Схема пристрою для визначення модуля пружності стекол

Гвинтовий мікрометр має п'ятикратне збільшення. Ціна ділення окуляра АМ-2 – 0,1 мкм. Мікрометр дозволяє визначити крім стріли прогину нитки і її діаметр, значення якого необхідно для розрахунку модуля пружності. Нитки із стекол виготовляються шляхом витягування їх з відповідних розплавів. Для цього скло (рис. 2.5) у кількості 200–300 г розміщують в шамотному тигелі 2 ємністю 500 см³, встановлюваний в

електричну піч 3 і нагрівають до відповідної температури (900–1 000 ° С), при якій досягається гомогенізація розплавленого матеріалу. Витягування нитки 4 здійснюється за допомогою пристрою 5, що становить сталевий стрижень діаметром 10 мм.

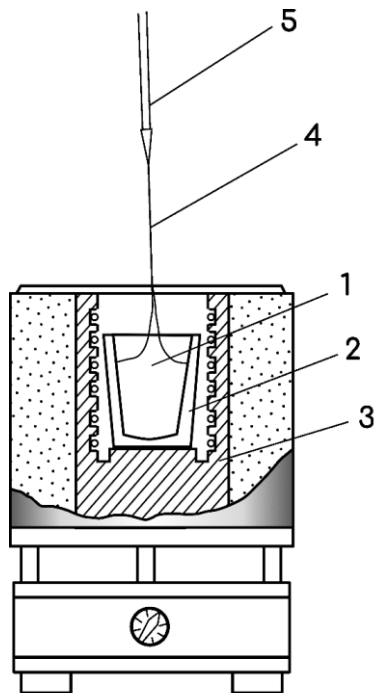


Рисунок 2.5 – Схема витягування нитки з розплаву скла

Витягнуті зразки нитки не піддаються попередньому відпалу, щоб наблизити умови експерименту до реальних умов теплового режиму охолодження виробів після формування. Необхідно щоб випробовувана нитка в поперечному перерізі характеризувалася б практично правильною круглою формою. Вимірювання значень стріли прогину і діаметра нитки здійснюється зі значною точністю (до третього знаку після коми).

Для визначення стріли прогину нитки під впливом ваги рейтера (0,01 г) записуються значення, зафіксовані на шкалі мікрометра при переміщенні штрихів і перекриття до їхнього збігу з нижньою кромкою ниті. При цьому зміщення нитки забороняється. Вказані вимірювання проводяться і до навантаження, після чого підвішується рейтер. Прогин нитки, який виражається стрілою прогину F , визначають за різницею

показань шкали мікрометра до навантаження і після навантаження.

Для визначення модуля пружності скломатеріалів використовують формулу

$$E = \frac{4Pl^3}{3\pi Fd^4}, \quad (2.23)$$

де E – модуль пружності, ГПа;
 P – навантаження, г;
 l – відстань між опорами, мм;
 F – стріла прогину нитки, мм;
 d – діаметр стрижня нитки, мм.

2.2.2 Визначення модуля Юнга при згині

Зв'язок між модулем Юнга та межею міцності при згині емпірично виражається таким співвідношенням:

$$\frac{R_{\text{виг}}}{0,1E} = C. \quad (2.24)$$

Наближене значення константи для силікатних стекол становить $\frac{1}{40}$, тоді $R_{\text{виг}} = 0,0025E$. Чим вище значення модуля пружності, тим меншу деформацію здатний витримати скляний зразок. При постійній деформації скло тим міцніше, чим менше його модуль пружності.

Для визначення модуля пружності скла вигинають скляну пластинку або стрижень і вимірюють кут повороту виступного кінця пластинки або стрілу прогину цієї пластинки. Величину прогину пластинки або стрижня вимірюють різними приладами. Наприклад, триточкова випробувальна машина на згинання для визначення модуль пружності згідно з ASTM C158 (рис. 2.6).

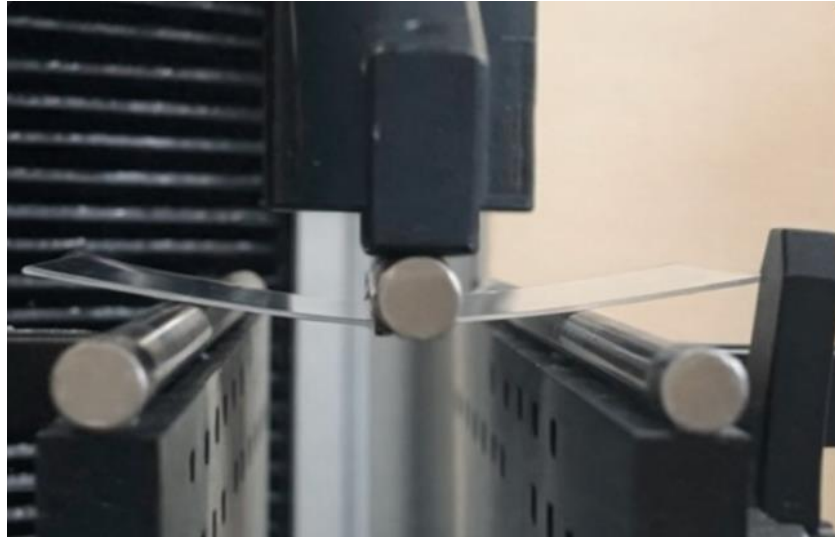


Рисунок 2.6 – Триточкова випробувальна машина на згинання

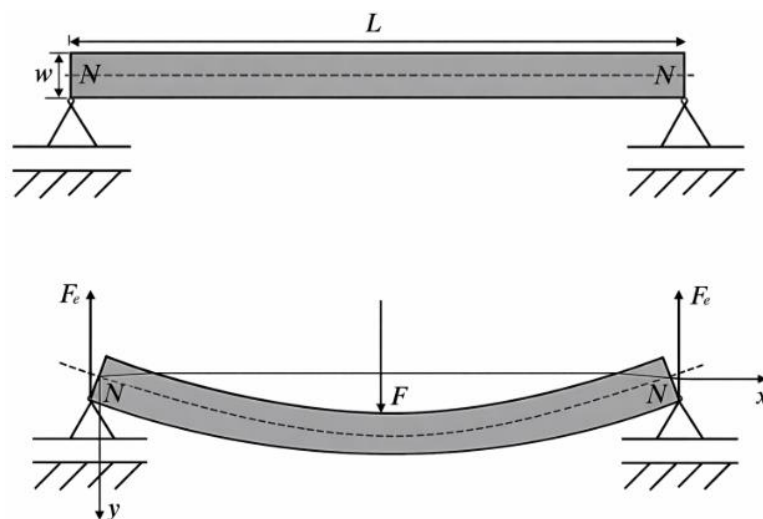


Рисунок 2.7 – Схема триточкового випробування на згинання

Стрілу прогину скляного зразка, що пружно згинається, вимірюють у такий спосіб. Пластинку поміщають на вимірювальному столику приладу і опори укладають випробуваний скляний зразок. Опустивши стопорний гвинт випробувальної машини, підводять верхню опору до поверхні скла і відзначають відповідне значення на шкалі відліку приладу. Потім на вимірювальний стрижень встановлюють заданий вантаж, що викликає прогин скляного зразка. Стрілу цього прогину вимірюють з вказаною вище точністю за різницею показань до і після навантаження.

Величина застосовуваного навантаження не повинна перевищувати межі міцності при згинанні зразка скла цього складу, оскільки модуль пружності не залежить від величини навантаження. Зокрема, можна вимірювати модуль пружності скла, збільшуючи навантаження аж до руйнування зразка, тобто одночасно визначаючи і межу міцності скла при згинанні. Однак це незручно у методичному відношенні, тому варто застосовувати навантаження, що становить 0,5–0,75 руйнівного.

Модуль пружності зразка прямокутного перерізу розраховують за формулою:

$$E = \frac{Pl^3}{4f\delta^3b}, \quad (2.25)$$

де P – навантаження на зразок, кг;

l – відстань між опорами мм;

f – стріла прогину вимірюваного зразка, мм;

δ – товщина зразка, мм;

b – ширина зразка, мм.

2.2.3 Розрахунковий метод визначення пружності скла

Модуль пружності скла може бути розрахований за емпіричною формулою

$$E = P_1E_1 + P_2E_2 + \dots + P_xE_x, \quad (2.26)$$

де P_1, P_2, P_x – вміст оксидів у склі у мас. %;

E_1, E_2, E_x – питома константа пружності оксиду у склі (табл. 2.2).

Варто, однак, пам'ятати, що математична залежність модуля пружності скла від його хімічного складу насправді значно складніша, ніж це виражено у наведеній вище формулі, тому дані, одержувані розрахунковим шляхом за правилом адитивності, є орієнтовними.

Таблиця 2.2 – Константи для розрахунку пружності скла

Оксиди	Значення константи для стекол			Оксиди	Значення константи для стекол		
	Не містять В ₂ O ₃	Не містять PbO, але містять В ₂ O ₃	Містять P ₂ O ₅ , В ₂ O ₃ , PbO		Не містять В ₂ O ₃	Не містять PbO, але містять В ₂ O ₃	Містять P ₂ O ₅ , В ₂ O ₃ , PbO
SiO ₂	70	70	70	MgO	–	40	30
B ₂ O ₃	–	60	25	BaO	–	70	30
As ₂ O ₃	40	40	40	ZnO	52	100	–
P ₂ O ₅	–	–	0	PbO	46	–	55
Al ₂ O ₃	180	150	130	Na ₂ O	61	100	70
CaO	70	70	–	K ₂ O	40	70	30

Коефіцієнт Пуассона також розраховують за звичайною адитивною формулою:

$$\mu = \sum P_i \mu_i, \quad (2.27)$$

де P_i – вміст оксидів у склі, мас. %;

μ_i – парціальний коефіцієнт коефіцієнта Пуассона (табл. 2.3).

Модуль зрушення (G) також розраховують за звичайною адитивною формулою:

$$G = \sum N_i G_i, \quad (2.28)$$

де N_i – вміст оксидів у склі, мол. %,

G_i – парціальний коефіцієнт модуля зрушення (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Парціальні коефіцієнти для різних оксидів

Оксид	E_i	μ_i	G_i
1	2	3	4
SiO ₂	0,65	0,001 53	0,27
Al ₂ O ₃	1,19	0,001 75	0,495
Fe ₂ O ₃	0,76	0,003 20	0,19

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4
MgO	1,57	0,002 50	0,38
CaO	1,09	0,004 16	0,495
BaO	0,70	0,003 65	0,175
ZnO	0,82	0,003 46	0,29
Na ₂ O	0,653	0,004 31	0,173
K ₂ O	0,47	0,003 90	0,108

Контрольні запитання

1. Що таке пружність скла?
2. До якої температури скло зберігає властивості твердого непластичного тіла?
3. Яка фізична величина характеризує пружні властивості скла?
4. У чому фізичний зміст модуля пружності (модуля Юнга)?
5. У яких одиницях вимірюється модуль Юнга?
6. Який діапазон значень модуля пружності характерний для силікатних стекол?
7. Як співвідноситься модуль пружності скла з модулями пружності сталі, алюмінію та міді?
8. Які оксиди підвищують модуль пружності скла?
9. Як впливають лужні оксиди на величину модуля пружності?
10. Як оксиди MgO, ZnO, BaO, PbO та Al₂O₃ впливають на модуль пружності скла?
11. Що таке коефіцієнт Пуассона і яку фізичну величину він характеризує?
12. У яких межах змінюється коефіцієнт Пуассона для скла залежно від його складу?

13. Що таке модуль зрушення (G) та яку властивість матеріалу він характеризує?
14. Як пов'язані між собою модуль Юнга, модуль зрушення та коефіцієнт Пуассона?
15. Що таке модуль кручення та об'ємна пружність і як вони пов'язані з E та μ ?
16. Які формули зв'язують модулі пружності, зрушення, кручення та об'ємної пружності?
17. У чому полягає метод визначення модуля пружності скла за стрілою прогину нитки?
18. Як готують скляні нитки для випробування на пружність?
19. Як визначають прогин (стрілу) нитки під вантажем і діаметр нитки?
20. Яка формула використовується для розрахунку модуля пружності за стрілою прогину нитки?
21. У чому особливість визначення модуля Юнга при триточковому згині зразка?
22. Яка формула дозволяє розрахувати модуль пружності прямокутного зразка при згині?
23. Як можна одночасно визначати межу міцності скла та модуль пружності при згині?
24. У чому полягає розрахунковий (адитивний) метод визначення модуля пружності та його обмеження?
25. Як визначають коефіцієнт Пуассона та модуль зрушення скла розрахунковим методом за вмістом оксидів?

Тестові завдання

1. Пружність – це:

- а) плавлення;
- б) здатність відновлювати форму;
- в) пластичність;
- г) руйнування.

2. Основна характеристика пружності:

- а) густина;
- б) теплопровідність;
- в) модуль Юнга;
- г) в'язкість.

3. Одиниця модуля Юнга:

- а) кг;
- б) Па;
- в) Дж;
- г) м/с.

4. Модуль пружності листового скла:

- а) 5–10 ГПа;
- б) 59–69 ГПа;
- в) 150–200 ГПа;
- г) понад 300 ГПа.

5. Оксиди, що підвищують E :

- а) Na_2O ;
- б) K_2O ;
- в) CaO і V_2O_5 ;
- г) тільки PbO .

6. Коефіцієнт Пуассона – це:

- а) сила;
- б) відношення поперечної деформації до поздовжньої;
- в) густина;
- г) тиск.

7. Значення μ для скла:

- а) 0,01;
- б) 0,2–0,3;
- в) 0,9;
- г) 2.

8. Модуль зрушення скла:

- а) 1–5 ГПа;
- б) 22–32 ГПа;
- в) 150 ГПа;
- г) 500 ГПа.

9. Динамічний метод визначення:

- а) хімічний;
- б) ультразвуковий;
- в) оптичний;
- г) електролітичний.

10. Розрахунковий метод базується на:

- а) законі Архімеда;
- б) правилі адитивності оксидів;
- в) магнітному полі;
- г) електропровідності.

2.3 Міцність скла

Міцність – здатність матеріалу витримувати внутрішні напруги, спричинені зовнішніми навантаженнями або іншими факторами (температурними, електричними полями, стисненою усадкою тощо). Оцінюється міцність при деформації як *межа пружності*, при якому зразок матеріалу або виріб руйнується (ДСТУ EN 1288-1:2022 Скло в будівництві. Визначення міцності скла на вигин).

Міцність скла на вигин визначається шляхом випробувань, часто за стандартами на кшталт ДСТУ EN 1288-5:2022 (випробування коаксіальним подвійним кільцем) або іншими методами, що оцінюють здатність матеріалу протистояти навантаженню, яке призводить до викривлення, враховуючи його низьку міцність на розтяг та високу на стиск, причому для загартованого скла вона значно вища, ніж для звичайного, завдяки внутрішнім напруженням стиску на поверхні.

Скло неоднаково поводить себе при різних типах деформацій: найбільшу міцність скла мають при стисканні (600–1 200 МПа), значно меншу при розтягуванні (40–90 МПа) і дуже низьку при ударі – 15–20 МПа.

Міцність скла залежить від хімічного складу, температури, стану поверхні, розмірів, ступеня відпалу, швидкості навантаження та від умов довкілля.

Порівняно рідко на практиці визначають міцність скла при розтягуванні та стисканні. Оцінюється переважно межа міцності під час вигину, що практично не відрізняється від міцності під час розтягування. При звичайній схемі випробувань на поперечний вигин на міцність зразків впливає насамперед стан країв, які ушкоджуються при вирізці. Більш презентабельною є міцність поверхні, що оцінюється при симетричному згині, яка перевищує міцність при поперечному вигині скла.

Міцність скла суттєво залежить від температури. Залежність міцності скла на вигин (F , МПа) від температури (T , °С) адекватно описується рівнянням (коефіцієнт кореляції $r = 0,979$):

$$F = 55 - 0,16t + 0,00035t^2. \quad (2.29)$$

Мінімальна міцність скла при 230 °С. Після зниження температури до –85 °С та підвищенні до 500 °С міцність скла збільшують майже удвічі. Пояснюють це стисненням скла та зменшенням дії поверхнево-активних речовин (вологи) при зниженні температури та появою можливої пластичної деформації та релаксації напруги при підвищенні температури. В інтервалі температур від –30 °С до +30 °С міцність скла змінюється більш ніж на 15 %.

Показовим параметром якості будівельних матеріалів є коефіцієнт конструктивної якості (к.к.я.), рівний відношенню міцності F (МПа) до відносної щільності матеріалу d :

$$\text{к. к. я} = F/d. \quad (2.30)$$

Збільшення к.к.я. досягають підвищенням міцності матеріалу або зниженням його щільності.

Міцність відпаленого скла може бути підвищена повітряним загартуванням у 4–5 раз, іонообмінним зміцненням у розплавах солей у 2–4 рази, травленням фторидної кислоти у 3–4 рази, термохімічною обробкою поверхні.

2.3.1 Визначення межі міцності скла на стиск

Міцність на стиск скла залежить від його хімічного складу. Оксиди калію та кальцію знижують його, оксиди кремнію, магнію, борний

ангідрид та глинозем – підвищують. На міцність скла при стисненні також впливають: ступінь випалу, наявність у зразку недоліків (свілей, пухирці, каменів), розмір зразка, стан його поверхні, швидкість навантаження зразка.

Межею міцності на стиск скла $\sigma_{ст}$ називають таке стискувальне зусилля, яке викликає руйнування зразка скла. Міцність скла на стиск значно вище міцності на розтяг та згин та для різних стекол коливається від 490 МПа до 1960 МПа. Зокрема, віконне скло має межу міцності на стиск близько 880, а кварцове – приблизно 1 960 МПа. Міцність скла під час стискання значно перевищує межу міцності при стисканні деяких матеріалів (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Межа міцності на стиск деяких матеріалів

Матеріала	Межа міцності на стиск, МПа	Матеріал	Межа міцності на стиск, МПа
Цементи різних марок	10–50	Базальт	100–500
Шамотні матеріали	70–100	Агат	150–160
Мармур	70–240	Сталь	200–900
Граніт	240–300	Чавун	600–850
Діабаз	300–400	Мідь	200–300
Скло	500–2000		

Значно впливає на міцність на стиск співвідношення висоти досліджуваного зразка до його ширини або діаметра. Чим менше це співвідношення, тим вище показник міцності при стисканні. Як зразки для визначення міцності скла на стиск найчастіше беруть скляні куби з ребром 4–5 мм або циліндри висотою та діаметром 5 мм; іноді використовують

квадратні пластини товщиною 2–3 мм та довжиною сторони 4 мм. Зразки скла мають біти добре випалені, а їхні поверхні паралельні та добрі відшліфовані.

Під час випробовування зразків на пресі необхідно забезпечити рівномірну стискаюче зусилля і направити його перпендикулярно до поверхні зразка, що стискається. Перед випробуваннями необхідно виміряти розміри зразків. Швидкість навантаження зразків має бути однаковою для усієї серії випробування і знаходитися у межах 10–30 кг на 1 см² поперечного перерізу зразка в 1 секунду.

Визначення межі міцності на стиск виконують за допомогою гідравлічного пресу типу П-125 (рис. 2.8) при тиску 100–120 МПа. Прилад для визначення межі міцності на стиск становить шарову опору 1 за допомогою якої вирівнюють зразок 2 відносно поверхонь пресу 3, які його здавлюють.

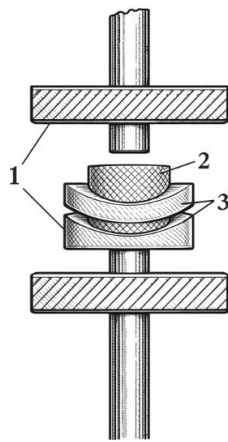


Рисунок 2.8 – Схема пристрою для випробування зразків скла на стиск

Межу міцності на стиск розраховують за формулою:

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{P}{F}, \quad (2.31)$$

де $\sigma_{\text{ст}}$ – межа міцності на стиск, МПа;

P – навантаження, при якому зразок руйнується, МПа/м²;

F – площа поперечного перерізу зразка, м².

Результати вимірювань міцності на стиск сильно відрізняються один від одного. Різниця іноді досягає 25 % і більше, через те що для дослідження необхідно взяти не менше 10 зразків одного й того ж виду скла. Результати вимірювання можна вважати задовільними, якщо відносне відхилення окремих визначень не перевищує ± 15 %. Якщо дані про міцність окремих зразків сильно знижені (більш ніж на 20 % відносно середньої міцності), їх не враховують під час розрахунку середньої межі міцності під час стискання.

2.3.2 Визначення межі міцності скла на розтяг

Межею міцності скла при розтягуванні називають таке розтягувальне зусилля, яке викликає руйнування скляного зразка. Маючи високу міцність на стиск, скло разом із цим погано працює на розтягування, і його руйнування настає за порівняно низьких розтягувальних питомих навантажень. Це обмежує у низці випадків можливість використання скла як будівельного та конструкційного матеріалу, а також негативно впливає на теплостійкість скловиробу. Для різних стекол міцність на розтяг складає від 29 МПа до 88 МПа, тобто у 15–20 разів нижче межі міцності скла на стиск.

Міцність скла на розтяг залежить від його хімічного складу. Позитивно впливає кремнезем, оксиди кальцію, бору (до 15 %) і цинку. Лужні оксиди, оксиди магнію, свинцю і алюмінію знижують міцність стекол на розтяг.

На межу міцності скла на розтяг впливає стан поверхні зразка. Мікротріщини і мікроподряпини створюють у склі розклинювальні зусилля, що полегшують руйнування зразка при розтягуванні. Покриті олією світловідбивачі скляні стрижні довгий час мають вищу міцність аніж стрижні, не захищені олійною плівкою.

Експериментально доведено, що з часом міцність скла зменшується через розклинювальну дію вологи, що адсорбується поверхнею скла з навколишнього середовища. Наприклад, явище «втоми» скла зникає, якщо механічні випробування його проводять у вакуумі.

Загартовування скла підвищує його міцність на розтяг. Це можна пояснити тим, що у загартованому зразку поверхневий шар знаходиться у стисненому стані. Стискання поверхні компенсує розклинювальну дію мікротріщини, проте вимагає додаткових зусиль на їхнє подолання при розриві. Міцність одного й того ж зразка напряду залежить від часу, протягом якого він піддається розтягуванню. Встановлено, що при одних і тих же умовах міцність тонких скляних ниток при розтягуванні підвищується приблизно утричі, якщо час навантаження скорочується з 24 годин до 0,01 с.

Під час випробування скла на розтяг використовують зразки у формі циліндричних стрижнів (рис. 2.9) довжиною близько 60 мм і діаметром близько 6 мм (не менше 10 від однієї партії). У середній частині стрижня його діаметр зменшують до 3–3,5 мм, а на кінцях збільшують для закріплення зразка під час випробувань.

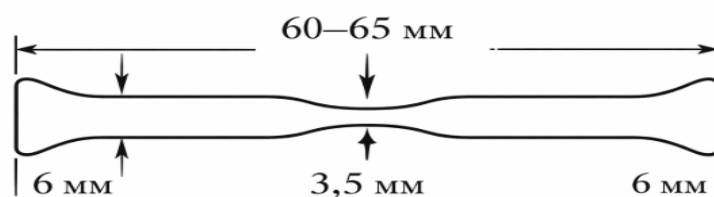


Рисунок 2.9 – Зразок для випробування скла на розтяг

Межу міцності скла на розтяг визначають зазвичай з точністю, що не перевищує 15–20 %, причому результати випробувань мають меншу різницю, якщо під час розрахунку міцності беруть до уваги лише шорстку частину поверхні розриву зразка, а дзеркальну частину розриву виключають. Тому для отримання істинного значення межі міцності скла

на розтяг руйнівне навантаження потрібно відносити не до всього перетину зразка, а до перерізу, що дійсно розривається (шорстка частина). Тоді формула для розрахунку так званої наведеної міцності скла на розтяг матиме такий вигляд:

$$R_p = \frac{P}{S - S_1}, \quad (2.32)$$

де P – навантаження, за якого зразок руйнується, МПа/м²;

S – загальна площа поперечного перерізу зразка в м²;

S_1 – площа дзеркальної частини поверхні розриву зразка м².

При кріпленні зразків скла в розривній машині необхідно їх ретельно центрувати, оскільки незначне перекошення створює напругу вигину та впливає на помилку результатів випробування.

Для визначення величини межі міцності скла під час розтягування застосовують розривні машини типу УММ-5 (рис. 2.10).

Одночасно з вимірюванням міцності на розтяг визначають зміну відстані між нижнім та верхнім затискачами. Ця зміна відстані передається на спеціальний циліндрок зі шкалою подовження, за якою відраховують подовження зразка, яке відбулося під час розтягування його до розриву. Інтервал розподілу шкали відповідає 1 мм подовження зразка. При розриві зразка шкала подовження зупиняється.



Рисунок 2.10 – Розривна машина УММ-5

2.3.3 Визначення межі міцності скла на вигин

Межею міцності на вигин $\sigma_{\text{виг}}$ називають максимальну напругу, за якої матеріал руйнується під дією зусиль, що вигинають.

Міцність скла на згин мало відрізняється від міцності скла на розтяг, оскільки ці два види міцності взаємопов'язані. Значення межі міцності на згин коливається залежно від типу скла від 25 МПа до 84 МПа. Найбільше впливає на міцність скла на згин стан його поверхні. Форма зразка, його розміри, температура під час випробування та швидкість навантаження зразка є менш суттєвими. Вплив ширини зразка на міцність на згин можна ілюструвати даними, наведеними у таблиці 2.5 для зразків 10 та 20 см.

У міру збільшення тривалості навантаження зразків межа міцності скла на згин знижується. Наприклад, вузькі пластинки полірованого скла розміром 25 мм × 3 мм, на відстані між опорами 100 мм мають межу міцності на згин при навантаженні зразків протягом 1 с – 71; 40 хв – 46; 2 год – 41; 40 год – 32 МПа.

При визначенні міцності на вигин визначають значення руйнівного згинального моменту M , Н · м, яке відносять до моменту опору зразка W , м³:

$$\sigma_{\text{виг}} = M/W . \quad (2.33)$$

Під час випробування скла на вигин застосовують зазвичай зразки довжиною 75–100 мм у вигляді циліндричних стрижнів діаметром 3–4 мм або пластинок шириною 15–20 мм, товщиною 2–3 мм. Випробовують не менше 10 зразків скла одного складу. Точність визначення межі міцності скла на згин, так само як і на розтяг, зазвичай не перевищує 15–20 %.

Таблиця 2.5 – Вплив ширини зразка на міцність скла при згині

Скло	Середня межа міцності на згин у МПа	
	ширина зразка 20 см	ширина зразка 10 см
Віконне	43,8	59,3
Потовщене	37,6	50,1
Потовщене поліроване дзеркальне	37,2	44,7
Армоване	30,7	39,9

Визначення межі міцності скла під час згинання проводять на тих же машинах, що і на розтяг, замінивши затискний пристрій відповідним пристроєм для випробування на згин.

Зразки готують у вигляді балок прямокутного або квадратного перерізу або стрижнів круглого перерізу. Довжина зразків має перевищувати відстань між опорами, що становить 60 мм. Під час випробувань на згин використовується метод навантаження зразка зосередженою силою (треточковий згин). Зразок встановлюють на опори, виконані у вигляді круглих стрижнів (рис. 2.11), та навантажують до руйнування. Визначення межі міцності при згинанні виконується за допомогою гідравлічного пресу та вимірювальної системи.

Послідовність вимірювання така сама, як і при вимірюванні міцності при стисканні. Міцність на вигин розраховують за такими формулами:

– для зразків круглого перерізу:

$$\sigma_{\text{виг}} = M/W = 8 \cdot P \cdot l / \pi \cdot d^3; \quad (2.34)$$

– для зразків прямокутного перерізу:

$$\sigma_{\text{виг}} = M/W = 3 \cdot P \cdot l / \pi \cdot b \cdot h^2, \quad (2.35)$$

де M – згинальний момент, $\text{Н} \cdot \text{м}$;
 W – момент опору, м^3 ;
 P – руйнівне навантаження, кгс ($P = \mu \cdot K$ див. формулу для $\sigma_{\text{ст}}$);
 l – відстань між опорами, м;
 b – ширина зразка, м;
 h – товщина зразка, м;
 d – діаметр зразка круглого перерізу, м.

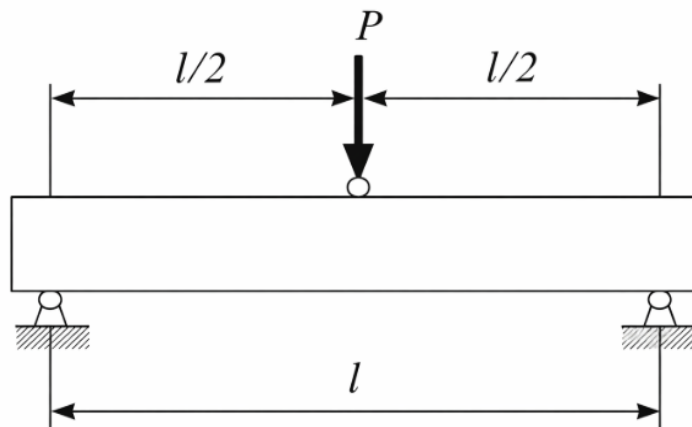


Рисунок 2.11 – Схема навантаження при триточковому згині

Для отримання середнього значення проводять щонайменше три випробування. Результати, які суттєво відхиляються від середнього значення, до уваги не приймаються.

2.3.4 Визначення межі міцності скла на удар

Опір скла удару опосередковано виражає найбільш характерну властивість скла – його крихкість – і вимірюється роботою, необхідної для руйнування одиниці об'єму скла. Величину крихкості скла іноді виражають відношенням межі міцності скла на стиск до межі його міцності при ударі.

Міцність скла на удар залежить від хімічного складу скла, товщини зразка, стану його поверхні, ступеня відпалу скла та ряду інших факторів.

Зокрема, борний ангідрид при вмісті його в склі до 15 % сильно підвищує міцність скла на удар. Оксиди алюмінію і магнію мають такий самий позитивний вплив, але в меншому ступені, ніж борний ангідрид. Інші оксиди мало впливають на крихкість скла.

Для визначення межі міцності скла на удар a_i (у Дж/см²) застосовують зразки у формі кубиків або пластинок. На зразок вільно кидають сталеву кулю. Випробування проводять до руйнування зразка, щоразу збільшуючи висоту падіння кулі. При цьому сумарна робота ударів, що спричиняє руйнування одиниці об'єму скла, дорівнює:

$$a_i = \frac{\Sigma G \cdot h}{V}, \quad (2.36)$$

де G – вага кулі, кг;

h – висота падіння кулі, см;

V – об'єм зразка, см³.

Сумарна робота ударів, що викликають руйнування 1 см³ скла, називають показником крихкості.

Межу міцності скла на удар визначають на приладах різної конструкції, які дозволяють змінювати висоту підняття вантажу, що руйнує, і забезпечують його автоматичне скидання на зразок.

Зразок скла укладають на дерев'яні рейки, оббиті гумою. Для удару використовується куля вагою 800 г. Удар наносять у центр зразка з певної висоти. Куля утримується електромагнітом або механічним пристосуванням. Висоту падіння кулі відраховують за шкалою. Під час випробування безосколкового скла (триплекс) під зразок кладуть аркуш паперу, на який збирають уламки нижнього аркуша триплексу, а потім зважують разом із папером.

Під час випробування прийнята така висота падіння кулі: для

безосколкового скла триплекс – 1 м, для скла сталініт – від 0,8 до 1,2 м (залежно від товщини скла). Визначаючи межу міцності скла на удар, за остаточний результат приймають середнє арифметичне з п'яти паралельних визначень.

2.3.5 Визначення межі міцності скла на ударний вигин

Крихкість – характерна властивість твердих стекол. Межа міцності скла на ударний вигин визначається як максимальне напруження, яке матеріал витримує під дією ударного навантаження перед руйнуванням, його виражають у Дж/см² площі поперечного перерізу зразка. Цей показник характеризує ударну в'язкість матеріалу. Всі стекла при нормальній температурі крихкі. Мірою крихкості скла є його опір удару.

Крихкість скла залежить від його форми, розмірів і товщини. Зі збільшенням товщини опір удару зростає. Він зростає також при збільшенні опору на стиск. Рівномірне загартування скла підвищує його в 5–6 разів.

Має значення також склад скла: при збільшенні вмісту В₂О₃ (до 15 %), SiO₂, Al₂O₃, ZrO₂ і MgO міцність на удар підвищується. Однак набагато більше на опір скла удару впливають дефекти поверхні й присутність у склі сторонніх включень. Чим менш однорідне скло, тим більше його крихкість.

Випробування проводяться на не менше ніж 10 зразках одного складу скла для забезпечення статистичної достовірності результатів, і точність зазвичай становить 15–20 %. Оскільки скло чутливе до швидкості навантаження, важливо проводити саме динамічні випробування, що дозволяють визначити його опір ударним (динамічним) навантаженням, а не статичним.

Таким чином, межа міцності скла на ударний вигин – це кількісна характеристика його стійкості до раптових навантажень, що визначається

експериментально.

Межа міцності скла при ударному вигині визначають на маятниковому копрі (рис. 2.12).

Копер складається з чавунної станини у вигляді масивної плити (2) з двома вертикальними колонами (3). У верхній частині колон на горизонтальній осі підвішений закріплений у шарикопідшипниках (4) маятник з вантажем у вигляді сталевого плоского диска з вирізом (5), в якому закріплений сталевий загартований ніж, що слугує бойком під час випробування (6). Внизу на рівні маятника, який висить вертикально, до колон станини прикріплені дві сталеві загартовані опори (10), на які поміщають зразок (11). Під опорами між колонами проходить гальмівний ремінь (12), який, притискаючись до маятника, що гойдається після удару, викликає його гальмування. Гальмівний ремінь приводиться в дію за допомогою педалі (1).

Перед випробуванням маятник піднімають на вихідну висоту та утримують його в цьому положенні клямкою (14). У копрі МК-ЗОО ця висота залежить від того, в якому положенні встановлена клямка підйомної рами (7) у храповику (8).

Під час випробування зразка маятник звільняється від клямки (14), падаючи, вдаряє зразок, руйнує його і злітає на деякий кут, яким визначається робота, витрачена на руйнування зразка. У копрі на осі маятника жорстко закріплений повідець (9). При прямому та зворотному русі маятника повідець захоплює за собою відповідно одну або іншу стрілку шкали (13) і залишає їх у положенні, що фіксує ніж, що слугує бойком під час випробування.

Як зразки для випробування на ударний вигин використовують скляні пластини прямокутного перетину завдовжки 120, завширшки 20 і завтовшки 2–3 мм.

Під час запису значення максимальної енергії удару маятника у

джоулях потрібно округлювати відповідно до 5; 10; 50; 100; 150 та 300 Дж.

Максимальна енергія удару маятника повинна бути такою, щоб значення роботи удару становило не менше 10 % від максимальної енергії удару маятника, що застосовується.

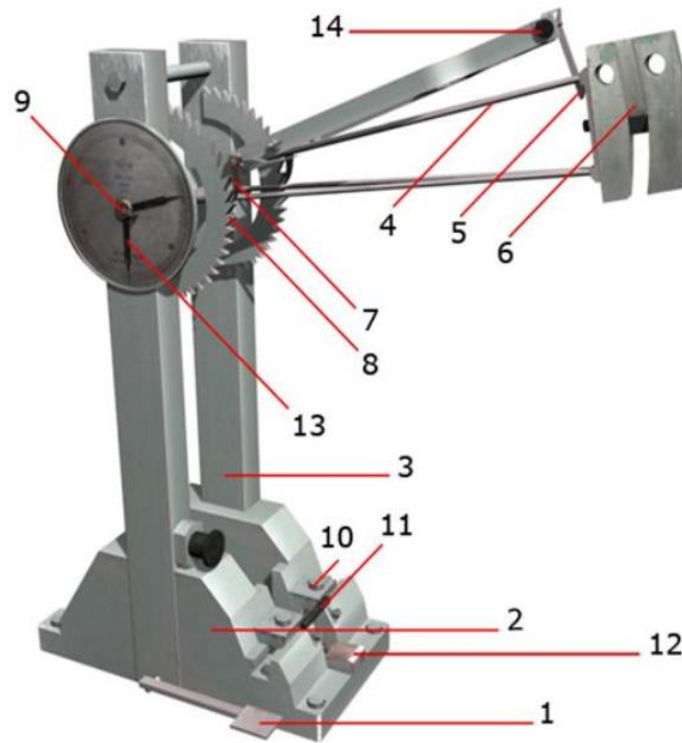


Рисунок 2.12 – Маятниковий копер МК-3ОА

Ударна в'язкість скла (межа міцності при ударному вигині) у Дж/см² визначають за формулою:

$$a_i = \frac{A}{\delta b}, \quad (2.37)$$

де A – робота, витрачена на руйнування зразка, Дж;

b – ширина зразка, см;

δ – товщина зразка, см.

Для кожного типу скла необхідно зробити не менше 10 випробувань, середнє з яких і приймають за показник ударної в'язкості скла.

Розмір ударної в'язкості залежить від міцності скла. Наприклад, для

загартованого скла вона в 5–6 раз вище, ніж у відпалених. Меншою мірою величина залежить від хімічного складу. Як усі міцнісні характеристики стекол, крихкість залежить від температури.

2.3.6 Розрахунковий метод визначення міцності скла

Межу міцності на стиск скла можна визначити розрахунковим шляхом, виходячи з його хімічного складу за правилом адитивності з достатньою для практичних цілей точністю (25–30 %):

$$F = \sum P_i \cdot f_i, \quad (2.38)$$

де P_i – вміст оксидів у склі, мас. %;

f_i – питомі коефіцієнти міцності відповідних оксидів у склі (табл. 2.6, 2.7).

Крім еталонного скла для розрахунку можуть використовуватися й інші, близькі до складу експериментального скла з відомою межею міцності на вигин.

Таблиця 2.6 – Коефіцієнти для розрахунку межі міцності скла під час стискання (за Вінкельманом – Шоттом)

Оксид	Коефіцієнт f_i
1	2
SiO ₂	1,23
B ₂ O ₃	0,9
P ₂ O ₅	0,76
Al ₂ O ₃	1,0
As ₂ O ₃	1,0
MgO	1,1
CaO	0,2

Продовження таблиці 2.6

1	2
BaO	0,62
ZnO	0,6
PbO	0,48
Na ₂ O	0,6
K ₂ O	0,05

Таблиця 2.7 – Значення коефіцієнтів міцності на згин

Оксид	Коефіцієнт при вмісті оксиду, мас. %			
	0–5	5–10	10–15	15–20
B ₂ O ₃	0,25	0,20	0,14	0,00
Al ₂ O ₃	-0,14	-0,14	-0,14	–
Fe ₂ O ₃	0,11	0,11	0,11	–
MgO	0,24	0,14	0,06	0,00
CaO	0,80	0,50	0,24	0,00
BaO	0,60	0,46	0,24	0,00
ZnO	0,40	0,20	0,00	-0,16
Na ₂ O	–	–	0,18	0,36
K ₂ O	–	–	–	0,28

Опір скла розриву визначають розрахунком за правилом адитивності з точністю близько 20–25 % за формулою:

$$R_p = P_1 R_1 + P_2 R_2 + \dots + P_x R_x, \quad (2.39)$$

де P_1, P_2, \dots, P_x – вміст оксидів у склі у мас. %;

R_1, R_2, \dots, R_x – питомі константи міцності відповідних оксидів (табл. 2.8).

Дані щодо зміни межі міцності на вигин для скла при заміщенні 1 % SiO₂ на 1 % іншого оксиду подані в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Константи для розрахунку межі міцності скла під час розтягування (за Вінкельманом – Шоттом)

Оксиди	Значення константи, R	Оксиди	Значення константи, R
SiO ₂	0,09	MgO	0,001
B ₂ O ₃	0,065	BaO	0,05
As ₂ O ₅	0,03	ZnO	0,15
P ₂ O ₅	0,075	PbO	0,025
Al ₂ O ₃	0,05	Na ₂ O	0,02

Контрольні запитання

1. Що називають міцністю матеріалу?
2. Якими факторами можуть бути спричинені внутрішні напруження у склі?
3. Який нормативний документ регламентує визначення міцності скла на вигин?
4. Як визначається межа пружності скла під час деформації?
5. У яких межах змінюється міцність скла під час стискання?
6. У яких межах змінюється міцність під час розтягування?
7. Яка міцність скла найбільша: на стиск, розтяг чи удар?
8. Чому міцність скла на розтяг значно нижча за міцність на стиск?
9. Від яких чинників залежить міцність скла?
10. Як стан поверхні зразка впливає на його міцність?

11. Як форма та розміри зразка впливають на міцність скла на вигин?
12. Яке рівняння описує залежність міцності скла на вигин від температури?
13. За якої температури спостерігається мінімальна міцність скла на вигин?
14. Як зміна температури в інтервалі від $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$ впливає на міцність скла?
15. Що таке коефіцієнт конструктивної якості (к.к.я.) і як він визначається?
16. Якими методами можна підвищити міцність скла?
17. Що впливає на межу міцності скла на стиск (хімічний склад, дефекти, розмір зразка тощо)?
18. Як визначають межу міцності скла на стиск експериментально?
19. За якою формулою розраховується межа міцності на стиск?
20. Що називають межею міцності скла на розтяг?
21. Як мікротріщини та мікроподряпини впливають на міцність скла на розтяг?
22. Як час навантаження впливає на міцність скла на розтяг?
23. Які типи зразків застосовують для випробувань скла на розтяг?
24. Яка формула використовується для розрахунку наведеної міцності скла на розтяг?
25. Що називають межею міцності на вигин і як вона співвідноситься з міцністю на розтяг?
26. Як визначають межу міцності скла на вигин для зразків круглого та прямокутного перерізу?
27. Що характеризує ударна в'язкість скла та як вона визначається?

28. Які чинники впливають на міцність скла при ударі (хімічний склад, товщина, дефекти, загартування)?

29. Як визначається межа міцності скла на ударний вигин і на якому обладнанні?

30. У чому полягає розрахунковий (адитивний) метод визначення міцності скла та яка його точність?

Тестові завдання

1. Міцність – це:

- а) теплопровідність;
- б) здатність витримувати напруги;
- в) густина;
- г) прозорість.

2. Найбільшу міцність скло має при:

- а) розтягу;
- б) стиску;
- в) ударі;
- г) вигині.

3. Міцність скла на розтяг становить приблизно:

- а) 500–1 000 МПа;
- б) 29–88 МПа;
- в) 2000 МПа;
- г) понад 3000 МПа.

4. Мінімальна міцність скла спостерігається приблизно при:

- а) $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- б) $230\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- в) 500 °С;
- г) 1 000 °С.

5. Загартування скла підвищує міцність приблизно:

- а) у 1,2 рази;
- б) у 4–5 разів;
- в) у 10 разів;
- г) не змінює.

6. Формула межі міцності на стиск:

- а) $\sigma = M/W$;
- б) $\sigma_{ст} = P/F$;
- в) $F = \rho V$;
- г) $E = \sigma/\epsilon$.

7. Міцність на вигин для скла становить приблизно:

- а) 5–10 МПа;
- б) 25–84 МПа;
- в) 300 МПа;
- г) 1 000 МПа.

8. Основний показник крихкості скла – це:

- а) густина;
- б) опір удару;
- в) електропровідність;
- г) колір.

9. Який фактор найбільше впливає на міцність на згин:

- а) товщина печі;
- б) стан поверхні скла;

- в) колір скла;
- г) освітлення?

10. Ударна в'язкість визначають на:

- а) муфельній печі;
- б) діапроекторі;
- в) маятниковому копрі;
- г) сушильній шафі.

2.4 Твердість скла

Твердість – це здатність скла чинити опір проникненню в нього іншого тіла під певним навантаженням. Вона визначає придатність скла до різних умов обробки і експлуатації (шліфування, різання, свердлення, дряпання, стирання).

Найтвердішим склом є кварцове, високоглиноземне (18–30 % Al_2O_3) та боросилікатне (до 12 % B_2O_3), найм'якішим – кришталеве. Чим твердіше скло, тим менше подряпин і пошкоджень утворюється на поверхні виробів, довше зберігається блиск і висока механічна міцність.

Твердість скла визначають різними методами: вдавлюванням і дряпанням, шліфуванням тощо.

Твердість як характеристика матеріалу у склі залежить від спільного впливу кількох чинників. Крім міцності, пружних та пластичних характеристик, які залежать від міцності зв'язків у структурі скла і, тим самим, від хімічного складу, значну роль відіграють неоднорідності і термічне минуле скла.

2.4.1 Визначення твердості скла за Віккерсом

Твердість за Віккерсом визначають згідно з ДСТУ ISO 6507-1:2007 з використанням стаціонарного твердоміру (рис. 2.13). Під час визначення

за цим методом у зразок вдавлюють алмазний наконечник, який має форму правильної чотиригранної піраміди. Навантаження P діє впродовж певного часу (10–15 с).



Рисунок 2.13 – Стационарний цифровий твердомір Мікро Віккерсу
NOVOTEST TC-MKB

Виміри необхідно проводитися на плоскій, гладкій, вільній від зайвих матеріалів та включень поверхні. Поверхня зразку повинна бути добре підготовлена – шорсткість не повинна бути більше 0,16 мкм.

Поверхня після кінцевої обробки повинна забезпечувати точне вимірювання довжини діагоналей відбитків. При підготовці поверхні зразка необхідно виключити, по можливості, зміну його твердості від нагріву або охолодження. Відбитки мікротвердості за Віккерсом мають невелику глибину, тому підготовку поверхні потрібно проводити з особливою обережністю. Рекомендується використовувати поліровку або електрополірування залежно від властивостей матеріалу. Товщина дослідного скломатеріалу або покриття повинна бути у 1,5 рази більшою середньої довжини діагоналей відбитку. Не допускається видима деформація зворотної поверхні дослідних зразків.

На опірній поверхні зразка не повинно бути помітних уражень. Зразок протягом виміру твердості не повинен прогинатися. Зразок повинен лежати на підставці так, щоб виключити його переміщення під час вимірювання.

Вимірювання твердості скломатеріалів та покриттів проводять за температури навколишнього середовища від 10 °С до 35 °С. Дослідний зразок розміщують на твердій опорі. Поверхня опори повинна бути рівною та без слідів мастила. Під час досліду приводять наконечник у контакт з поверхнею дослідного зразка та збільшують навантаження у напрямку, перпендикулярному до поверхні, доки навантаження не встановиться відповідного значення.

Час від початку прикладення навантаження до досягнення номінального значення навантаження повинно бути не менше 2 с та не більше 8 с.

Для вимірів за Віккерсом з малим навантаженням та мікротвердістю цей час не повинен перевищувати 10 с. Для вимірів за Віккерсом з малим навантаженням та мікротвердістю швидкість входження в зразок не повинна перевищувати 0,2 мм/с.

Відбитки ставлять так, щоб відстань між центром відбитку та краєм сусіднього відбитка було не менше 2,5 довжини діагоналі відбитку. Похибка при визначенні діагоналей повинна бути не більше ніж $\pm 0,001$ мм при довжині діагоналі до 0,2 мм, а більшій довжині не більше 0,5 %.

Твердість за Віккерсом (HV) визначають шляхом вдавлювання алмазної піраміди при навантаженні на неї 49 Н за 5 вимірами та розраховують за формулою:

$$HV = \frac{1854P}{a^2}, \quad (2.40)$$

де HV – твердість за Віккерсом, МПа;

a – напівдіагональ відбитку, м;

P – навантаження на індентор, Н.

2.4.2 Визначення абразивної твердості скла

Абразивна твердість, або шліфувальна (V , МПа) оцінюється по масі (або об'єму) зашліфованого скла при певному навантаженні та часу шліфування. Іноді цю твердість характеризують коефіцієнтом об'ємної шліфовки N , рівним відношенню шліфованих об'ємів дослідного матеріалу V_x , та еталонного матеріалу V_e :

$$N = V_x/V_e. \quad (2.41)$$

Для розрахунку абразивної твердості скла використовують звичайну адитивну формулу залежно від хімічного складу, використовуючи парціальні коефіцієнти v (табл. 2.9).

Якщо мікротвердість абразивного порошку в 2–3 рази більше мікротвердості скла, то справедливий такий зв'язок між абразивною твердістю V та мікротвердістю MM :

$$V = K \frac{1}{MM^2}. \quad (2.43)$$

Якщо MM та V виражені в ГПа, то для будівельного скла коефіцієнт K приблизно дорівнює 163. Твердість скла залежить від температури. Зокрема мікротвердість з підвищенням температури від -200 °С до 0 °С зменшується на 10 %; від 0 до 100 °С зменшується на 35–40% та від 100 °С до 250 °С – зменшується на 15–20 %.

$$V = \sum P_i v_i, \quad (2.42)$$

де P_i – вміст оксидів у склі, мас. %,

v_i – парціальні коефіцієнти.

Таблиця 2.9 – Парціальні адитивні коефіцієнти абразивної твердості

Оксид	v_i	Оксид	v_i
SiO ₂	100	B ₂ O ₃	61
Al ₂ O ₃	-35	ZnO	-6
CaO	-43	Na ₂ O	-37
MgO	-60	K ₂ O	-102
BaO	-7		

Контрольні запитання

1. Що таке твердість скла та які процеси вона характеризує (шліфування, різання, свердлення, дряпання, стирання)?
2. Які види скла є найтвердішими (кварцове, високоглиноземне, боросилікатне)?
3. Яке скло вважається найм'якшим і чому?
4. Від яких структурних та технологічних факторів залежить твердість скла?
5. Як хімічний склад впливає на твердість скла?
6. Яку роль відіграють неоднорідності та термічне минуле скла у формуванні твердості?
7. Які основні методи визначення твердості скла застосовують у практиці?
8. У чому полягає фізична сутність методу вдавлювання?
9. За яким нормативним документом визначають твердість скла за методом Віккерса?
10. Яку форму має індендор у методі Віккерса та з якого матеріалу він виготовлений?
11. Які вимоги висуваються до підготовки поверхні зразка перед випробуванням за Віккерсом?

12. Які вимоги до товщини зразка та розташування відбитків під час визначення мікротвердості?
13. У яких температурних межах проводять випробування твердості скла?
14. Які параметри (навантаження, час витримки) застосовують при визначенні твердості за Віккерсом?
15. За якою формулою розраховують твердість за Віккерсом (HV) та які фізичні величини до неї входять?
16. Що таке абразивна (шліфувальна) твердість скла та в яких одиницях вона виражається?
17. Як визначають коефіцієнт об'ємної шліфовки N і який його фізичний зміст?
18. У чому полягає адитивний метод розрахунку абразивної твердості скла?
19. Який зв'язок існує між абразивною твердістю (V) та мікротвердістю (ММ)?
20. Як змінюється мікротвердість скла з підвищенням температури в діапазонах від $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $250\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Тестові завдання

1. Твердість скла – це:
 - а) здатність до плавлення;
 - б) здатність чинити опір проникненню іншого тіла;
 - в) здатність до деформації;
 - г) густина матеріалу.

2. Найтвердішим є:
 - а) кришталеве скло;
 - б) натрій-кальцієве;

- в) кварцове скло;
- г) оптичне.

3. Метод Віккерса використовує:

- а) сталеву кульку;
- б) конус;
- в) алмазну чотиригранну піраміду;
- г) голку.

4. Допустима шорсткість поверхні зразка становить:

- а) 1 мкм;
- б) 0,5 мкм;
- в) 0,16 мкм;
- г) 2 мкм.

5. Час прикладання навантаження у методі Віккерса:

- а) 1–2 с;
- б) 10–15 с;
- в) 30–40 с;
- г) 60 с.

6. Температура вимірювання твердості:

- а) 0–10 °С;
- б) 10–35 °С;
- в) 50–100 °С;
- г) понад 200 °С.

7. Абразивна твердість визначається за:

- а) довжиною тріщини;

- б) масою або об'ємом зашліфованого скла;
- в) густиною;
- г) теплопровідністю.

8. Формула коефіцієнта об'ємної шліфовки:

- а) $N = P/a$;
- б) $N = V_x/V_e$;
- в) $N = HV^2$;
- г) $N = v/P$.

9. При підвищенні температури мікротвердість скла:

- а) зростає;
- б) не змінюється;
- в) зменшується;
- г) різко збільшується.

10. При навантаженні 49 Н визначають:

- а) густину;
- б) міцність на стиск;
- в) твердість за Віккерсом (HV) ;
- г) теплопровідність.

2.5 Мікротвердість скла

Мікротвердість (англ. *microhardness*) – твердість окремих ділянок мікроструктури матеріалу.

Мікротвердість скломатеріалів та покриттів визначається за допомогою алмазних наконечників. Цим методом визначають твердість окремих фаз і структурних складових, твердість у середині окремих зерен, тонкого поверхневого шару. При визначенні мікротвердості в дослідному

зразку під дією навантаження P вдавлюють алмазний наконечник, який має форму піраміди з квадратним перерізом та кутом при вершині 136° .

2.5.1 Визначення мікротвердості скла

Найпоширенішим методом оцінки мікротвердості скла при вдавлюванні є метод Віккерса: на приладі ПМТ-3 (рис. 2.14) вдавлюють діамантову чотиригранну піраміду з кутом між протилежними гранями, рівними 136° . Оцінюють твердість за навантаженням, віднесеним до квадрата діагоналі відбитка піраміди на склі, і називають її мікротвердістю (MM , МПа).



Рисунок 2.14 – Прилад ПМТ-3

Прилад ПМТ-3 складається зі штатива, предметного столика, гвинтового окулярного мікрометра, що навантажує механізм, освітлювача й об'єктивів.

Для визначення мікротвердості алмазними наконечниками в процесі випробувань прилад повинен забезпечувати такі вимоги:

– плавне входження алмазного наконечника в дослідний матеріал під дією прикладеного до нього навантаження F ;

– збереження постійної дії прикладеного до алмазного наконечника навантаження впродовж певного часу.

Допустимі похибки навантаження не повинні перевищувати:

– для навантаження 0,1 Н і менше – 2 % від номінального значення;

– для навантаження більше 0,1 Н – 1 % від номінального значення.

Прилад повинен бути захищено від дії можливих вібрацій, що передають крізь стіни, підлогу або через стіл, на якому встановлено прилад.

Прилад має бути оснащений мікроскопом для визначення відбитків. Калібрувальний коефіцієнт мікроскопа необхідно встановити так, щоб похибка не перевищувала $\pm 0,5$ % визначеного значення.

Мінімальне збільшення мікроскопу:

– $200\times$ – для відбитків більше 25 мкм;

– $300\times$ – для відбитків від 76 мкм до 125 мкм;

– $400\times$ – для відбитків менше 76 мкм.

Поверхня дослідного виробу (зразка) повинна бути вільною від забруднень на місці нанесення відбитку. Шорсткість дослідної поверхні виробу (зразку) не повинна бути грубіше $Ra = 0,32$ мкм.

При підготовці поверхні дослідного виробу (зразку) необхідно дотримуватися засобів обережності, враховуючи можливу зміну твердості дослідної поверхні внаслідок нагріву чи наклепу при механічній обробці.

Дослідний виріб (зразок) повинен бути встановлено на предметному столику приладу так, щоб у процесі випробування він не зміщувався, не прогинався і не повертався.

Поверхня виробу (зразку), встановлюють перпендикулярно до осі алмазного наконечника.

Робоча поверхня алмазного наконечника та поверхня дослідного виробу повинні бути сухими (без змазки).

Під час випробування матеріалу, виробу (зразку) на мікротвердість вдавлюванням використовують навантаження 0,049 (0,005); 0,0981 (0,01); 0,1962 (0,02); 0,4905 (0,05); 0,981 (0,1); 1,962 (0,2) або 0,0491 (0,005); 0,0981 (0,01); 0,1962 (0,02); 0,4905 (0,05); 0,981 (0,1); 1,962 (0,2); 4,905 (0,5) Н.

Для одержання найбільш точного результату виміру мікротвердості навантаження F повинна бути як можливо найбільшою.

Під час вимірювання мікротвердості покриттів з однорідного матеріалу (гальванічних, дифузійних, цементних та ін.) на металі або на інших матеріалах навантаження F повинна бути тим менше, ніж тонший шар покриття. Якщо товщина дослідного шару невідома, то рекомендується провести декілька вимірів при різних навантаженнях: 0,098; 0,196; 0,490; 0,981 Н і т. д.

Навантаження повинно здійснюватися плавно, без товчків. Тривалість витримки – не менше 3 с.

Вимірювання розмірів відбитків виконується на мікроскопі у світлому полі з похибкою відліку $\pm 0,5$ від найменшого ділення шкали при об'єктиві збільшення 30–40 (числова апертура $A = 0,65$).

Випробування проводять за температури навколишнього середовища $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

На поверхні зразка зі скломатеріалу або покриття в результаті цього утворюються квадратні мікровідбитки, розмір яких залежить від величини навантаження й твердості зразка. Довжину діагоналі мікровідбитка вимірюють за допомогою мікроскопа, що має окулярний мікрометр. Довжина такої діагоналі для скломатеріалів та покриттів не повинна перевищувати 10 мкм, тому що при відбитках більших розмірів можуть з'явитися сліди крихкого руйнування, що ускладнюють виміри.

За значення мікротвердості приймають середнє арифметичне

результатів окремих вимірів. Відносна похибка округлення числа мікротвердості не повинна перевищувати 2 % від визначеного значення мікротвердості.

Мікроміцність (*ММ*) оцінюють як максимальне навантаження, що викликає утворення радіальної тріщини і розраховують за формулою:

$$MM = [4,8P(1 + 2\mu)]/(4d^2 + l^2), \quad (2.44)$$

де P – навантаження на індентор, Н;

d – діагональ відбитку, мкм;

l – довжина тріщини з урахуванням діагоналі, мкм;

μ – коефіцієнт Пуасона, який для стекол складає від 0,21 до 0,24.

Мікротвердість будівельного скла залежно від хімічного складу та навантаження (30, 50 або 100 г) складає 4,0–7,5 ГПа.

2.5.2 Розрахунковий метод визначення мікроміцності скла

Адитивний метод розрахунку мікротвердості запропонували Хаймзет та Вейніг, провівши дослідження на склоемалях при навантаженні 100 г за формулою:

$$M = \sum P_i \cdot m_i, \quad (2.45)$$

де m_i – парціальні адитивні коефіцієнти;

P_i – вміст оксидів у склі, мас. %.

У таблиці 2.10 наведені парціальні адитивні коефіцієнти m_i , розраховані Хаймзетом і Вейнігомт, перераховані для листового скла при навантаженні в 50 г.

Таблиця 2.10 – Парціальні адитивні коефіцієнти мікротвердості

Оксиди	m_i (МПа)	Оксиди	m_i (МПа)
SiO ₂	69,09	CaO	5,15
TiO ₂	53,64	BaO	5,86
B ₂ O ₃	15,76	ZnO	50,26
Al ₂ O ₃	39,69	Na ₂ O	15,15
MgO	7,16	K ₂ O	24,54

Мікротвердість пов'язана з модулем пружності E та коефіцієнтом Пуассона μ таким рівнянням:

$$\frac{MM}{E} = \frac{1-2\mu}{6(1+\mu)}. \quad (2.46)$$

Контрольні запитання

1. Що таке мікротвердість і чим вона відрізняється від звичайної твердості?
2. Які структурні елементи матеріалу можна досліджувати методом мікротвердості?
3. Який тип індентора використовують для визначення мікротвердості скла?
4. Яку форму має алмазний наконечник у методі Віккерса?
5. Який кут між протилежними гранями піраміди в методі Віккерса?
6. Який прилад застосовують для визначення мікротвердості скла?
7. З яких основних вузлів складається прилад для вимірювання мікротвердості (типу ПМТ-3)?
8. Які вимоги висуваються до плавності прикладання навантаження під час випробування?

9. Які допустимі похибки навантаження при значеннях до 0,1 Н і понад 0,1 Н?
10. Які вимоги до захисту приладу від вібрацій?
11. Які вимоги до мікроскопа та його калібрування під час вимірювання діагоналей відбитків?
12. Яка мінімальна кратність збільшення мікроскопа залежно від розміру відбитка?
13. Якою має бути шорсткість поверхні зразка перед випробуванням?
14. Які вимоги до встановлення зразка на предметному столику приладу?
15. У яких температурних умовах проводять випробування на мікротвердість?
16. Від чого залежить розмір мікровідбитка на поверхні скла?
17. Чому довжина діагоналі мікровідбитка для скла не повинна перевищувати 10 мкм?
18. Як визначають остаточне значення мікротвердості за результатами вимірювань?
19. За якою формулою розраховується мікроміцність (ММ) та які параметри до неї входять?
20. У чому полягає адитивний метод розрахунку мікротвердості та як пов'язана мікротвердість з модулем пружності E і коефіцієнтом Пуассона μ ?

Тестові завдання

1. Мікротвердість – це:
- а) густина матеріалу;
 - б) твердість мікроділянок структури;
 - в) теплопровідність;
 - г) пластичність.

2. Метод визначення мікротвердості скла:

- а) Брінелля;
- б) Шора;
- в) Віккерса;
- г) Роквелла.

3. Форма індентора при методі Віккерса:

- а) куля;
- б) конус;
- в) піраміда;
- г) циліндр.

4. Допустима похибка навантаження понад 0,1 Н:

- а) 5 %;
- б) 3 %;
- в) 1 %;
- г) 10 %.

5. Мінімальне збільшення мікроскопа для відбитків понад 25 мкм:

- а) 100×;
- б) 200×;
- в) 400×;
- г) 50×.

6. Поверхня зразка перед випробуванням має бути:

- а) змащеною;
- б) мокрою;
- в) сухою і чистою;
- г) нагрітою.

7. Чим тонше покриття, тим навантаження має бути:
- а) більшим;
 - б) меншим;
 - в) незмінним;
 - г) випадковим?
8. Максимальна довжина діагоналі відбитку для скла:
- а) 50 мкм;
 - б) 25 мкм;
 - в) 10 мкм;
 - г) 100 мкм.
9. Коефіцієнт Пуассона для скла становить приблизно:
- а) 0,01–0,05;
 - б) 0,21–0,24;
 - в) 0,5–0,7;
 - г) 1,0.
10. Адитивний метод розрахунку мікротвердості запропонували:
- а) Віккерс і Роквелл;
 - б) Хаймзет та Вейніг;
 - в) Ньютон і Паскаль;
 - г) Максвелл і Планк.

2.6 Тріщиностійкість скла

Тріщиностійкість – властивість матеріалу до опору при розвитку тріщини (або руйнуванні) при однократному, циклічному та уповільненому руйнуванні.

Скло – це лінійно пружний крихкий матеріал з переважним впливом

поверхневих дефектів на міцність тримальних склоелементів. Ці дефекти, що утворюються під час виробництва скла та поводженні з ним в експлуатаційних умовах, формують специфічний тріщинуватий поверхневий шар. Схема скла з поверхневим тріщинуватим шаром подана на рисунку 2.15.

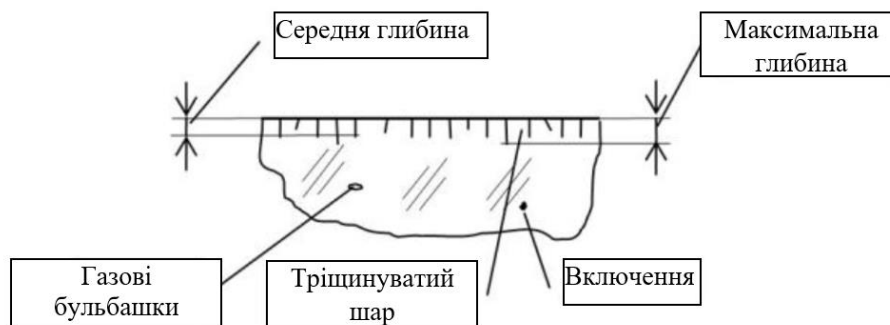


Рисунок 2.15 – Мікротріщини тріщинуватого поверхнього шару та внутрішні дефекти у склі

При термічному та механічному навантаженні мікротріщини, розташовані в поверхньому шарі, є більш впливовими, ніж внутрішні технологічні дефекти типу газових бульбашок або включень, а також дефекти мікро- і наноструктури скла.

Фактичний статистичний розподіл мікротріщин з різною формою та глибиною на поверхні скляного елемента є важливою характеристикою якості скла, безпосередньо пов'язаною з його конструкційною міцністю. Середня критична глибина мікротріщин, що виявляються у фокусі руйнування склоелементів при розтягуванні та згинанні, становить для звичайного флоат-скла близько 30 мкм. У цьому випадку середнє значення межі міцності близько 60 МПа є типовим при короткочасному випробуванні.

Максимальна глибина поверхневих мікротріщин близько 100 мкм.

Тому нижня межа результатів оцінки межі міцності за цих умов близька до 30–35 МПа.

Поверхнева дефектність скляних конструкцій значно зростає в експлуатаційних умовах. Довгі подряпини та мікротріщини, абразивні ушкодження, відколи кромки, а також багато інших видів ушкоджень можуть знизити міцність скляних конструкцій. Тому технічна міцність скла у реальній практиці може бути навіть меншою, ніж мінімальні дані за результатами випробувань, отриманих на стандартних зразках у лабораторних умовах, якщо технологія виробництва та методи поводження зі склом здійснюються без контролю його поверхневої дефектності та міцності. У механіці руйнування до основних характеристик тріщиностійкості відносять: критичне значення коефіцієнта інтенсивності напруг K_{Ic} .

2.6.1 Визначення тріщиностійкості скла

Методика визначення K_{Ic} методом індентування по Віккерсу передбачає отримання поверхні матеріалу вдавлюванням алмазного індентора слідів і вимірювання їхніх розмірів, якими потім розраховується опір руйнації. Цей метод використовується для оцінки тріщиностійкості матеріалів, включаючи скло, оскільки він дозволяє отримати значення коефіцієнта інтенсивності напруги, за якого починається швидке поширення тріщини.

На поліровану поверхню зразка скла встановлюють алмазний індентор (зазвичай квадратний або ромбоподібний). Індентор вдавлюється у поверхню з певним навантаженням, створюючи мікротріщини. Після зняття навантаження вимірюється розмір сліду і довжина променів (або їхніх проєкцій на поверхню) і тріщин, що утворюються на поверхні.

K_{Ic} визначають шляхом вдавлювання піраміди Віккерса при навантаженні на піраміду 49 Н за 5 вимірами на ПМТ-3 (рис. 2.14) та

розраховують за напівемпіричною залежністю Нііхари:

$$K_{1c} = \frac{0,094P}{c^{3/2}}, \quad (2.47)$$

де K_{1c} – критичне значення коефіцієнта інтенсивності напруг, МПа · м^{1/2};

c – довжина радіальної тріщини від середини відбитку, мкм;

P – навантаження на індентор, Н.

Контрольні запитання

1. Що таке тріщиностійкість матеріалу?
2. У чому полягає фізичний зміст тріщиностійкості для крихких матеріалів?
3. Яким матеріалом є скло з погляду механіки руйнування?
4. Які види руйнування враховують при оцінці тріщиностійкості (однократне, циклічне, уповільнене)?
5. Які дефекти найбільше впливають на міцність тримальних склоелементів?
6. Чому поверхневі мікротріщини є більш небезпечними, ніж внутрішні дефекти?
7. Які внутрішні технологічні дефекти можуть виникати у склі?
8. Що таке тріщинуватий поверхневий шар скла?
9. Яка середня критична глибина мікротріщин для звичайного флоат-скла?
10. Яке типове середнє значення межі міцності флоат-скла при короткочасному випробуванні?
11. Яка максимальна глибина поверхневих мікротріщин може спостерігатися?
12. Чому нижня межа міцності скла може становити 30–35 МПа?

13. Як експлуатаційні пошкодження (подряпини, відколи, абразивні ушкодження) впливають на технічну міцність скла?
14. Чому фактична міцність скла в експлуатації може бути нижчою за лабораторні значення?
15. Яка основна характеристика тріщиностійкості в механіці руйнування?
16. Що характеризує критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Ic} ?
17. Яким методом визначають K_{Ic} для скла?
18. У чому полягає сутність методу індентування за Віккерсом для визначення тріщиностійкості?
19. Які параметри вимірюють після вдавлювання індентора для розрахунку K_{Ic} ?
20. За якою залежністю (напівемпіричною формулою Нііхари) розраховують K_{Ic} та які величини входять до цієї формули?

Тестові завдання

1. Тріщиностійкість – це:
- а) твердість матеріалу;
 - б) опір розвитку тріщин;
 - в) щільність матеріалу;
 - г) теплопровідність.
2. Скло відноситься до:
- а) пластичних матеріалів;
 - б) лінійно пружних крихких матеріалів;
 - в) в'язких металів;
 - г) композитів.

3. Найбільший вплив на міцність скла мають:

- а) газові бульбашки;
- б) внутрішні включення;
- в) поверхневі мікротріщини;
- г) колір скла.

4. Середня критична глибина мікротріщин у флоат-склі становить:

- а) 5 мкм;
- б) 15 мкм;
- в) 30 мкм;
- г) 200 мкм;

5. Типове значення межі міцності скла:

- а) 10 МПа;
- б) 60 МПа;
- в) 150 МПа;
- г) 300 МПа.

6. Основний параметр тріщиностійкості:

- а) модуль Юнга;
- б) густина;
- в) K_{Ic} ;
- г) коефіцієнт теплового розширення.

7. Метод Віккерса базується на:

- а) нагріванні зразка;
- б) вдавлюванні алмазного індентора;
- в) розтягуванні ниткою;
- г) хімічному травленні.

8. Після індентування вимірюють:

- а) температуру;
- б) масу зразка;
- в) довжину тріщини і відбиток;
- г) колір поверхні.

9. Експлуатаційні пошкодження скла призводять до:

- а) збільшення міцності;
- б) зниження міцності;
- в) зміни кольору;
- г) збільшення прозорості.

10. Навантаження на піраміду Віккерса при визначенні K1с:

- а) 5 Н;
- б) 10 Н;
- в) 49 Н;
- г) 100 Н.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

До розділу 1

1. Дідук І. І. Вплив модифікування оксидами титану, цирконію та бору розплавів гірських порід на їх технологічні характеристики та властивості отриманих волокон : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 – матеріалознавство / І. І. Дідук ; Ін-т проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. – Київ, 2020. – 286 с.
2. Shelby J. E. Introduction to glass science and technology. – 3rd ed. – Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2020. – 358 p.
3. Varshneya A. K. Fundamentals of inorganic glasses / A. K. Varshneya, J. C. Mauro. – 3rd ed. – Amsterdam : Elsevier, 2019. – 738 p.
4. ASTM C336-21. Standard test method for annealing point and strain point of glass by fiber elongation. – West Conshohocken : ASTM International, 2021.
5. Племянніков М. М. Фізична хімія тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів : підручник для студ. спец. 161 «Хімічні технології та інженерія» / М. М. Племянніков, Н. В. Жданюк. – Київ : Освіта України, 2022. – 152 с.
6. Яцишин Й. М. Технологія скла : у 3 ч. – Ч. I : Фізика і хімія скла : підручник / Й. М. Яцишин. – Львів : Бескид Біт, 2008. – 204 с.
7. Яцишин Й. М. Технологія скла : у 3 ч. – Ч. II : Основи технології скляної маси : навч. підручник / Й. М. Яцишин, Т. Б. Жеплинський, С. І. Дяківський. – Львів : Бескид Біт, 2004. – 250 с.
8. Технологія скла : у 3 ч. – Ч. III : Технологія скляних виробів : підручник / Й. М. Яцишин, Я. І. Вахула, Т. Б. Жеплинський, О. І. Козій. – Львів : Растр-7, 2011. – 416 с.
9. Вахула Я. І. Сучасні тенденції застосування листового скла : навч. посіб. / Я. І. Вахула. – Львів : Растр-7, 2024. – 106 с.

10. Лосик М. В. Технологічні та фізико-хімічні властивості скла : навч. посіб. / М. В. Лосик, О. М. Звір. – Львів : ЛНАМ, 2018. – 40 с.

11. Нові склоподібні матеріали і методи їх синтезу. Склоподібні матеріали і виробу. Функціональні матеріали [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра спец. 161 «Хімічні технології та інженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. М. М. Племянніков, Н. В. Жданюк. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 100 с.

12. Силікатне матеріалознавство [Електрон. ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня д-ра філософії спец. 161 «Хімічні технології та інженерія» / М. М. Племянніков, В. Ю. Тобілко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл : 20,5 Мб). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 103 с.

13. Магорівська Г. Я. Технологічні та експлуатаційні властивості скла. Методи визначення та розрахунку : навч. посіб. / Г. Я. Магорівська – Львів : Сполом, 2023. – 180 с.

До розділу 2

1. Племянніков М. М. Фізична хімія тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів : підручник для студ. спец. 161 «Хімічні технології та інженерія» / М. М. Племянніков, Н. В. Жданюк. – Київ : Освіта України, 2022. – 152 с.

2. Quinn G. D. Fractography of glasses and ceramics / G. D. Quinn. – Washington : National Institute of Standards and Technology, 2020. – 363 p.

3. Дворкін Л. Й. Теоретичні основи будівельного матеріалознавства : навч. посіб. / Л. Й. Дворкін. – Рівне : НУВГП, 2022. – 799 с.

4. Shelby J. E. Introduction to glass science and technology / J. E. Shelby. – 3rd ed. – Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2020. – 358 p.

5. Springer handbook of glass / ed. J. D. Musgraves, J. Hu, L. Calvez. – Cham : Springer, 2019. – 1800 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-93728-1.
6. Лосик М. В. Технологічні та фізико-хімічні властивості скла : навч. посіб. / М. В. Лосик, О. М. Звір. – Львів : ЛНАМ, 2018. – 40 с.
7. Інноваційні технології у виробництві спеціального та побутового скла [Електрон. ресурс] : підручник для студ. спец. 161 «Хімічні технології та інженерія» / М. М. Племянніков, А. П. Яценко, І. В. Пилипенко, Б. Ю. Корнілович ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл : 5,94 Мб). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 298 с.
8. Engineering glass structures / J. Belis, J. Kuntsche, C. Louter [et al.]. – Cham : Springer, 2026. – XXXIX, 362 p. – DOI: 10.1007/978-3-032-03233-1.
9. Advanced glasses and glass-ceramics / ed. G. Shakhgildyan, M. I. Ojovan. – Basel : MDPI, 2024. – 168 p. – DOI: 10.3390/books978-3-7258-0527-3.
10. Дідук І. І. Вплив модифікування оксидами титану, цирконію та бору розплавів гірських порід на їх технологічні характеристики та властивості отриманих волокон : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 – матеріалознавство / І. І. Дідук ; Ін-т проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. – Київ, 2020. – 286 с.
11. Магорівська Г. Я. Технологічні та експлуатаційні властивості скла. Методи визначення та розрахунку : навч. посіб. / Г. Я. Магорівська. – Львів : Сполом, 2023. – 180 с.

Електронне навчальне видання

**О. В. САВВОВА
О. В. БАБІЧ
Ю. О. СМІРНОВА
Т. В. ФАЛЬКО**

**ПРАКТИКУМ ПО ТЕХНОЛОГІЇ СКЛОМАТЕРІАЛІВ.
Ч. 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Відповідальний за випуск О. В. Саввова

Редактор О. В. Михаленко

Комп'ютерне верстання О. В. Бабіч, І. В. Волосожарова

Підп. до друку 18.05.2026. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 8,8.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Черноглазівська, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 8386 від 14.07.2025.