

УДК 544.236.4

ВЯЗКОУПРУГОСТЬ РАСПЛАВОВ $\text{Me}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ ($\text{Me} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}, \text{Cs}$)

© 2024 г. Хохряков А. А.*, Самойлова М. А., Рябов В. В.

*Институт металлургии УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101***e-mail: xohryakov46@mail.ru*

Поступила в редакцию 7.06.24

После доработки 10.09.24

Принята к публикации 13.09.24

Методом вибрационной вискозиметрии измерены вязкоупругие характеристики щелочноборатных расплавов при $T = 1173$ К в интервале концентраций 0–56 мол. % Me_2O на частоте 32 Гц. Получены значения динамической вязкости, модулей сдвига, тангенса угла механических потерь и времена релаксации. Показано экстремальное поведение вязкоупругих характеристик расплава в зависимости от состава расплава. Положения экстремумов коррелируют с существованием в борокислородной сетке расплавов определенных надструктурных единиц. Предположено, что низкочастотная вязкоупругая релаксация расплавов проходит посредством диффузионного обмена возбужденными атомами кластеров, состоящими из надструктурных единиц расплава и «фоновыми» некольцевыми группами расплавов. Из-за большого времени жизни кластеры не успевают реагировать на внешние возмущения, вследствие этого расплавы проявляют упругие свойства.

Ключевые слова: вязкоупругость, щелочноборатный расплав, вязкоупругие характеристики, катион-модификатор, диффузионный обмен, кластеры

DOI: 10.31857/S0132665124060033, **EDN:** DWTBCH

ВВЕДЕНИЕ

Щелочноборатные расплавы составляют основу многих шлаков, стекол и эмалей. Изучение вязкоупругих свойств этих систем при повышенных температурах представляет большой интерес. Вязкоупругие характеристики боратных расплавов влияют на кинетику химических реакций, процессы тепло- и массообмена, скорость установления фазовых равновесий и кинетику кристаллизации расплава. В научной литературе имеется немного работ по сдвиговой вязкости щелочноборатных расплавов [1–17]. Концентрационные интервалы измерений вязкости крайне неоднородны и получены только до $T \sim 1473$ К. Большинство работ посвящено исследованию вязкости натрийборатных расплавов [1–6]. Вязкость щелочноборатных расплавов во всех проведенных экспериментах измерена в равновесных условиях при постоянной скорости сдвига.

Цель настоящей работы – изучить вязкоупругие свойства щелочноборатных расплавов в условиях периодических измерений скорости сдвига, в концентрационном интервале $0 \leq x \leq 56$ мол. % Me_2O ($\text{Me} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}, \text{Cs}$) при $T = 1173$ К, и сравнить ее со сдвиговой вязкостью, полученной при постоянной скорости сдвига.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Боратные смеси готовили из предварительно переплавленного порошка оксида бора B_2O_3 и карбоната соответствующего щелочного металла Me_2CO_3 ($\text{Me} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}, \text{Cs}$). Затем стеклообразный B_2O_3 нагревали в платиновом контейнере до 1273 К и добавляли карбонат щелочного металла. Расплав выдерживали при $T = 1273$ К в течение 40 мин и проводили измерения. Вязкоупругие характеристики расплава измерены вибрационным методом [18] на вискозиметре, работающем в режиме вынужденных колебаний с частотой 32 Гц [19] с точностью $\pm 5\%$. В цезийборатных расплавах был использован более мелкий концентрационный шаг изменения вязкости, по сравнению с другими щелочноборатными расплавами. Это было связано с очень небольшой концентрационной областью изменения вязкоупругих характеристик, доступных для используемого метода измерений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Удобным параметром для оценки полей вязкого течения является число Рейнольдса. Оно характеризует отношение силы инерции к силе вязкого трения. Числа Рейнольдса (Re) рассчитывали по формуле [20]

$$\text{Re} = \frac{LV}{\eta'/\rho}, \quad (1)$$

где L — длина шпинделя (м) (часть стрежня, погруженного в расплав), V — средняя скорость движения шпинделя (м/с), η' — динамическая вязкость расплава (Па·с), ρ — плотность расплава (кг/м^3) [21, 22].

Из рис. 1 видно, что числа Рейнольдса имеют низкие значения для всех изученных расплавов. Это означает, что в расплавах не возникают неустойчивости, которые могли бы привести к отклонению вязкости от ньютоновского течения. Резкое изменение вязкости, измеренной вибрационным методом, по отношению к сдвиговой вязкости η (табл. 1, 2) связано с проявлением упругих свойств расплава, когда вязкость начинает зависеть от скорости деформации расплава. В этом случае энергия осцилляций не только расходуется на динамическую вязкость (η'), но и накапливается в виде добавочной компоненты — мнимой (накопительной) вязкости (η''), связанной с модулем упругости борокислородной сетки расплава (G'/ω) [23]. Комплексную вязкость можно представить следующим отношением (2):

$$\eta^* = \eta'(\omega) - i\eta''(\omega) = \eta'(\omega) - \frac{G'}{\omega}, \quad (2)$$

а модуль комплексного коэффициента вязкости можно вычислить по формуле

$$\eta^* = \sqrt{\eta'(\omega)^2 + \left(\frac{G'}{\omega}\right)^2} \quad (3)$$

Здесь $\eta'(\omega)$ — динамическая вязкость, которая совпадает по фазе со скоростью сдвига и связана с диссипацией энергии в тепло, $\eta''(\omega)$ — компонента, связанная с упругостью среды, G' — модуль упругости, совпадающий по фазе с деформацией и отвечающий накоплению упругой энергии при периодическом деформировании расплава.

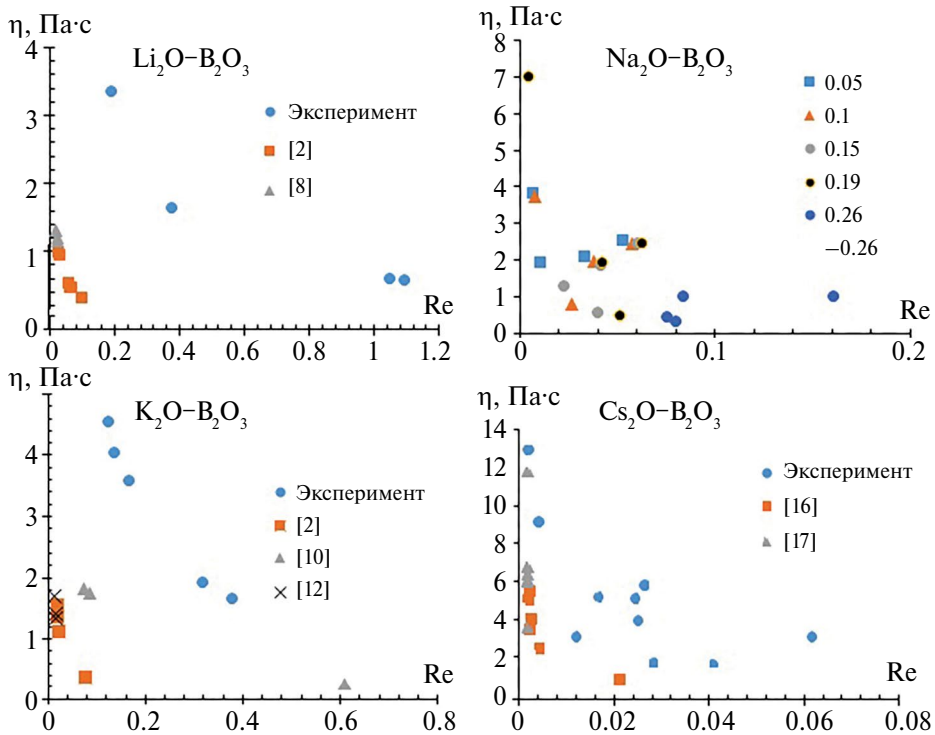


Рис. 1. Корреляция вязкости расплавов $Me_2O-B_2O_3$ ($Me = Li, Na, K, Cs$) с числами Re . Числа на правом верхнем графике — концентрации щелочного оксида (мол. %); на остальных графиках в квадратных скобках указаны соответствующие литературные источники.

Экспериментально на вибрационном вискозиметре регистрируется динамическая вязкость — $\eta'(\omega)$. Накопительная вязкость $\eta'' = G'/\omega$ вычислена с помощью математической модели, предложенной в работе [24]. Эта модель рассматривает колебания расплава, совершаемые в направлении, перпендикулярном оси осциллирующего стержня, под действием периодической вынуждающей силы. Формула расчета модуля упругости G' имеет следующий вид:

$$G' = \frac{\omega \pi^2 \rho_0 R}{2} \sqrt{\frac{2\eta'\omega}{\rho}}, \quad (4)$$

где ρ_0 — плотность материала шпинделя (платина), ρ — плотность расплава, R — радиус стержня (шпинделя), ω — частота колебаний шпинделя, η' — динамическая вязкость.

Экспериментальные данные по сдвиговой η и динамической вязкости η' , а также вычисленные значения вязкоупругих характеристик G' , η^* , $\tan \delta$ и τ_i расплавов $Me_2O-B_2O_3$ ($Me = Li, Na, K, Cs$) представлены в табл. 1, 2.

Рассмотрим характеристики сдвиговой вязкости η в зависимости от состава расплава (рис. 2, табл. 1, 2). Из рис. 2 видно, что первый минимум

Таблица 1. Вязкоупругие характеристики расплавов $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ и $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ при $T = 900-1600\text{K}$

мол. % Li_2O	η , Па·с [4]	η' , Па·с	G' , Па	η^* , Па·с	$\text{tg } \delta$	τ_j , с
0	11.40	12.3	1222.0	40.1	0.32	0.10
4.5	3.09	7.7	940.2	30.4	0.26	0.12
6.7	2.27	3.4	611.3	19.4	0.18	0.18
8.8	1.46	6.3	828.3	26.6	0.24	0.13
10.9	0.97	1.7	428.0	13.5	0.13	0.25
14.9	0.94	2.4	503.6	15.9	0.16	0.20
16.8	0.80	5.2	721.5	23.1	0.23	0.14
18.2	0.66	2.7	515.8	16.3	0.17	0.19
20.6	0.53	1.4	373.9	11.8	0.12	0.25
24.1	0.46	1.3	349.5	11.0	0.12	0.27
29.1	0.36	0.6	234.6	7.4	0.08	0.39
35.34	0.26	0.5	225.9	7.1	0.08	0.41
39.8	0.20	0.5	225.9	7.1	0.08	0.41
43.7	0.15	0.4	208.2	6.5	0.07	0.45
55.6	0.10	0.1	112.5	3.5	0.03	0.91
мол. % Na_2O	η , Па·с [4]	η' , Па·с	G' , Па	η^* , Па·с	$\text{tg } \delta$	τ_j , с
1.1	5.75	10.8	1127.1	36.8	0.31	0.10
3.4	3.03	9.2	1027.6	33.4	0.29	0.11
4.5	2.31	7.3	899.9	29.0	0.26	0.12
5.6	1.58	7.6	913.6	29.5	0.26	0.12
6.7	1.44	8.7	971.2	31.6	0.29	0.11
8.9	1.30	3.4	600.7	19.1	0.18	0.17
9.7	1.34	1.8	434.4	13.7	0.13	0.23
11.1	1.38	1.9	444.9	14.0	0.14	0.22
13.3	1.33	3.4	582.2	18.5	0.19	0.17
15.4	1.27	6.2	776.8	25.1	0.26	0.12
17.7	1.07	5.1	698.9	22.4	0.23	0.13
20.9	0.86	5.4	711.8	22.9	0.24	0.13
24.2	0.42	1.0	303.6	9.5	0.11	0.29
28.3	0.31	3.7	574.4	18.3	0.20	0.15
32.5	0.21	0.2	146.5	4.6	0.05	0.60
37.7	0.10	0.1	104.2	3.3	0.04	0.85

сдвиговой вязкости у литий- и натрийборатных расплавов наблюдается в области ~ 10 мол. % Me_2O , тогда как у калий- и цезийборатных расплавов – в области ~ 3 мол. % Me_2O . Предполагается, что в этом низкоконтрационном интервале в щелочноборатных расплавах происходит образование полиэдров BO_4 , которые входят в состав некольцевых полиборатных групп (НК). Это приводит к «разрыхлению» борокислородной сетки

Таблица 2. Вязкоупругие характеристики расплавов $K_2O-B_2O_3$ и $Cs_2O-B_2O_3$ при $T = 900-1600K$

мол. % K_2O	η , Па·с [4]	η' , Па·с	G' , Па	η^* , Па·с	$\lg \delta$	τ_p , с
0.0	11.4	12.3	40.5	1234.8	0.32	0.10
0.7	3.7	12.4	39.9	1214.5	0.33	0.10
1.5	1.4	6.9	29.1	904.9	0.25	0.13
2.2	1.1	11.6	38.2	1163.1	0.32	0.10
3.0	0.7	5.1	24.5	766.8	0.21	0.15
3.7	0.5	4.0	21.5	674.9	0.19	0.16
4.5	0.4	6.3	26.5	824.1	0.24	0.13
5.3	1.4	3.6	19.7	620.0	0.18	0.17
6.0	1.5	6.1	26.1	811.3	0.24	0.13
7.6	1.6	5.5	24.6	767.6	0.23	0.14
10.7	1.5	5.5	24.2	753.8	0.24	0.13
14.8	1.0	1.9	13.7	433.6	0.14	0.22
17.2	0.9	4.0	19.9	625.0	0.21	0.15
24.1	0.4	2.1	13.9	440.7	0.15	0.21
28.5	0.2	2.1	13.8	437.5	0.15	0.21
мол. % Cs_2O	η , Па·с [19]	η' , Па·с	G' , Па	η^* , Па·с	$\lg \delta$	τ_p , с
0.3	12.6	9.5	35.3	1086.7	0.28	0.11
0.8	12.4	11.2	37.3	1138.2	0.31	0.10
1.0	11.2	12.2	38.9	1183.7	0.33	0.10
1.3	6.3	8.3	31.5	972.8	0.27	0.11
1.6	5.7	8.7	32.2	992.9	0.28	0.11
1.8	5.6	6.8	28.2	874.9	0.25	0.13
2.1	5.5	6.1	26.4	820.8	0.24	0.13
2.7	5.7	3.3	19.2	604.1	0.18	0.18
3.3	6.3	7.7	29.3	905.0	0.27	0.11
3.9	6.4	2.0	14.3	453.6	0.14	0.22
5.5	6.0	1.9	13.8	437.4	0.14	0.22
6.5	5.9	5.5	23.4	729.3	0.24	0.13
7.6	5.6	4.2	20.3	633.7	0.21	0.15
9.6	3.2	5.4	22.3	693.4	0.25	0.13
11.7	1.2	5.0	20.8	645.2	0.25	0.13
15.2	0.8	2.1	12.8	404.3	0.16	0.19

расплава. Следствием этого разрыхления является снижение сдвиговой вязкости расплава. Максимальные значения сдвиговой вязкости в ряду расплавов $LiB \rightarrow NaB \rightarrow KB \rightarrow CsB$ приходится соответственно на следующие концентрационные интервалы: 6–20, 6–15, 4–10, 2–8 мол. % Me_2O ($Me = Li, Na, K, Cs$). За пределами этих интервалов снижение вязкости вызвано распадом борокислородной сетки расплава вплоть до образования базовых тригональных групп. Постепенный характер изменения сдвиговой вязкости в отмеченных выше

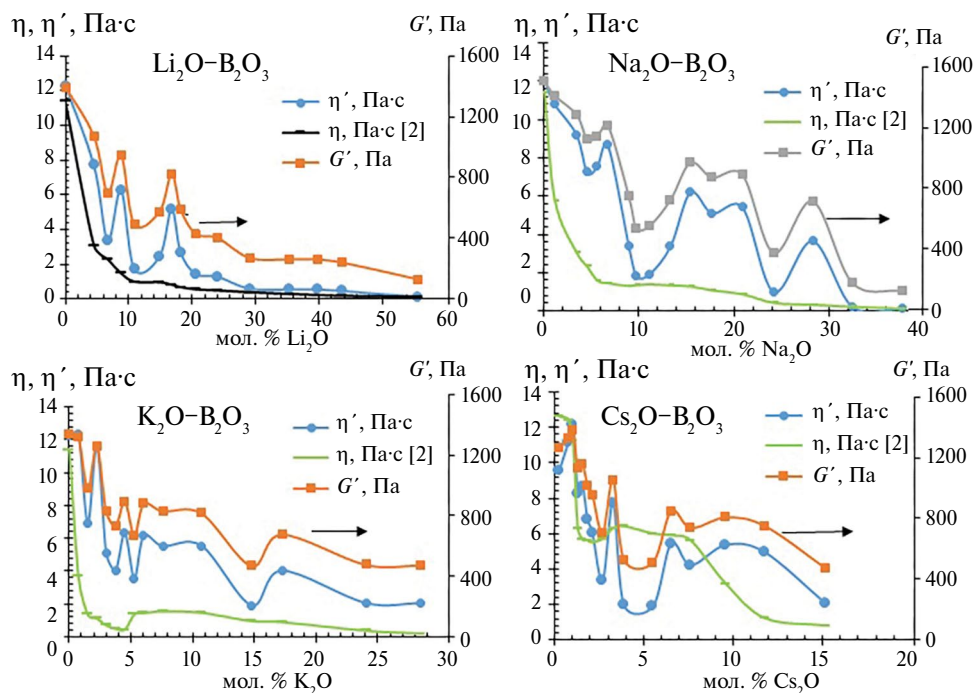
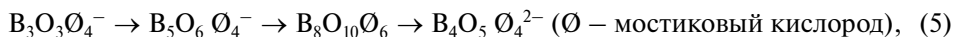


Рис. 2. Зависимости динамической вязкости (η'), сдвиговой вязкости (η) и модуля упругости (G') от состава расплавов $x \text{Me}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ ($\text{Me} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}, \text{Cs}$).

интервалах связан с изменением структуры ближнего порядка, при котором происходят конфигурационные изменения и переключения атомов кислорода мостиковых связей. Как известно, с увеличением концентрации оксида щелочного металла в щелочноборатных расплавах образуется следующий ряд надструктурных единиц [25, 26]:



(три- → пента- → тетра- → диборатные группы), в которых энергия переключения мостиковых связей кислорода не сильно отличается друг от друга. Это приводит к монотонной зависимости сдвиговой вязкости от состава (рис.2, табл. 1, 2). Необходимо отметить, что динамическая вязкость η' отличается от сдвиговой вязкости η . Это связано с тем, что изменение скорости деформации приводит к проявлению у расплавов упругих свойств.

Периодический сдвиговый процесс может быть описан двумя компонентами: динамической вязкостью (η') и модулем сдвига (G'). На графиках зависимости η' и G' от состава наблюдаются экстремальные значения этих величин. Предположено, что эти значения коррелируют с присутствием в борокислородной сетке кольцевых полиборатных групп, соответствующих приведенному выше ряду (5). Концентрационные границы динамической вязкости имеют выраженный характер и имеют следующие значения, отвечающие ряду (5) (в мол. %), соответственно, для литий-, натрий-, калий- и цезийборатных расплавов: 6–30, 10–32, 5–25, 3–15. Отнесение сделано на основе данных КР-спектроскопии [25]. При

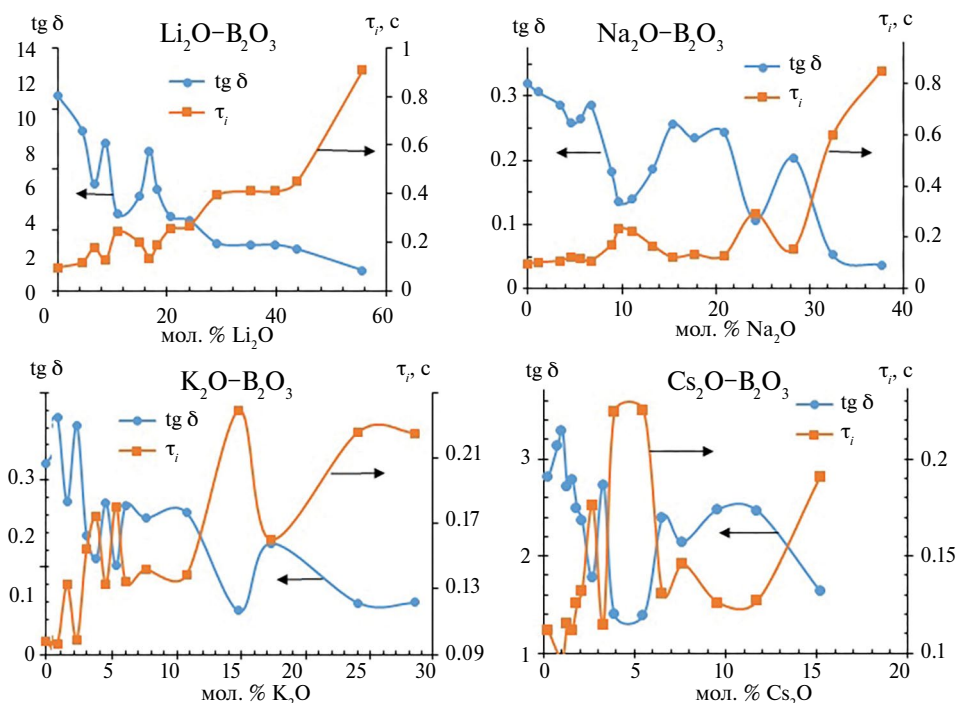


Рис. 3. Зависимости тангенса угла механических потерь и времени релаксации от состава расплава $x \text{ Me}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ ($\text{Me} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}, \text{Cs}$).

низкочастотной деформации вязкоупругие свойства борокислородной сетки проявляются в виде ряда экстремальных характеристик, располагающихся выше, чем сдвиговая вязкость (см. рис. 2 и 3). Отметим, что число Дебори (DN), которое определяется как отношение времени релаксации к времени наблюдения (больше 1). Это значит, что расплав можно рассматривать как твердое тело. Значения динамической вязкости и модуля упругости при одинаковых типах химической связи зависят от размера надструктурных единиц расплава. Чем больше число связей В—О—В в группировке, тем больше параметры вязкоупругих свойств этих групп.

Выделяются две особенности вязкоупругих свойств щелочноборатных расплавов, связанных с природой катиона щелочного металла. Первая состоит в том, что, как предполагается, в первой области образуются некольцевые группы, состоящие преимущественно из базовых единиц BO_3 и тетраэдров BO_4 , которым отвечает различное число пиков на зависимости η' и G' от состава. Так в расплавах LiB и NaB наблюдается только один пик, а в KB и CsB — два. Это различие можно объяснить следующим образом: взаимодействие катионов щелочного металла с полиэдром BO_4 зависит от ионного потенциала (q/r), где q — заряд катиона, r — радиус. В ряду расплавов LiB $\rightarrow$ NaB $\rightarrow$ KB $\rightarrow$ CsB снижение ионного потенциала уменьшает взаимодействие с некольцевыми группами. Это приводит к увеличению вязкоупругих параметров сетки расплава. Дополнительный пик, который наблюдается на зависимостях η' и G' от состава в расплавах KB и CsB связан с гидролизом этих систем. Это значит, что часть некольцевых групп содержат оксигидратные группы. Вторая особенность вязкоупругих свойств расплава связана с размерами катионов.

Таблица 3. Эффективные заряды и координационные числа щелочноборатных расплавов $\text{Me}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ ($\text{Me} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}, \text{Cs}$)

Me^+	мол. % Me_2O	q^*	КЧ	η' , Па·с	G' , Па	$\text{tg } \delta$	τ_i , с
Li^+	8.8	0.6	4	6.3	828.3	0.24	0.13
	16.8			5.2	721.5	0.23	0.14
	24.1			1.3	351.9	0.12	0.27
Na^+	6.7	0.7	6 8	8.7	971.2	0.29	0.11
	15.4			6.2	776.8	0.26	0.12
	20.9			5.4	711.8	0.24	0.13
	28.3			3.7	574.4	0.2	0.15
K^+	2.2	0.84	8 10	11.6	1163.1	0.32	0.10
	4.5			6.3	824.1	0.24	0.13
	6.04			6.1	811.3	0.24	0.13
	10.7			5.5	753.8	0.24	0.13
	17.2			4.0	625.0	0.21	0.15
Cs^+	1.02	1.1	10 12	12.2	1183.7	0.33	0.10
	3.3			7.7	905.0	0.27	0.11
	6.5			5.4	729.3	0.24	0.13
	9.6			5.4	693.4	0.25	0.13

Крупные катионы, такие как калий и цезий, с трудом входят в борокислородную сетку расплава. Число доступных позиций, которые могут занять эти катионы, ограничено. В расплавах KB и CsB это приводит к разрушению мостиковых кислородных связей и появлению немостиковых кислородов [27]. В результате граница образования полиборатных групп, отвечающих ряду (5), смещается в область более низких концентраций по оксиду щелочного металла.

С целью более детальной оценки влияния природы щелочного металла на свойства боратных расплавов удобно рассмотреть зависимость только экстремальных значений вязкоупругих характеристик от координационных чисел катионов и их эффективных зарядов (q^*). Эффективный заряд катиона определяет степень ионности связей $\text{Me}-\text{O}$, его значения получены на основе данных интегральных полос ИК-спектров щелочноборатных систем [28] и приведены в табл. 3.

Экстремальные значения динамической вязкости (η') и модуля упругости (G') отвечают максимальной концентрации групп ряда (5) на шкале концентраций. Эти группы формируют кластеры, в состав которых входят и катионы щелочных металлов. Зависимость экстремальных значений динамической вязкости и модуля упругости щелочноборатных расплавов от эффективного заряда катиона представлена на рис. 4.

Стоит отметить, что высокая поляризуемость иона цезия вносит дополнительный вклад в дипольный момент, в результате вычисленный эффективный заряд иона цезия становится больше. Из табл. 3 видно, что значения экстремальных характеристик η' и G' , связанных с надструктурными единицами расплава, смещаются в область более низких концентраций, при этом происходит увеличение этих параметров в парах $\text{LiB} \rightarrow \text{NaB}$ и $\text{KB} \rightarrow \text{CsB}$. Из табл. 3 также видно, что более

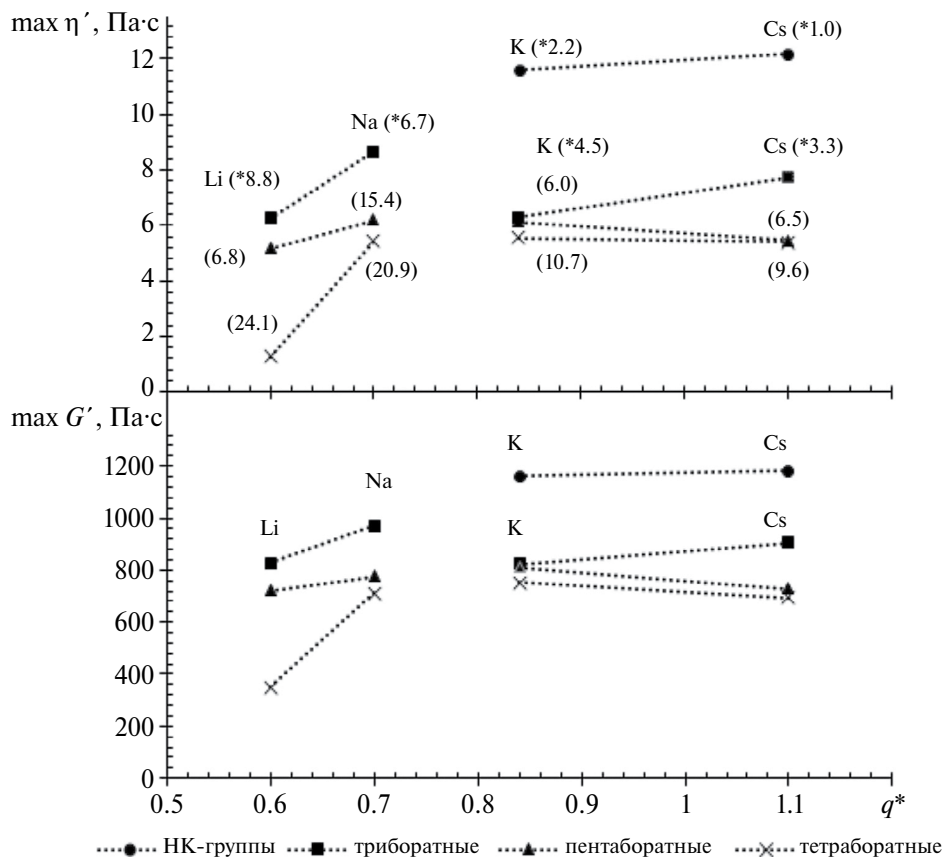


Рис. 4. Зависимость динамической вязкости и модуля упругости щелочноборатных расплавов от эффективного заряда катиона. В скобках указаны концентрации щелочных оксидов (мол. %), при которых получены значения динамической вязкости и модуля упругости.

крупные катионы связаны с большим числом кислородных атомов. Это блокирует конфигурационные перестройки, необходимые для переключения мостиковых связей. Вследствие этого экстремальные значения параметров η' и G' начинают формироваться при более низких концентрациях оксидов щелочных металлов.

Необходимо отметить, что в расплавах $\text{KB} \rightarrow \text{CsB}$ наблюдается снижение η' и G' в области ~ 10 мол. % Me_2O (рис. 2). Из данных КР-спектроскопии [29] известно, что при этих составах в расплаве CsB появляются немостиковые кислороды, которые снижают связность сетки расплавов. Это приводит к снижению вязкоупругих параметров расплава CsB по отношению к KB . В расплаве NaB немостиковый кислород в заметных количествах появляется при концентрации ~ 20 мол. % Me_2O . Поэтому снижения параметров η' и G' в приведенном концентрационном интервале (0–20 мол. %) у расплавов LiB и NaB не наблюдается.

Кроме η' и G' особенности вязкоупругих свойств характеризуют следующие два параметра: тангенс угла механических потерь ($\tan \delta$) и период релаксации системы от неравновесного состояния к равновесному (τ_r). Чем больше тангенс угла

механических потерь, тем меньше время релаксации (табл. 1, 2 и рис. 3). Тангенс угла механических потерь рассчитывали по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{G''}{G'}. \quad (6)$$

Период релаксации обычно приравнивают к времени оседлой жизни структурных единиц. Большее время релаксации указывает на большую группу взаимодействующих атомов, обладающих значительной сдвиговой упругостью. Время релаксации рассчитывалось, с учетом частоты эксперимента, следующим образом:

$$\tau_i = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta \cdot \omega}. \quad (7)$$

Как известно, период релаксации τ_i определяет время жизни отдельных частиц. По данным молекулярной динамики щелочноборатных расплавов [30], время оседлого существования отдельных атомов оценивается как 10^{-11} с. Период низкочастотной вязкоупругой релаксации щелочноборатных расплавов составляет доли секунды. Это указывает на образование в расплавах крупных кольцевых групп, образующих динамические кластеры с большим временем жизни. Это позволяет заключить, что вязкоупругая релаксация в расплавах проходит посредством диффузионно-колебательного обмена возбужденных атомов кластера с некольцевыми группами расплава, представляющими неупорядоченную часть сетки расплава. Такое объяснение будет соответствовать модели сильновязкой жидкости, предложенной Исаковичем и Чабаном [31]. По этой модели жидкость рассматривается как микронеоднородная среда, состоящая из упорядоченных микрообластей – кластеров, расположенных в рыхло упакованной матрице. В нашем случае кластеры, собранные из кольцевых групп, представляют собой упорядоченные фрагменты борокислородной сетки, тогда как некольцевые группы, собранные из «свободных» BO_4 , тригональных единиц BO_3 , метаборатных единиц BO_2O^- , пиро- и ортоборатных групп, являются неупорядоченными фрагментами сетки расплава. В результате диффузионный обмен происходит между упорядоченными и «неупорядоченными» компонентами расплава. Этот обмен происходит посредством более подвижных ионов щелочных металлов.

Стоит отметить, что в ряду расплавов $\text{LiB} \rightarrow \text{NaB} \rightarrow \text{KB} \rightarrow \text{CsB}$ тангенс угла потерь возрастает ($\operatorname{tg} \delta$) (табл. 3). Известно, что в этом ряду катион-модификатор взаимодействует с большим числом кислородных атомов – это является причиной увеличения размеров образующихся в системе кластеров, несмотря на то, что по данным КР-спектроскопии [25, 26, 29] концентрация полиэдров BO_4 в этом ряду снижается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены результаты анализа динамических вязкоупругих характеристик щелочноборатных расплавов. Показано влияние природы катиона щелочного металла на вязкоупругие свойства расплавов. Установлено, что вязкоупругие характеристики (η' , G' , $\operatorname{tg} \delta$, τ_i) связаны с надструктурными единицами расплавов, которые образуют кластеры, в состав которых входят ионы щелочных металлов.

Найдено, что низкочастотная вязкоупругая релаксация составляет $\sim 10^{-1}$ с. Релаксационный процесс объяснен диффузионным обменом возбужденных атомов между кластерами и «фоновыми» некольцевыми группами расплавов. Показано, что структурные единицы расплавов не успевают реагировать на внешние периодические возмущения, что приводит к появлению упругих свойств расплава.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках госзадания Института металлургии УрО РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воларович М.П., Толстой Д.М. Исследование внутреннего трения двойной системы $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{--B}_2\text{O}_3$ в расплавленном состоянии // Изв. Акад. наук СССР. 1930. № 9. С. 897–906.
2. Shartsis L., Capps S.W., Spinner S. Viscosity and Electrical Resistivity of Molten Alkali Borates // Journal of the American Ceramic Society. 1953. V. 36. № 10. P. 319–326.
3. Li P.-Ch., Ghose A.C., Su G.-J. Viscosity Determination of Boron Oxide and Binary Borates // J. American Ceramic Society. 1962. V. 45. № 2. P. 83–88.
4. Богданов В.Н., Михайлов И.Г., Немилев С.В. Изучение методом ультразвуковой спектроскопии и вискозиметрии структуры расплавленных стекол системы $\text{Na}_2\text{O--B}_2\text{O}_3$ // Акустический журнал. 1974. Т. XX. № 4. С. 511–517.
5. Tandon S., Agrawal R.D., Kapoor M.L. Viscosity of Molten $\text{Na}_2\text{O--B}_2\text{O}_3$ Slags // J. American Ceramic Society. 1994. V. 77. № 4. P. 1032–1036.
6. Kaiura G.H., Toguri J.M. The viscosity and structure of sodium borate melts // Physics and chemistry of glasses. 1976. V. 17. № 3. P. 62–69.
7. Мусихин В.И., Кудряшов В.Н. Строение и свойства металлургических расплавов. Свердловск: Ин-т металлургии УНЦ АН СССР, 1974. Т. 28. С. 91–96.
8. Liu H., Shen G., Wang X., Wei J.D. Viscosity and IR investigations in the $\text{Li}_2\text{O--B}_2\text{O}_3$ system // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2000. V. 40. P. 235–241.
9. Ota R., Soga N., Yogyo-Kyokai-Shi. Viscosity of binary alkali borates // Journal of the Ceramic Society of Japan. 1983. V. 91. № 6. P. 265–271 (in Japanese).
10. Nakashima K., Kawagoe T., Ookado T., Mori K. Viscosity of binary borate and ternary borosilicate Melts // Proceedings of the 5th Intern. Conf. on Molten Slags, Fluxes and Salts, Sydney, Australia, Jan. 5–8, 1997. Warrendale: Iron and Steel Society, 1997. P. 215–221.
11. Воларович М.П., Фридман Р.С. Исследование вязкости системы $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{--B}_2\text{O}_3$ в расплавленном состоянии // ЖФХ. 1937. Т. 9. № 2. С. 177–181.
12. Matusita K., Watanabe T., Kamiya K., Sakka S. Viscosities of Single and Mixed Alkali Borate Glasses // Phys. Chem Glasses. 1980. V. 21. P. 78–84.
13. Brosh I.E., Pelton A.D., Decterov S.A. A model to calculate the viscosity of silicate melts Part V: Borosilicate melts containing alkali metals // Int. J. of Mat. Res. 2012. V. 103. № 5. P. 537–550.
14. Coughanour L.W., Shartsis L., Shermer H.F. Viscosity, Density and Electrical Resistivity of Molten Alkaline-Earth Borate Glasses with 3 mol. % of Potassium Oxide // Journal of American Ceramic Society. 1958. V. 41. № 8. P. 324–329.

15. *Leedecke C.J., Clifton G.B.* Viscous flow in binary borate melts // *Matter Sci Res.* 1978. V. 12. P. 413–426.
16. *Li P.C., Anil C.Gh., Su G.-J.* Viscosity of molten rubidium and caesium borates // *Phys. Chem. Glasses.* 1960. V. 1. № 6. P. 202–203.
17. *Visser T.J.M., Stevels J.M.* Rheological properties of boric oxide and alkali borate glasses // *J. Non-Cryst. Solids.* 1972. V. 7. P. 376–394.
18. *Соловьев А.Н., Каплун А.Б.* Вибрационный метод измерения вязкости жидкостей. Новосибирск: Наука, 1970. 140 с.
19. *Штенгельмейер С.В., Прусов В.А., Бочегов В.А.* Усовершенствование методики измерения вязкости вибрационным вискозиметром // *Заводская лаборатория.* 1985. Т. 51. № 9. С. 56–57.
20. *Бэтчелор Дж.* Введение в динамику жидкостей / Пер. с англ. М.: Мир, 1973.
21. *Shartsis L., Capps W., Spinner S.* Density and Expansivity of alkali borates and density characteristics of some other binary glasses // *J. Am. Cer. Soc.* 1953. V. 36. № 2. P. 35–43.
22. *Li P.-C., Anil C.Gh., Su G.-J.* Letters to the Editor - Density of molten boron oxide, rubidium and caesium borates // *Phys. Chem. Glasses.* 1960. V. 1. P. 198–200.
23. *Кирсанов. Е.А., Матвеев В.Н.* Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем: Структурный подход. М.: Техносфера, 2016. 379 с.
24. *Демкин В.П., Мельничук С.В., Удуги В.В., Тютрин И., Руденко Т.В., Криницына Д.Б.* Определение вязкоупругих характеристик цельной крови на основе метода низкочастотной пьезотромбоэластографии // *Известия высших учебных заведений. Физика.* 2019. Т. 62. № 12. С. 55–62.
25. *Осипов А.А., Осипова Л.М., Быков В.Н.* Спектроскопия и структура щелочноборатных стекол и расплавов. Екатеринбург–Миасс: УрО РАН, 2009. 174 с.
26. *Konijnendijk W.L., Stevels J.M.* The structure of borate glasses studied by Raman scattering // *J. Non-Cryst. Solids.* 1975. V. 18. P. 307–331.
27. *Kamitsos E.I.* Modifying role of Alkali-metal Cations in Borate Glass Networks // *J. Phys. Chem.* 1989. V. 93. P. 1604–1611.
28. *Kamitsos E.I.* Cation-Network Interactions in Binary Alkali Metal Borate Glasses. A Far-Infrared Study // *J. Phys. Chem.* 1987. V. 91. P. 5807–5813.
29. *Осипов А.А., Осипова Л.М.* Структура стекол и расплавов системы $\text{Cs}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ по данным спектроскопии комбинационного рассеяния света <http://i.uran.ru/webcab/system/files/journalspdf/fizika-i-himiya-stekla/fizika-i-himiya-stekla-2014-t.40-n-4/20144.pdf> // *Физика и Химия стекла.* 2014. Т. 40. № 4. С. 521–534.
30. *Vegiri A., Varsamis C.-P. E., Kamitsos E.I.* Molecular dynamics investigation of mixed-alkali borate glasses: Short-range order structure and alkali-ion environments // *Phys. Rev. B.* 2009. V. 80. № 184202.
31. *Исакович М.А., Чабан И.А.* Распространение волн в сильновязких жидкостях // *ЖЭТФ.* 1966. Т. 50. № 5. С. 1343–1362.