



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИШНПТ
К.К. Манабаев

_____ « ____ » _____ 2021 г.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
СТЕКЛА**

Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной работы по курсу **«Общая технология силикатов»** для студентов направления подготовки **бакалавров 18.03.01 Химическая технология**

Томск 2021

УДК 666.1.01 (031)

Определение технических свойств стекла

Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной работы по курсу «**Общая технология силикатов**» для студентов направления подготовки **бакалавров 18.03.01 Химическая технология**

Томск: Изд. ТПУ, 2021.- 12 с.

Составители: д.т.н., профессор **Казьмина О.В.**
к.т.н., ст. преподаватель **Сударев Е.А.**

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром НОЦ Н.М Кижнера
«__» _____ 2021 г.

Руководитель НОЦ Н.М. Кижнера
д.х.н, профессор _____ Е.А. Краснокутская

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент ТПУ
И.Б. Ревва

1. Общие сведения

Благодаря высоким химическим, оптическим, физико-механическим и эстетическим свойствам стекло в виде разнообразных изделий получило широкое распространение в технике, строительстве, ряде отраслей промышленности, а также в быту. Ценнейшие свойства стекла были подмечены и оценены еще М.В. Ломоносовым в его знаменитой оде, посвященной стеклу.

Изучение свойств стекла показало, что между его химическим составом и физико-механическим свойством существует определенная закономерность, выражающаяся правилом аддитивности.

В данном лабораторном курсе излагаются методики по определению только тех свойств стекла, которые являются основными характеристиками не только стекла, как материала, но и стеклянных изделий. К ним относятся в частности определение *пределов прочности при сжатии, растяжении и изгибе, сопротивления стекла удару, термостойкости*.

Прочность характеризует способность материалов сопротивляться разрушению при воздействии внешних нагрузок. Мерой прочности служит предельное напряжение, вызывающее разрушение образца под действием нагрузки.

Теоретическую прочность материалов рассчитывают исходя из энергии химических связей в веществе. Согласно расчетам, $\sigma_{теор}$ при *растяжении* стекла составляет от **5000 до 18 000 МПа**.

Прочность реальных изделий называют *технической прочностью*. Предел прочности стекла при *сжатии* составляет от **500 до 2500 МПа**. Предел прочности стекол при растяжении в **10–15** раз ниже и составляет от **25 до 120 МПа**. Чаще всего на изделия из листового стекла действует изгибающая нагрузка. При этом на верхней поверхности листа стекла возникают напряжения сжатия, а на нижней – растягивающие усилия, поэтому прочность стекла при *изгибе* составляет **25–120 МПа**.

Сравнение технической прочности с теоретической показывает, что теоретическая прочность существенно превышает техническую. Согласно теории Гриффитса, причиной резкого снижения технической прочности по сравнению с теоретической является наличие в поверхностном слое микротрещин.

Факторы, оказывающие влияние на показатели предела прочности:

- степень дефектности поверхностного слоя, которая возрастает при длительном хранении стеклоизделий;
- масштабный фактор: зависимость прочности от размеров образцов (прочность стекловолокна на порядок выше прочности стеклянного стержня);
- состав стекол: прочность стекла увеличивают оксиды SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , MgO , TiO_2 , а снижают оксиды Na_2O , K_2O , PbO ;

- длительность нагружения – под длительным воздействием нагрузки прочность стекла снижается в три раза и может произойти усталостное разрушение;
- состав окружающей среды (влажная атмосфера) облегчает образование и развитие микротрещин;
- наличие в стекле инородных включений (камней, свилей, пузырей);
- качество отжига.

Повышение степени дефектности поверхностного слоя стекла, наличие инородных включений, низкое качество отжига снижают предел прочности стеклоизделий.

Известные способы упрочнения стекла можно разделить на две группы:

1. устранение дефектов и повышение качества поверхности (травление);
2. создание напряжений сжатия в поверхностных слоях (закалка, ионный обмен).

Сопротивление стекла удару (прочность стекла при ударе) характеризуется работой, вызывающей разрушение 1 см^3 стекла. Эту величину называют также показателем хрупкости. Прочность стекла при ударе *зависит от химического состава стекла, степени отжига, состояния поверхности, толщины образца.*

Введение в состав стекла *оксида бора* до **12 мас. %** повышает прочность стекла при ударе почти в два раза. Оксиды SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 уменьшают хрупкость почти на **5–20 %**. Остальные оксиды мало влияют на этот показатель.

Термостойкость характеризует свойства материалов выдерживать многократные перепады температур без разрушения. При резком охлаждении или нагревании в стекле возникают термоупругие напряжения. Механизм возникновения напряжений и их распределение в объеме материала можно рассмотреть на примере пластины стекла, нагретой до **100 °C** и резко охлажденной до **0 °C** путем погружения в ванну с водой. Скорость теплопередачи в поверхностном слое велика, вследствие чего температура поверхности изменяется от **100** до **0 °C** практически мгновенно. Сжатие поверхностного слоя ΔL должно составить

$$\Delta L = \alpha \cdot (t_1 - t_2),$$

где t_1 – температура исходного состояния;

t_2 – конечная температура.

Сжатию поверхностного слоя препятствуют внутренние слои стекла температура которых продолжает значительно превышать t_2 . Внутренние слои, находясь по отношению к поверхностному слою в растянутом состоянии, вызывают возникновение растягивающих поверхностных напряжений. По сечению образца устанавливается некоторый градиент температур и соответственно градиент напряжений. Возникающие в

процессе охлаждения растягивающие напряжения, действующие на поверхностный слой, могут превышать реальный предел прочности изделия, что вызовет разрушение образца.

Если образец подвергается термоудару путем резкого нагревания, то схема возникновения напряжений будет подобна описанной, однако знаки напряжений будут обратными, т. е. в поверхностном слое будут возникать напряжения сжатия. Поскольку изделия из стекла обладают более высокой прочностью на сжатие, то термостойкость изделий из стекла к резкому нагреву оказывается более высокой, чем к резкому охлаждению. Способность стекла выдерживать резкие перепады температур без разрушения используется в промышленной технологии закаленных стекол. Лист стекла помещают в горячую печь при $700\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ и после выдержки 1 мин подвергают резкому охлаждению в потоке воздуха.

Коэффициент термостойкости материала может быть рассчитан по формуле Винкельмана–Шота

$$K = S (\sigma_{\text{раст}} / \alpha \cdot E) \sqrt{\lambda / Cd},$$

где S – константа, учитывающая форму и размеры изделий;

E – модуль упругости;

$\sqrt{\lambda / Cd}$ – коэффициент температуропроводности.

Термостойкость тем выше, чем выше предел прочности и коэффициент температуропроводности и чем ниже модуль упругости и коэффициент термического расширения: ниже модуль упругости – ниже коэффициент термического расширения, выше коэффициент температуропроводности. Высокая температуропроводность обеспечивает более быстрое выравнивание температуры по сечению образца.

В ряду силикатных стекол наиболее высокой термостойкостью, порядка $1000\text{ }^\circ\text{C}$, обладает *кварцевое стекло*, для которого характерно то оптимальное сочетание параметров, определяющих коэффициент термостойкости, а именно: наиболее низкое в ряду силикатных стекол значение α_t , наиболее высокий коэффициент температуропроводности.

Термостойкость находится в сложной зависимости от свойств материала, поэтому невозможно проследить влияние одного или нескольких компонентов стекла на коэффициент термостойкости.

В зависимости от значения K стекла делятся на *три группы*:

1 – *не термостойкие* (K до $100\text{ }^\circ\text{C}$);

2 – *термостойкие* (K до $160\text{ }^\circ\text{C}$);

3 – *высокотермостойкие* (K до $220\text{ }^\circ\text{C}$).

Кварцевое стекло, малощелочные высокоглиноземистые боросиликатные стекла типа пирекс являются не только термостойкими, но и жаропрочными. Термостойкость изделия в большой степени зависит от его толщины. Ориентировочно эту зависимость можно представить в виде соотношения:

$$\Delta t = K/\sqrt{L},$$

где L – толщина стенки изделия.

Термостойкость тонкостенных изделий при прочих равных условиях должна быть более высокой.

Измеренная каким-либо методом термостойкость может служить лишь для сравнительной оценки свойств различных классов стекол. Истинная термостойкость конкретного изделия из стекла данного сорта будет зависеть от условий охлаждения или нагревания, а также от размеров образца, прежде всего его толщины. Приближенно можно считать, что для цилиндрических образцов с толщиной стенок менее 1 мм термостойкость может быть найдена по формуле:

$$\Delta t \cdot \alpha = 1000 \cdot 10^{-6}$$

где Δt – разность температур, вызывающая разрушение стеклянных образцов, $^{\circ}\text{C}$;

α – коэффициент линейного теплового расширения стекла, град^{-1} .

Для образцов с большей толщиной стенок d термостойкость будет меньше в \sqrt{d} раз. Так при $\alpha_{\text{см}} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$ термостойкость тонкостенного изделия составит 200°C , а толстостенного всего 100°C (если $d = 4 \text{ мм}$).

Лабораторная работа №1. Определение предела прочности при сжатии и изгибе

Цель работы: определение предела прочности стекла при сжатии и изгибе.

Пределом прочности при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ называют напряжение, при достижении которого материал разрушается под действием сжимающих усилий. При определении прочности используют не менее трех образцов в вид стеклянных кубиков с ребром $4\text{--}5 \text{ мм}$ или цилиндров, диаметр и высота которых равны 5 мм . Поверхности образцов должны быть плоскопараллельными. Перед испытаниями необходимо измерить размеры образцов.

Установка для определения прочности включает гидравлический пресс и измерительную систему.

Образец помещают в центре плиты пресса и закрывают рабочую зону защитной крышкой. «Закрывают» клапан и нажимают кнопку «Пуск».

При разрушении образца на табло измерительной системы высвечивается максимальное значение нагрузки μ , мВ. Нажимают на кнопку «Стоп», сбрасывают нагрузку, открывают клапан.

Предел прочности при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ вычисляют по формуле:

$$\sigma_{сж} = P / S ,$$

где P - разрушающая нагрузка, кгс $P = \mu \cdot K$;

μ – показания датчика, мВ;

K – коэффициент, $K = 38,2$ кгс/мВ;

S – площадь поперечного сечения образца, см².

Предел прочности при сжатии материала определяется как среднее арифметическое результатов определения $\sigma_{сж}$ всех образцов.

Результаты измерений и расчетов заносят в табл.1.

Таблица 1

Результаты определения предела прочности при сжатии

№ образца	Размер образца, см	Площадь поперечного сечения, см ²	Разрушающая нагрузка P, кгс	$\sigma_{сж}$, МПа

Пределом прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ называют максимальное напряжение, при котором материал разрушается под действием изгибающих усилий.

При определении прочности при изгибе определяют значение разрушающего изгибающего момента M , Н·м, которое относят к моменту сопротивления образца W , м³:

$$\sigma_{изг} = M / W , \text{ Н/м}^2 \text{ (Па)}.$$

Образцы готовят в виде балочек прямоугольного или квадратного сечения либо стержней круглого сечения. Длина образцов должна превышать расстояние между опорами, составляющее **60 мм**.

При испытаниях на изгиб используется метод нагружения образца сосредоточенной силой (*трехточечный изгиб*). Образец устанавливают на опоры, выполненные в виде круглых стержней (**рис.1**), и нагружают до разрушения. Определение предела прочности при изгибе выполняется с помощью гидравлического пресса и измерительной системы.

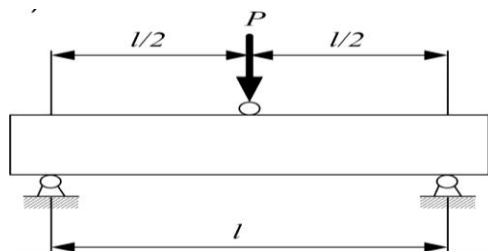


Рис.1. Схема нагружки при трехточечном изгибе

Последовательность измерения такая же, как и при измерении прочности при сжатии.

Прочность на изгиб рассчитывают по следующим формулам:

- для образцов круглого сечения:

$$\sigma_{изг} = M/W = 8Pl / \pi d^3;$$

- для образцов прямоугольного сечения:

$$\sigma_{изг} = M / W = 3Pl / 2bh^2 ,$$

где M – изгибающий момент, Н·м;

W – момент сопротивления, м³;

P – разрушающая нагрузка, кгс ($P = \mu \cdot K$ см. формулу для $\sigma_{сж}$);

l – расстояние между опорами, м;

b – ширина образца, м;

h – толщина образца, м;

d – диаметр образца круглого сечения, м.

Для получения среднего значения проводят не менее трех испытаний. Результаты, которые существенно отклоняются от среднего значения, в расчет не принимаются.

Результаты испытаний и расчетов заносят в табл.2.

Таблица 2

Результаты определения прочности при изгибе

№ образца	Расстояние между опорами l , см	Размеры образца		Разрушающая нагрузка P , кгс	$\sigma_{изг}$, МПа	Среднее значение $\sigma_{изг}$, МПа
		ширина b , см	толщина h , см			

По полученным данным делаю **вывод** о прочностных свойствах стекла.

Лабораторная работа №2. Определение сопротивления удару

Цель работы: определение сопротивления стекла удару.

Сопротивление удару – работа внешней силы, разрушающей образец стекла. Она выражается в Дж/м³ (кгс·см/см³). В качестве разрушающей внешней силы используют стальной (керамический) шарик, падающий на образец с определенной высоты.

Оборудование и материалы: 1. Прибор для определения сопротивления удару; 2. Набор стальных (керамических) шариков разного диаметра; 3. Весы технические; 4. Линейка, либо рулетка.

Ход работы. Испытание проводят на приборе, показанном на **рис.2**. Принцип действия прибора заключается в том, что на кубик или пластинку стекла (размер не регламентирован), уложенную на столик, падает стальной (керамический) шарик *весом P кг с высоты h м*. Высоту и вес шарика подбирают таким образом, чтобы образец разрушался многократно падающим грузом. Рекомендуют муфту с кронштейном устанавливать на определенной высоте (**30-40-60 см**). На технических весах взвешивают стальной (керамический) шарик с точностью до **0,01 г**.

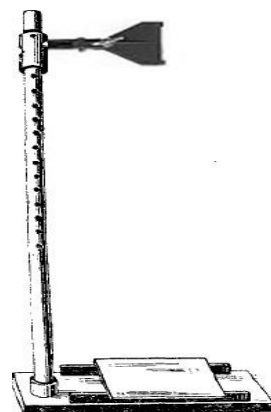


Рис.2. Установка для определения сопротивления стекла удару

Число падений до разрушения образца записывают, перед испытанием штангенциркулем измеряют *толщину (высоту) a , длину b и ширину c* пластины.

Сопротивление удару W , Дж/м³, вычисляют по формуле:

$$W = \frac{9,81 \cdot P \cdot h \cdot n}{V},$$

где P – масса шарика, кг; h – высота падения шарика, см; n – число падений, после которых разрушается образец; V – объем образца ($a \times b \times c$), см³; W – определяется из **5-10** измерений как среднее.

Если образец разрушается сразу при первом падении шарика, то испытания повторяют, уменьшив массу шарика и высоту падения. Если при многократном падении шарика образец не разрушается, то увеличивают массу шарика и высоту. Так, образец стекла толщиной **0,55 см** при высоте падения **60 см** и массе шарика **16,3 г** разрушается от **10-14 падений**.

Результаты испытаний записываются **табл.3**.

Таблица 3

Результаты определения сопротивления удару

Материал или изделие	№ определения	Масса шарика, кг	Высота падения шарика, см	Число падений n	Сопротивление удару W

По окончании работы делают **выводы** о сопротивлении стекла удару.

Лабораторная работа № 3. Определение термической стойкости стекла

Цель работы: определить термостойкость стекла.

Оборудование и материалы: 1.Муфельная печь; 2.Щипцы металлические; 3.Сосуд с водой; 4.Термометр; 5. Опытные образцы.

Ход работы. Различия в методах измерения термостойкости стекла большие и объясняются стремлением свести к минимуму влияние формы образцов на результаты измерений. При лабораторных измерениях термостойкости чаще всего используют цилиндрические стержни из стекла **длиной 25 мм, диаметром 5-6 мм** с оплавленными концами. При отборе и подготовке образцов необходимо соблюдать одинаковые условия для достижения одинакового их состояния (трещины, царапины, оплавленность). Помимо этого требуется тщательный отжиг.

Испытуемые образцы (цилиндрические стержни из стекла) в количестве не менее **3 шт.** одного состава, специально изготовленные и не имеющие дефектов поверхности, помещают в печь, нагретую предварительно до **150 °С**. (Открывают и закрывают печь только после отключения от сети напряжения!). После достижения заданной температуры в печи с образцами выдерживают **10–20 мин**, затем быстро вынимают образцы из печи с помощью металлических щипцов и погружают в холодную воду с температурой **12–20 °С**. Для более быстрого обнаружения трещин воду можно подкрасить фуксином или чернилами. Остывшие образцы тщательно осматривают и при отсутствии на образце трещин, других повреждений, видимых невооруженным глазом подсушивают их в сушильном шкафу и снова помещают в печь. Печь снова включают и нагревают до температуры, на **25 °С** выше предыдущей. Выдерживают образцы в печи при этой температуре в течение **10–20 мин** и снова повторяют охлаждение в воде. Испытания с последующим повышением температуры нагрева (каждый раз на **25 °С**) продолжают до тех пор, пока все образцы не разрушатся.

По средней температуре, предшествующей разрушению образцов и приведенной к диаметру образцов, равному **6 мм**, подсчитывают термостойкость стекла:

$$\Delta t = \Delta t_1 d/0,6;$$

где Δt_1 – измеренное значение термостойкости стекла, °С;
 d - диаметр образца, см.

Результаты определения записывают в **табл.4**.

Таблица 4

Результаты определения термостойкости

№ образца	Размеры образцов, мм		Температура, °С		Состояние образца	Термостойкость
	длина	диаметр	образца в печи	воды		

Термостойкость *10 образцов* определяют как среднее арифметическое значение максимальных температур нагрева образцов без разрушения. Значение термостойкости находят, вычитая из этого значения температуру холодной воды. Термостойкость большинства промышленных стекол не превышает *200°C*.

Более точная оценка термостойкости материала получается, если каждый раз при повышении температуры нагрева используют образцы, не подвергавшиеся термоудару. Но при этом требуется большое количество образцов.

По полученным данным делаю **вывод** о термостойкости испытуемого стекла.

Контрольные вопросы

1. Показатели теоретической и технической прочности.
2. Факторы, влияющие на показатели прочности.
3. Способ определения прочности при сжатии, изгибе, на удар.
4. Определение термостойкости стекла. Коэффициент термостойкости, группы стекол по коэффициенту термостойкости.

Литература:

1. Клюковский Г.И., Мануйлов Л.А. Лабораторный практикум по общей технологии силикатов. – М.: Стройиздат, 1975. – 271 с.
2. Павлюкевич Ю.Г., Папко Л.Ф. Технология и оборудование производства стеклянных изделий. – Минск: БГТУ, 2015. – 97 с.
3. Бобкова, Н. М. Химическая технология стекла и ситаллов: практикум / Н. М. Бобкова, Л. Ф. Папко. – Минск: БГТУ, 2005. – 196 с.
4. Гулоян Ю.А. Физико-химические основы технологии стекла.– Владимир: Транзит–ИКС, 2008. – 736 с.
5. Химическая технология стекла и ситаллов [Электронный ресурс]: учебное пособие / О. В. Казьмина, Э. Н. Беломестнова, А. А. Дитц; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 1 компьютерный файл (pdf; 2.4 МВ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – Заглавие с титульного экрана. – Электронная версия печатной публикации. – Доступ из корпоративной сети ТПУ. – Системные требования: Adobe Reader. Схема доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2012/m327.pdf>.
6. Артамонова М. В., Рабухин А. И., Савельев В. Г. Практикум по общей технологии силикатов. – М.: Стройиздат, 1996. – 280 с.
7. Павлушкин Н.М. Химическая технология стекла и ситаллов. – М.: Стройиздат, 1983. – 432 с.

Учебное издание

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТЕКЛА

Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной работы по курсу **«ОБЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СИЛИКАТОВ»** для студентов направления подготовки бакалавров **18.03.01 Химическая технология**

Составители

Казьмина Ольга Викторовна
Сударев Евгений Александрович

Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
С качеством представленного оригинал-макета

Подписано к печати 13.09.2021. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ.л. 9,01. Уч.-изд. л. 8,16.

Заказ . Тираж 20 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества

Издательство Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ . 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30 Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru