

Научная статья

УДК 539.199: 541.64

DOI 10.18101/2306-2363-2024-3-27-33

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ЛИТИЙ-БОРАТНЫХ СТЕКОЛ

© Машанов Алексей Алексеевич

кандидат технических наук, доцент

Mashanov@bsu.ru.

© Котова Алена Ивановна

магистрант

alengkakotova77929@gmail.com

Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова

Россия, 670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а

Аннотация. В данной работе проведено исследование микротвердости некоторых литий-боратных стекол в системе $B_2O_3-Li_2O$ при различных условиях нагружения. Эксперименты включали измерение микротвердости с применением пирамидального индентора Виккерса при нагрузках 0,01 Н и 0,025 Н. Процесс вдавливания индентора осуществлялся автоматически с выдержкой под нагрузкой от 1 до 5 секунд с шагом в 1 секунду. Полученные результаты показали, что с увеличением времени выдержки и нагрузки увеличивается глубина микроотпечатка, в то время как значения микротвердости снижаются. При увеличении содержания Li_2O глубина отпечатка уменьшается, что указывает на повышение микротвердости материала. Введение оксида лития усиливает структуру стекла и повышает его сопротивление деформации. Для всех исследуемых составов стекол была обнаружена линейная зависимость глубины отпечатка от времени выдержки, что свидетельствует о предсказуемости поведения материала при данных условиях.

Ключевые слова: микротвердость, литий-боратное стекло, индентор Виккерса, пластическая деформация, микровдавливание.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова», грант № 24-03-01.

Для цитирования

Машанов А. А., Котова А. И. Исследование микротвердости литий-боратных стекол // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2024. Вып. 3. С. 27–33.

Введение

Литий-боратные стекла и расплавы представляют собой значительную группу неорганических веществ, структура которых все еще вызывает научные споры. Они характеризуются уникальным набором физико-химических свойств, что связано с их структурными особенностями. Свойства, такие как низкотемпературная плавкость, высокая оптическая прозрачность, значительная химическая устойчивость и способность растворять оксиды различных металлов, делают литий-боратные стекла многообещающими материалами для разнообразных примене-

ний: от создания оптического волокна и лазерных устройств до использования в электролитах аккумуляторов и матрицах для хранения радиоактивных отходов [1–6].

Изучение литий-боратных стекол в контексте перехода от жидкого состояния к стеклообразному вызывает особый интерес. Этот процесс, хотя и не является фазовым переходом первого рода, сопровождается значительными изменениями вязкости, теплоемкости и прочих физических характеристик материала. Раскрытие механизмов, управляющих переходом жидкость — стекло, имеет решающее значение для создания стекол с необходимыми характеристиками и прогнозирования их поведения в различных условиях [7–11].

Цель работы: исследование микротвердости стекол системы $B_2O_3-Li_2O$ при увеличении концентрации оксида лития, а также изучение зависимости глубины микроотпечатка пирамидки Виккерса от времени выдержки.

Обработка поверхности образцов перед измерением

Для проведения измерений были подготовлены четыре образца оптимального размера с различным процентным содержанием компонентов (табл. 1). Перед началом эксперимента поверхность каждого образца была очищена и отполирована механической обработкой для удаления верхнего слоя материала и исключения неточностей в измерениях. Ручная шлифовка осуществлялась с использованием наждачной бумаги зернистостью P800. После шлифовки образцы были отполированы наждачной бумагой зернистостью от P1000 до P2000 для удаления мелких царапин и других дефектов поверхности.

Проведение эксперимента

Устанавливая нагрузку 0,01 и 0,025 Н, проводили измерение микротвердости на микротвердомере ИТВ-1-АМ по методу Виккерса (H_V). Автоматическое вдавливание индентора (пирамиды Виккерса) в испытуемый образец проводится при установленной нагрузке. Выдержка под нагрузкой осуществляется в течение заданного времени, измеряемого в секундах. В нашем исследовании это время варьировалось от 1 до 5 секунд с интервалом в 1 секунду. При микровдавливании пирамиды Виккерса в стекло образуется пластический микроотпечаток (рис. 1).

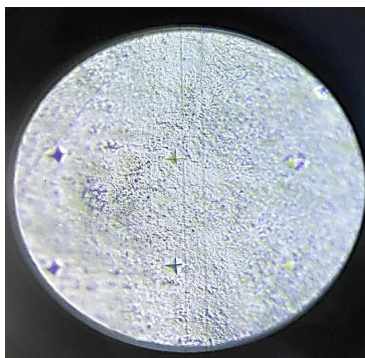


Рис. 1. Фотография микроотпечатков при увеличении 40х, полученных под нагрузкой 0,05 Н с временем выдержки 20 секунд на образце № 2 с содержанием Li 5,1%

С использованием окулярного микрометра на ИТВ-1-АМ были проведены измерения в двух взаимно перпендикулярных направлениях — по диагоналям d_1 и d_2 (рис. 2).

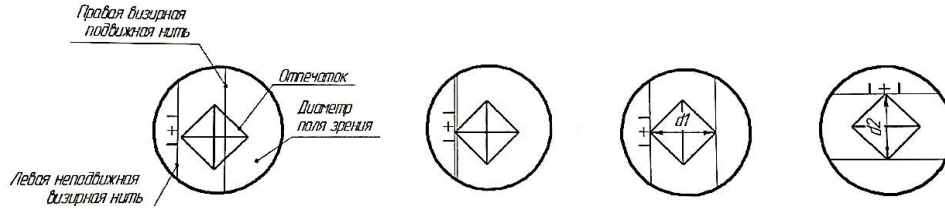


Рис. 2. Схема измерения диагоналей микроотпечатка

Чтобы получить статистически достоверные данные, для каждого времени выдержки и каждого образца испытания проводились не менее пяти раз.

После проведения всех измерений были начаты обработка данных и вычисления. Некоторые из полученных результатов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерений на нагрузке 0,01Н

№	Стекло, мол. %		$t_{\text{выд}} c$	d_1 , мкм	d_2 , мкм	D , мкм	H_v , кгс/мм ²
	B_2O_3	Li_2O					
1	98.0	2.0	1	14.83	14.00	14.41	69.2
2			2	15.51	17.21	16.36	67.0
3			3	15.60	17.87	16.73	66.1
4			4	17.06	17.93	17.49	60.5
5			5	16.88	20.86	18.87	52.0
1	94.9	5.1	1	8.16	8.60	8.38	263.7
2			2	9.38	9.32	9.35	211.8
3			3	10.25	10.40	10.32	173.8
4			4	11.56	14.01	12.78	113.3
5			5	12.76	13.0	12.88	111.7
1	93.0	7.0	1	7.17	9.05	8.11	302.3
2			2	7.77	8.3	8.03	286.8
3			3	8.30	8.48	8.39	259.1
4			4	9.27	10.13	9.70	245.9
5			5	9.26	10.27	9.76	192.1
1	89.6	10.4	1	7.32	9.47	8.39	262.8
2			2	10.04	9.68	9.86	190.5
3			3	10.46	9.71	10.08	182.2
4			4	10.55	10.01	10.28	175.3
5			5	11.11	11.80	11.45	141.1

Обработка результатов

Чтобы повысить точность измерений микротвердости, необходимо учитывать не только размеры отпечатка, но и его глубину. Глубина микроотпечатка отражает степень пластической деформации материала под воздействием нагрузки и

предоставляет дополнительную информацию о механических свойствах. Анализ глубины отпечатка позволяет более детально изучить микроструктуру материала и выявить особенности распределения твердости по различным слоям. Это особенно важно при исследовании поверхностно-модифицированных материалов или тонких покрытий, где традиционные методы могут быть недостаточно точными.

Для определения глубины микролунок используем следующую формулу:

$$h = \frac{D}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2)}, \quad (1)$$

где α — угол между противоположными гранями на вершине пирамидки Виккерса (136°), D — среднее арифметическое значение длин диагоналей микроотпечатка.

Глубина микроотпечатка в стекле системы $\text{B}_2\text{O}_3\text{--Li}_2\text{O}$ варьируется в зависимости от ряда факторов. Прежде всего, увеличение нагрузки на индентор приводит к более глубокому отпечатку. Также глубина зависит от продолжительности воздействия индентора на поверхность образца. Это явление характерно для многих материалов, включая литий-боратное стекло. Поскольку измерения проводились при комнатной температуре 20°C , образцы демонстрировали упругие свойства.

На основании данных из таблицы 2 строим графики, отображающие зависимость глубины микроотпечатка от времени выдержки (рис. 3).

Таблица 2

Результаты вычисления глубины микроотпечатков при нагрузке 0,01Н для стекла $\text{B}_2\text{O}_3\text{--Li}_2\text{O}$

Li_2O , мол. %	2	5,1	7	10,4	$t_{\text{выд}}$, с
h , мкм	2,99	1,69	1,63	1,69	1
	3,31	1,88	1,62	1,99	2
	3,38	2,08	1,69	2,03	3
	3,53	2,58	1,95	2,07	4
	3,81	2,60	1,97	2,31	5

График на рисунке 3 демонстрирует линейную корреляцию почти для всех исследуемых составов стекол, что указывает на равномерное увеличение глубины отпечатка с увеличением времени выдержки. Аналогичные линейные корреляции были получены и при нагрузке на индентор 0,025 Н.

Для подтверждения выявленной линейной корреляции были проведены дополнительные статистические анализы, включая расчёт коэффициентов корреляции для каждого состава литий-боратного стекла. Полученные значения подтвердили высокую степень линейной зависимости глубины микроотпечатка от времени выдержки при обоих уровнях нагрузки (0,01 Н и 0,025 Н). Это свидетельствует о том, что в исследуемых условиях глубина отпечатка пропорциональна времени взаимодействия индентора с поверхностью материала.

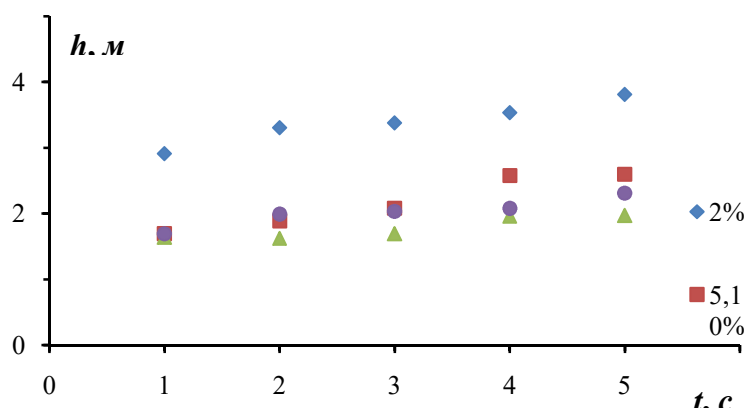


Рис. 3. Зависимость глубины отпечатка от времени выдержки нагрузки. Стекло $V_2O_3-Li_2O$, с различным содержанием окисла. Нагрузка — 0,01 Н

Дополнительно были проанализированы изменения микротвердости материала в зависимости от содержания оксида лития Li_2O . Результаты показывают, что увеличение содержания Li_2O в составе стекла приводит к снижению глубины отпечатка при той же нагрузке, что указывает на рост микротвердости материала.

В дальнейшем планируется расширение исследования на другие комбинации оксидов и изучение их влияния на микроструктуру и механические свойства стекол. Также предполагается изучение температурных влияний для более полного понимания поведения материалов в различных условиях.

Заключение

В ходе проведенных исследований микротвердости литий-боратных стекол с различным содержанием оксида лития было выявлено несколько важных закономерностей. При испытаниях с нагрузками 0,01 Н и 0,025 Н и временем выдержки индентора от 1 до 5 секунд установлено, что глубина микроотпечатка зависит как от времени выдержки, так и от концентрации Li_2O в составе стекла.

Полученные данные показывают, что при увеличении времени выдержки нагрузки глубина отпечатка увеличивается линейно для всех исследованных составов стекол. Это свидетельствует о равномерном развитии пластической деформации в материале при длительном воздействии нагрузки. Такой характер зависимости соответствует ожиданиям и подтверждает устойчивость методики измерений.

Кроме того, анализ результатов позволяет отметить, что с увеличением содержания оксида лития в стекле глубина отпечатка при одинаковых условиях испытаний уменьшается. Например, стекло с содержанием Li_2O 2 мол.% демонстрирует большую глубину отпечатка по сравнению со стеклом с содержанием Li_2O 10,4 мол.% при тех же условиях нагрузки и времени выдержки. Это указывает на повышение микротвердости материала при увеличении концентрации оксида лития.

Таким образом, введение оксида лития в борное стекло приводит к усилению его структуры и повышению сопротивления пластической деформации. Это может быть связано с изменениями в микроструктуре стекла, вызванными модификацией сетки за счет включения ионов лития.

Литература

1. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Москва; Ленинград: Изд-во АН СССР, 1945. Текст: непосредственный.
2. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. Москва: Изд-во иностр. лит.-ры, 1963. Текст: непосредственный.
3. Саетова Н. С. Физико-химические свойства литий-боратных стёкол и композитов на их основе. Екатеринбург, 2019. 125 с. Текст: непосредственный.
4. Hannon A. C., Wright A. C., Blackman J. A., Sinclair R. N. The vibrational modes of vitreous B_2O_3 : inelastic neutron scattering and modeling studies. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1995; 182: 78–89.
5. Pernice P., Esposito S., Aronne A., Sigaev V. N. Structure and crystallization behavior of glasses in the $BaO-B_2O_3-Al_2O_3$ system. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1999; 258: 1–10.
6. Сандитов Д. С., Бартенов Г. М. Физические свойства неупорядоченных структур. Новосибирск: Наука, 1982.
7. Сандитов Д. С. Модель делокализованных атомов в физике стеклообразного состояния // Журнал экспериментальной и технической физики. 2012. Т. 142, вып. 1. С. 123–137. Текст: непосредственный.
8. Сандитов Д. С. Эффект пластичности стекол в модели делокализованных атомов // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2021. Вып. 1. С. 5–27. Текст: непосредственный.
9. Сандитов Д. С., Бадмаев С. С. Стеклование жидкости и замороженная деформация стёкол // Неорганические материалы. 2019. Т. 55, № 10. С. 1108–1115. Текст: непосредственный.
10. Олейник Э. Ф., Руднев С. Н., Саламатина О. Б. Механизм неупругой деформации в твердых полимерах: твердотельные и жидкоподобные процессы // Высокомолекулярные соединения. 2008. Т. 50, № 5. С. 773–788. Текст: непосредственный.

Статья поступила в редакцию 30.09.2024; одобрена после рецензирования 23.10.2024; принята к публикации 28.10.2024.

STUDY OF MICROHARDNESS OF LITHIUM-BORATE GLASSES

Aleksey A. Mashanov
Cand. Sci. (Engineering), A/Prof.
mashanov@bsu.ru

Alyona I. Kotova
Master's Student
alenkakotova77929@gmail.com

Dorzhi Banzarov Buryat State University
24a Smolina St., Ulan-Ude 670000, Russia

Abstract. The article investigates the microhardness of some lithium-borate glasses in the $B_2O_3-Li_2O$ system under various loading conditions. The experiments included microhardness measurements using a Vickers pyramidal indenter under loads of 0.01 N and 0.025 N. Hardness indentation was performed automatically with a hold time under load from 1 to 5 seconds with a step of 1 second. The results showed that with an increase in the hold time and load, the microindentation depth increases, while the microhardness values decrease. With an increase in the Li_2O content the indentation depth decreases, which indicates an increase in the microhardness of the material. Introduction of lithium oxide

strengthens the glass structure and increases its resistance to deformation. We have found a linear dependence of the indentation depth on the hold time for all the studied glass compositions, which indicates the predictability of the material behavior under these conditions.

Keywords: microhardness, lithium borate glass, Vickers indenter, plastic deformation, microindentation.

Acknowledgments

The study was supported by Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Dorzhi Banzarov Buryat State University”, grant No. 24-03-01.

For citation

Mashanov A. A., Kotova A. I. Study of Microhardness of Lithium-Borate Glasses. *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics.* 2024; 3: 27–33 (In Russ.).

The article was submitted 30.09.2024; approved after reviewing 23.10.2024; accepted for publication 28.10.2024.