

УДК: 666.1.001.5; 54.03

ЗАВИСИМОСТЬ МИКРОТВЕРДОСТИ СТЕКОЛ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2024 г. Тверьянович Ю. С.

*Институт химии Санкт-Петербургского государственного университета,
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 26
e-mail: y.tveryanovich@spbu.ru*

Поступила в редакцию 19.08.2023

Предложен метод расчета температурной зависимости микротвердости стекол в интервале температур от абсолютного нуля до температуры размягчения. Согласно модели, положенной в основу расчета, стекло переходит в пластическое состояние не только под действием температуры, но и под действием механических напряжений выше критической величины, соответствующей микротвердости. Поэтому при одновременном воздействии этих двух факторов стекло переходит в пластическое состояние в том случае, если сумма термической и механической энергии сетки стекла превышает критическую величину. Предложенный метод расчета опробован на примере органического стекла и двух наиболее важных для практики оксидных стекол: плавленого кварца и промышленного щелочно-силикатного стекла (soda lime silica glass).

Ключевые слова: стекла, микротвердость, температурная зависимость, теплоемкость, щелочно-силикатное стекло, кварцевое стекло, полистирол

DOI: 10.31857/S0132665124010058, **EDN:** SIINZJ

ВВЕДЕНИЕ

Стекла используются как оптические материалы, конструкционные материалы, могут совмещать эти функции, например в иллюминаторах глубоководных и летательных аппаратов. Они широко используются в области высоких технологий (запись информации, генерация и передача лазерного излучения) и т.д. Во всех случаях, кроме их функциональных свойств, важнейшее значение имеет прочность. Контакт стекла с другими предметами может привести к дефектам поверхности, оказывающим влияние не только на прочность изделий, но и на их оптические свойства. Поэтому важно иметь представление о поведении стекла при таком контакте. Возможность возникновения дефектов на поверхности стекла определяется его микротвердостью. Таким образом, микротвердость как мера сопротивления механическому воздействию на поверхность стекла является одним из важных механических свойств. Например, в работе [1] для описания процесса формирования трещин при механическом воздействии на стекла предложили модель, в которой величина ключевого параметра определяется, в частности, микротвердостью стекла (здесь и далее речь идет о микротвердости по Майеру, частным случаем которой является микротвердость по Виккерсу).

Учитывая важность такого параметра, как микротвердость, предпринимались многочисленные попытки связать ее величину с другими свойствами стекол, с их

химической структурой. В работе [2] отмечается, что микротвердость определяется средним координационным числом сетки стекла и энергией химических связей. Авторы [3] также отмечают связь микротвердости с химической структурой стекла, а именно указывают, что микротвердость стекла зависит от атомного радиуса образующих его элементов и плотности их упаковки. Авторы [4] на примере большого количества экспериментальных данных анализируют корреляции механических свойств стекол с такими параметрами химической структуры, как плотность упаковки атомов стекла, объемная плотность энергии химической связи атомов и связанная с ней температура размягчения.

Микротвердость определяется прочностью химических взаимодействий, формирующих сетку стекла, и их концентрацией. Эти же параметры определяют и температуру размягчения стекла. Это обстоятельство лежит в основе возможности сопоставления двух указанных свойств. Линейная взаимосвязь микротвердости (H) при комнатной температуре и температуры размягчения стекол (T_g) отмечается в большом количестве работ [5–10]. Причем эти работы посвящены не только халькогенидным стеклам [5, 6], но и другим группам стеклообразных материалов: оксидным стеклам [7, 8], органическим стеклам [9, 10]. Это указывает на общий характер взаимосвязи. Вместе с тем в [11, 12] отмечается, что более корректно рассматривать линейную взаимосвязь между H и приведенной температурой $T^* = \frac{T_g - T}{T_g}$, где T — температура, при которой произведено измерение

микротвердости. При этом не следует забывать, что сама температура размягчения, подобно микротвердости, находится в прямой взаимосвязи со средним координационным числом атомов в сетке стекла (см., например, [13]).

Формование большинства стеклянных изделий происходит при повышенных температурах. Даже после формования изделия температура поверхности стекла может быть достаточно высокой, так что механические свойства его поверхности будут отличаться от свойств при комнатной температуре. Контакт стекла при повышенных температурах может иметь место со стальными валками, поверхностями формы и, возможно, мелкими частицами, прилипшими к формовочному или транспортировочному оборудованию [14, 15]. Стеклянные изделия также могут подвергаться воздействию как повышенных, так и пониженных температур во время эксплуатации. К немногочисленным исследованиям результатов механического воздействия на стекло при повышенных температурах относится работа [16], в которой исследовали эрозионное поведение натрий-кальций-силикатного стекла, подвергнутого воздействию частиц SiC, от комнатной температуры до 680°C.

Однако в работе [17] отмечается немногочисленность исследований температурной зависимости микротвердости стекол. Согласно авторам [18], несмотря на наличие множества исследований твердости различных силикатных и боратных стекол при комнатной температуре, изучение температурной зависимости микротвердости стекол даже для таких важных для практики стекол, как силикатные, проведено лишь в нескольких работах. Это обусловлено сложностью подобных измерений.

В этой связи особое значение приобретает развитие моделей, описывающих поведение микротвердости стекол в широком интервале температур. Одним из возможных направлений таких исследований является установление количественной взаимосвязи микротвердости и свойств стекол, для измерения которых существует развитая приборная база.

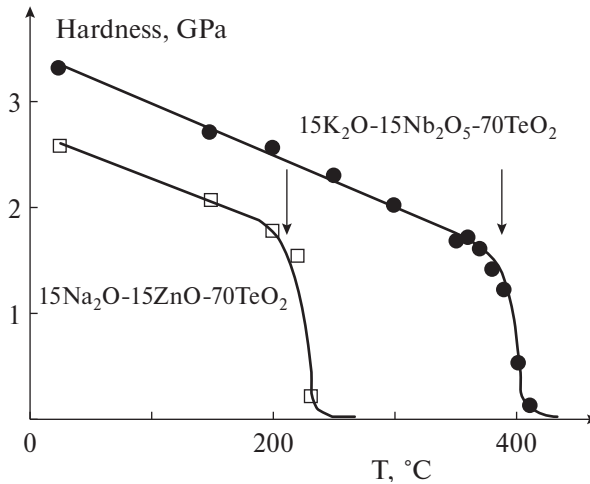


Рис. 1. Температурные зависимости микротвердости двух оксидных стекол [18]. Стрелками показана температура размягчения.

Имеющиеся в литературе температурные зависимости микротвердости стеклообразных материалов подчиняются общей закономерности. На рис. 1 приведены в качестве типичного примера температурные зависимости микротвердости двух оксидных стекол, построенные на основе результатов работы [18]. Аналогичные температурные зависимости микротвердости для других стекол представлены в работах, указанных в табл. 1. Они представляют собой линейные зависимости вплоть до температуры размягчения, которые сменяются резким падением микротвердости при дальнейшем повышении температуры. Экспериментальные результаты для температурных зависимостей микротвердости различных стекол обобщены в табл. 1. В ней указаны: вещество, температурный интервал проведенных измерений (ΔT), величина производной микротвердости по температуре (H') для линейного участка зависимости $H(T)$, значение микротвердости при температуре размягчения (H_g), температура размягчения стекла (T_g), температура перехода от линейного участка зависимости к резкому падению микротвердости (T_g^*) и ссылка на источник.

В табл. 1 представлены параметры температурных зависимостей микротвердости всех основных групп стеклообразных материалов: органических стекол, оксидных стекол, металлических стекол, халькогенидных стекол. Обращает на себя внимание следующее обстоятельство. В то время как величина H_g изменяется в широких пределах, производная микротвердости по температуре (H') изменяется в узком диапазоне.

Модельные представления

Остановимся подробнее на понятии микротвердости. При ее измерении индентор приводится в контакт с поверхностью стекла. Под действием постоянной нагрузки он погружается в объем стекла. На начальном этапе погружения индентора стекло претерпевает пластическую деформацию. Таким образом, поведение стекла под индентором в начальный период измерения аналогично поведению стекла в пластическом состоянии. По мере погружения индентора площадь его опоры увеличивается, а напряжение, создаваемое в стекле, уменьшается.

Табл. 1. Параметры температурных зависимостей микротвердости различных стекол

№	Вещество	DT (K)	-H' (MPa/K)	H_g (MPa)	T_g (K)	T_g^* (K)	источник
1	Полистирол	150–300	1,25	80	370	-	[22]
2	Упругий эпоксидный компаунд	225–300	3,37	210	257	252	[19]
3	Кварцевое стекло	300–670	1,1	7400 \diamond	1480	-	[20]
4	Полиметилметакрилат	300–430	0,82	135	390	395	[21]
5	Полистирол	300–400	0,54	153	371	374	[21]
6	10K ₂ O-20WO ₃ -70TeO ₂	300–620	4,6	1300	617	594	[18]
7	Щелочно-силикатное стекло (SLSG)	300–870	6,6	2400	828	813	[18]
8	15Na ₂ O-15ZnO-70TeO ₂	300–510	4,5	1800	537	493	[18]
9	15K ₂ O-15Nb ₂ O ₅ -70TeO ₂	300–690	5,0	1500	648	660	[18]
11	As _{0,3} Se _{99,7}	300–330	10,1	220	308	309	[23]
12	Pd ₄₀ Ni ₄₀ P ₂₀	100–470	2,26	5300	590	-	[28,24]
13	Zr _{41,2} Ti _{13,75} Cu _{12,5} Ni ₁₀ Be _{22,5}	300–570	2,46	5700	625	-	[27,24]
14	Zr ₅₅ Cu ₃₀ Al ₁₀ Ni ₅	100–570	2,08	4900	680	-	[25,26,24]
15	GeAsSe	300–623	0,87	1320	553	555	[29]
16	0,2PbO-0,6Bi ₂ O ₃ -0,2B ₂ O ₃	293–573	5,4	1700	523	505	[17]
17	0,2PbO-0,4Bi ₂ O ₃ -0,4B ₂ O ₃	293–650	5,6	2000	623	605	[17]
18	Щелочно-силикатное стекло (SLSG)	293–873	6,0	2800	823	780	[17]

Примечание. \diamond — результат экстраполяции.

При определенном напряжении упругое сопротивление стекла становится достаточным для удержания индентора. Пластическая деформация стекла завершена. Индентор перестает погружаться. Это значение напряжения, являющееся границей между пластическим и упругим поведением стекла, принимается за значение микротвердости. Аналогичное утверждение содержится и в [30]. Рассматривая измерение микротвердости, авторы отмечают, что критическая глубина внедрения индентора достигается, когда напряжение совпадает с пределом текучести материала, выше которого начинается пластическая деформация.

Важным является вывод, который можно сделать из вышесказанного: микротвердость можно рассматривать как напряжение перехода стекла в пластическое состояние.

Как известно, стекло переходит в пластическое состояние также и в результате воздействия температуры. Следовательно, при индентировании стекло переходит в пластическое состояние в результате суммарного действия механических напряжений и температуры. Для суммирования этих двух воздействий необходимо выбрать их общую меру. Общей универсальной мерой является энергия. Поэтому будем исходить из того, что стекло при индентировании переходит в пластическое состояние, если сумма тепловой энергии при некоторой температуре $T(Q)$ и энергии механического напряжения (w) превосходит критическую величину (W_s). Идея взаимосвязи температурных зависимостей микротвердости и тепло-содержания стекла была впервые сформулирована и апробирована на примере селена в [31].

На самом деле все обстоит несколько сложнее. Проводимое рассмотрение относится к температурному интервалу от абсолютного нуля до температуры

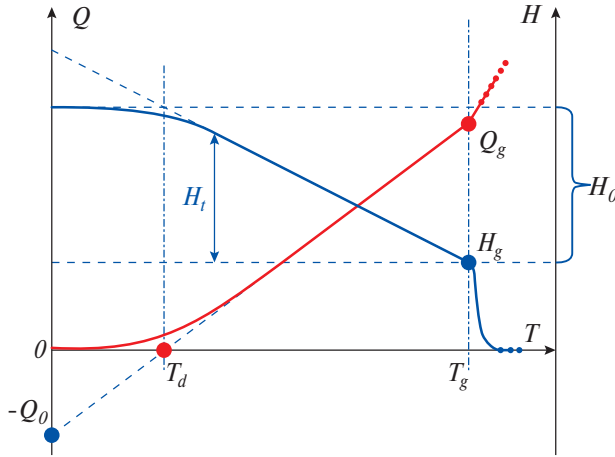


Рис. 2. Схематическое изображение зависимости от температуры энергии тепловых колебаний решетки стекла: (Q) — красная линия и микротвердости (H) — синяя линия. Используемые обозначения пояснены в тексте.

размягчения стекла. Достижение температуры размягчения означает не переход в пластичное, размягченное в буквальном смысле этого слова состояние, а начало короткого переходного процесса от упругого состояния к пластическому. Именно поэтому различают температуру размягчения и температуру деформации стекла. При T_g , как видно на рис. 1, стекло имеет отличную от нуля микротвердость (H_g). Величина H_g индивидуальна для каждого конкретного стекла (см. табл. 1).

Введем следующие обозначения (см. рис. 2):

$$H(T_g) \equiv H_g; \quad H(T) \equiv H \equiv H_t + H_g. \quad (1)$$

Иными словами, температурную зависимость микротвердости при температурах ниже T_g будем представлять как сумму температурно независимой величины микротвердости при T_g (H_g) и слагаемого, зависящего от температуры H_t , где температура t изменяется в интервале от 0 К до T_g . При этом H_t изменяется от максимального значения (H_0) до нуля. В дальнейшем сосредоточим свое внимание на нахождении возможности определения температурной зависимости H_t .

Будем исходить из того, что микротвердость определяется сдвиговыми напряжениями. Действительно, в монографии [32] прямо указано, что микротвердость — это мера сопротивления сдвигу. В более поздней монографии [33] в разделе 9.3 указано, что среднее давление между индентором и образцом прямо пропорционально напряжению течения и что именно сдвиговая составляющая напряжения отвечает за пластическое течение. Согласно [30], микротвердость является мерой сопротивления деформациям сдвига в условиях изотропного сжатия.

Как известно, энергия механического напряжения сдвига (см., например, [34]) при механическом напряжении H в пересчете на объем моля стекла равна:

$$w_t = \frac{V \cdot H^2}{2G_t}, \quad (2)$$

где G_t — значение модуля сдвига при той же температуре, что и микротвердости $H = (H_t + H_g)$; V — объем моля стекла.

Согласно многочисленным литературным данным, модуль сдвига и микротвердость в некотором приближении пропорциональны друг другу. Так, в [35] показано, что для диборидов металлов выполняется соотношение $G = 8H$. В [36] указывается, что для силикатных стекол справедливо равенство $G = 5H_v$ (H_v – микротвердость по Виккерсу), для ковалентных кристаллов $G = 6.8H_v$, для металлических стекол $G = 6.9H_v$. Для силикатных окси-нитридных стекол $G = 4.66H_v$ [37], а для алюмосиликатных стекол $G = 6.06H_v$ [38]. Тогда выражение (2) можно переписать следующим образом:

$$w_t = \gamma V (H_t + H_g), \quad (3)$$

где $\gamma \equiv \frac{H}{2G}$ – величина, слабо изменяющаяся для группы близких по свойствам веществ.

Рассмотрим более подробно, как следует учитывать вклады энергии механического напряжения (w_t) и энергии тепловых колебаний (Q_t) в суммарную энергию, которая при значении W_s приводит к переходу стекла в пластическое состояние. Оба этих вклада будем рассчитывать на моль вещества. Предыдущее выражение позволяет определить механическую энергию деформации твердого тела вдоль одного из шести возможных направлений. Допустим, что эта энергия составляет, к примеру, половину от величины, необходимой для перехода к пластическому состоянию. Если такую же величину энергии деформации приложить в перпендикулярном направлении (или, тем более, в противоположном направлении), то это не означает, что стекло перейдет в пластическое состояние. Для перехода стекла в пластическое состояние необходимо механическое напряжение с нужной величиной энергии приложить вдоль определенного направления. Энергия же тепловых колебаний создает равные напряжения химических связей, как положительные, так и отрицательные вдоль трех независимых осей. Поэтому между энергией механических напряжений, приводящих стекло к пластическому состоянию при абсолютном нуле, и тепловой энергией, приводящей стекло к пластическому состоянию при отсутствии механических напряжений, существует следующее соотношение:

$$w_0 = \frac{1}{6} Q_g. \quad (4)$$

При этом $Q_t \equiv \int_0^T C_p(T) dT$,

где C_p – теплоемкость моля стекла.

Итак, запишем выражение для энергии перехода в пластическое состояние для трех случаев: произвольной температуры, температуры размягчения стекла и температуры, равной абсолютному нулю. При этом следует учесть (см. выше), что тепловая энергия распределяется между шестью направлениями деформации межатомных связей (сжатие и растяжение вдоль трех осей), в то время как механическое напряжение деформирует связи вдоль одного направления. Поэтому:

$$6\gamma V (H_t + H_g) + Q_t = Q_g + 6\gamma V H_g = 6\gamma V (H_0 + H_g)$$

или

$$6\gamma V H_t + Q_t = Q_g = 6\gamma V H_0. \quad (5)$$

Из первого равенства (5) получим:

$$H_t = \frac{Q_g - Q_t}{6\gamma V}, \quad (6)$$

Подставив выражение для Q_t из второго равенства (5), получим:

$$H_t = \frac{Q_g - Q_t}{Q_g} H_0. \quad (7)$$

Уравнения для расчета температурной зависимости микротвердости при температурах выше температуры Дебая

Для большинства стекол температура Дебая ниже комнатной температуры и тем более ниже T_g . Поэтому для высокотемпературной области существования стекла (для температур выше температуры Дебая) теплоемкость в некотором приближении можно считать независимой от температуры. Иными словами, справедливо приближенное равенство $Q_t \cong -Q_0 + C_p T$ (см. рис. 2). Из уравнения (6) получаем

$$H_t = \frac{C_p}{6\gamma V} (T_g - T). \quad (8)$$

Из уравнения (8), введя обозначение $\frac{Q_0}{C_p} \equiv T_d$ (см. рис. 2), получим:

$$H_t = \frac{T_g - T}{T_g - T_d} \cdot H_0. \quad (9)$$

Все изложенное иллюстрирует рис. 2.

Из уравнения (8) следует, что величина производной микротвердости по температуре (H') определяется теплоемкостью, мольным объемом и отношением микротвердости к модулю сдвига стекла. Все эти параметры слабо зависят от состава стекла. Отсюда становится понятна причина того, что величина H' в табл. 1 незначительно отличается для столь разных по своей природе групп стекол. Кроме того, становится ясным, что если производная H' примерно одинакова для всех стекол, то микротвердость стекла при комнатной температуре будет определяться в основном параметром H_g даже в случае предельно высокой температуры размягчения, намного превосходящей комнатную температуру. Это также хорошо видно из табл. 1.

Из изложенного ясно, что для расчета температурной зависимости микротвердости во всем температурном диапазоне существования стекла необходимо знать (см. уравнения 1 и 6) микротвердость при температуре размягчения, отношение микротвердости к модулю сдвига при комнатной температуре, мольный объем (или плотность) и температурную зависимость удельной теплоемкости (или энтропии). Для температур выше температуры Дебая достаточно знать значение теплоемкости при комнатной температуре:

$$H' = -\frac{C_p}{6V} = -\frac{G \cdot C_p}{3V \cdot H}. \quad (10)$$

Примеры практического использования предложенных уравнений

Проверим применимость предложенного подхода на трех конкретных примерах. Во всех трех случаях для расчета температурной зависимости микротвердости $H(T)$ (см. уравнение (1)) рассчитывалась температурная зависимость H_t ,

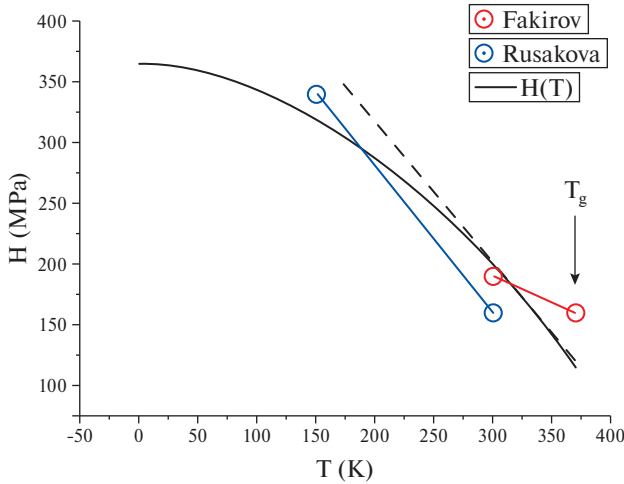


Рис. 3. Зависимость микротвердости polystyrene от температуры. Пунктирной линией нанесена рассчитанная по уравнению (10) для комнатной температуры производная микротвердости по температуре, сплошной линией — рассчитанная температурная зависимость микротвердости. Стрелка указывает температуру размягчения polystyrene. \circ — крайние точки экспериментальной линейной температурной зависимости микротвердости, полученной в [21]. \circ — крайние точки экспериментальной линейной температурной зависимости микротвердости, полученной в [22].

а параметр H_g варьировался с целью получения максимально возможного совпадения с литературными экспериментальными данными по температурной зависимости микротвердости. Из литературных данных по теплоемкости соответствующего стекла находилась температурная зависимость Q_t , включая значение параметра Q_g . Параметр H_0 из уравнения (7) рассчитывался с использованием литературных данных по отношению микротвердости к модулю сдвига и мольному объему (см. уравнение (5)).

В случае полистирола имеются экспериментальные данные по температурной зависимости теплоемкости начиная с гелиевых температур [39]. Используя их, вычислили функцию $\frac{Q_g - Q_t}{Q_g}$ (уравнение (7)). Температурная зависимость Q_t получена интегрированием зависимости $C_p(T)$. Для расчета величины H' при комнатной температуре (пунктир на рис. 3) использованы экспериментальные данные по микротвердости [40] и модулю сдвига [41], а также данные по плотности и теплоемкости [42, 43]. Таким образом, найдена температурная зависимости H_t во всем температурном интервале от абсолютного нуля до T_g . Для построения зависимости $H(T)$ единственный свободный параметр H_g был выбран таким образом (см. выше), чтобы результат совпал с уже упомянутыми выше литературными данными по температурной зависимости микротвердости полистирола [21, 22] (см. рис. 3).

Аналогичные расчеты были проведены для двух важнейших оксидных стекол. Речь идет о стеклообразном кварце, являющемся базовым компонентом всех силикатных стекол, а также о щелочно-силикатном стекле (soda — lime — silica glass — SLSG) — наиболее массово производимом промышленностью стекле.

Для расчета температурной зависимости микротвердости стеклообразного SiO_2 (см. рис. 4, а) литературные данные по теплоемкости были взяты из [44]. Эта обзорная работа содержит и все остальные необходимые для расчета

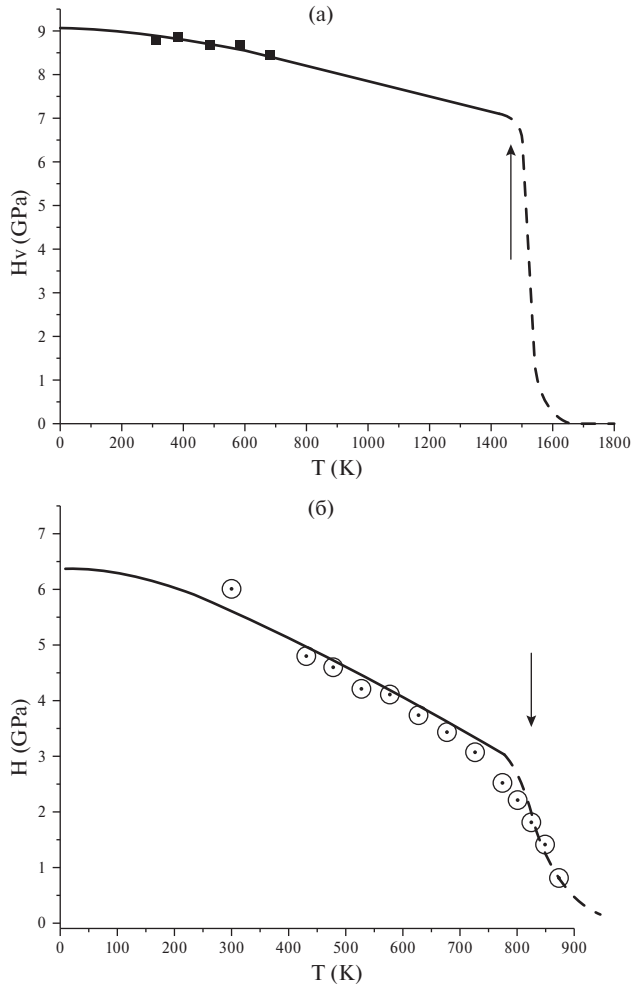


Рис. 4: а — температурная зависимость микротвердости кварцевого стекла. Точками указаны экспериментальные данные [46]; б — температурная зависимость микротвердости щелочно-силикатного стекла (soda — lime — silica — glass). Точками указаны экспериментальные данные [49]. Стрелкой отмечена T_g . Сплошная красная линия — рассчитанная температурная зависимость микротвердости, пунктирная — гипотетическое падение микротвердости выше температуры размягчения.

экспериментальные данные. Данные по температурной зависимости теплоемкости кварца и метод ее расчета также опубликованы в [45]. Результаты расчета были сопоставлены с данными по температурной зависимости микротвердости от комнатной температуры до 400°C , взятыми из работы [46].

При расчете температурной зависимости микротвердости щелочно-силикатного стекла (SLSG, рис. 4, б) данные по температурной зависимости теплоемкости взяты из работы [47]. Были также использованы экспериментальные данные по модулю сдвига и плотности [48]. Результаты расчета температурной зависимости микротвердости были сопоставлены с экспериментальными данными [49]. Близкие результаты по температурной зависимости микротвердости приведены в [50].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модель, согласно которой стекло переходит в пластическое состояние, если сумма тепловой энергии сетки стекла и механической энергии, созданной внешним механическим воздействием, превышает критическую величину. Предложенная модель позволила вывести уравнение, с помощью которого можно рассчитать температурную зависимость микротвердости стекла во всем температурном интервале его существования. Справедливость этого уравнений проверена на примере трех стекол. Одно из них является органическим стеклом — это полистирол. Второе — плавленый кварц, являющийся основным компонентом всех силикатных стекол. Третье стекло, щелочно-силикатное (SLSG), является наиболее массово производимым оксидным стеклом.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cook R.F., Pharr G.M. Direct Observation and Analysis of Indentation Cracking in Glasses and Ceramics // J. Am. Ceram. Soc. 1990. V. 73. № 4. P. 787–817.
2. Guin J.-P., Rouxel T., Sangleboeuf J.-C. Hardness, Toughness, and Scratchability of Germanium-Selenium Chalcogenide Glasses // J. Am. Ceram. Soc. 2002. V. 85. № 6. P. 1545–1552.
3. El-Zaidia M.M., El-Gohary Z.H., Abo-Ghazala M.S., Turky G.M., Rabea E.A. Mechanical Properties of Chalcogenide Optic Fiber Material Based Tellurium // IOSR Journal of Applied Physics. 2019. V. 11. № 1. P. 55–61.
4. Rouxel T. Elastic Properties and Short-to Medium-Range Order in Glasses // J. Am. Ceram. Soc. 2007. V. 90. № 10. P. 3019–3039.
5. Freitas J., Shimakawa K., Kugler S. Some remarks on the glass-transition temperature in chalcogenide glasses: a correlation with the microhardness ruben // Chalcogenide Letters. 2013. V. 10. № 1. P. 39–43.
6. Kugler S., Shimakawa K. Amorphous Semiconductors. Cambridge University Press. 2015. P. 147.
7. Balta-Calleja F.J., Sanditov D.S., Privalko V.P. Review: the microhardness of non-crystalline materials // J. Mater. Sci. 2002. V. 37. № 21. P. 4507–4516.
8. Fakirov S. The Relationship Between the Microhardness and Glass Transition Temperature of Inorganic Glasses Compared with Polymeric Glasses // Int. J. Polymeric Mat. and Polymeric Biomaterials. 2005. V. 54. № 12. P. 1185–1189.
9. Fakirov S., Balta-Calleja F.J., Krumova M. On the Relationship between Microhardness and Glass Transition Temperature of Some Amorphous Polymers // J. Polymer Science: Part B: Polymer Physics. 1999. V. 37. № 13. P. 1413–1419.
10. Slouf M., Strachota B., Strachota A., Gajdosova V., Bertschova V., Nohava J. Macro-, Micro- and Nanomechanical Characterization of Crosslinked Polymers with Very Broad Range of Mechanical Properties // Polymers. 2020. V. 12. № 2951. 26 p.
11. Tveryanovich Yu.S. On the Correlation of the Microhardness and Softening Temperature for Chalcogenide Glasses // Glass Physics and Chemistry. 2022. Vol. 48. No. 1. P. 72–74.
12. Tveryanovich Yu.S. The Relationship between Microhardness and Glass Transition Temperature of Chalcogenide Glasses // Glass Physics and Chemistry. 2022. Vol. 48. № 4. P. 243–247.
13. Mitkova M., Wang Yu., Boolchand P. Dual Chemical Role of Ag as an Additive in Chalcogenide Glasses // Physical Review Letters. 1999. V. 83. № 19. P. 3848–3851.

14. *Varshneya A.K.* Fundamentals of inorganic glasses. San Diego. Academic Press. 1994. P. 187.
15. *Shelby J.E.* Introduction to glass science and technology. Cambridge, UK. The Royal Society of Chemistry. 1997. 188 p.
16. *Wiederhorn S.M., Hockey B.J.* Hot erosion of glass // *J. of Non-Cryst. Sol.* 1980. V. 38–39. № 1. P. 433–438.
17. *Watanabe T., Muratsubaki K., Benino Y., Saitoh H., Komatsu T.* Hardness and elastic properties of Bi₂O₃-based glasses // *J. of Materials Science.* 2001. V. 36. P. 2427–2433.
18. *Watanabe T., Benino Y., Ishizaki K., Komatsu T.* Temperature Dependence of Vickers Hardness for TeO₂-Based and Soda-Lime Silicate Glasses // *Journal of the Ceramic Society of Japan.* 1999. V. 107. № 12. P. 1140–1145.
19. *Fomenko L.S., Lubenets S.V., Natsik V.D., Prokhvatilov A.I., Galtsov N.N., Li Q.Q., Koutsos V.* Investigation of the low-temperature mechanical behavior of elastomers and their carbon nanotube composites using microindentation // *Fiz. Nizk. Temp.* 2019. V. 45. P. 663–672.
20. *Beake B.D., Smith J. F.* High-temperature nanoindentation testing of fused silica and other materials // *Phil. Mag. A.* 2002. V. 82. № 10. P. 2179–2186.
21. *Fakirov S., Krumova M., Krasteva B.* On the temperature dependence of microhardness of some glassy polymers // *J. of Materials Science Letters.* 2000. V. 19. P. 2123–2125.
22. *Rusakova H.V., Fomenko L.S., Lubenets S.V., Natsik V.D.* Low-Temperature Features of the Micromechanical Properties of Polystyrene // *Fiz. Nizk. Temp.* 2019. V. 45. P. 1538–1548.
23. *Kasap S.O., Yannacopoulos S.* Mechanical and thermal properties of the glassy semiconductor chlorinated Se_{0.997}As_{0.003} used as an X-ray imaging material // *Can. J. Phys.* 1989. V. 67. P. 686–693.
24. *Keryvin V., Korimilli P.E., Gueguen Y., Sangleboeuf J.-C., Ramamurty U.* Temperature dependence of mechanical properties and pressure sensitivity in metallic glasses below glass transition // *Philosophical Magazine.* 2008. V. 88. № 12. P. 1773–1790.
25. *Vaillant M.L., Keryvin V., Rouxel T., Kawamura Y.* // *Scripta Mater.* 2002. V. 47. № 1. P. 19.
26. *Keryvin V., Bernard C., Sangleboeuf J.-C., Yokoyama Y., Rouxe T.* Toughness of Zr₃₅Cu₃₀Al₁₀Ni₅ bulk metallic glass for two oxygen levels // *J. Non-Cryst. Sol.* 2006. V. 352. № 26–27. P. 2863.
27. *Peker A., Johnson W.L.* A Highly Processable Metallic Glass: Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10.0}Be_{22.5} // *Appl. Phys. Letters.* 1993. V. 63. P. 2342–2344.
28. *Donovan P.* Plastic flow and fracture of Pd₄₀Ni₄₀P₂₀ metallic glass under an indenter // *J. Mater. Sci.* 1989. V. 24. P. 523–535.
29. *Le Bourhis E., Gadaud P., Guin J.-P., Tournier N., Zhang X.H., Lucas J., Rouxel T.* Temperature dependence of the mechanical behavior of a GeAsSe glass // *Scripta Materialie.* 2001. V. 45. P. 317–323.
30. *Calleja F.J.B., Sanditov D.S., Privalko V.P.* Review: the microhardness of non-crystalline materials // *Journal of Materials Science.* 2002. V. 37. P. 4507–4516.
31. *Shunbo W., Tver'yanovich Yu.S.* Relationship of Temperature Dependences of Microhardness and Enthalpy of Glass on the Example of Selenium // *Glass Physics and Chemistry.* 2023. V. 49. № 4. P. 336–339.
32. *Andrievskii R.A., Lanin A.G., Rymashevskii G.A.* Prochnost' tugoplavkikh soedinenii (Strength of Refractory Compounds). Moscow: Metallurgiya, 1974. 232 p.
33. *Fischer-Cripps A. C.* Introduction to Contact Mechanics. Second Edition. New York. Springer, 2007. 221 p.
34. *Gere J.M., Timoshenko S.P.* Mechanics of Materials. GB: Stanley Thornes, 1999. 913 p.
35. *Chung H.-Y., Weinberger M.B., Yang J.-M., Tolbert S.H., Kaner R.B.* Correlation between hardness and elastic moduli of the ultraincompressible transition metal diborides RuB₂, OsB₂, and ReB₂ // *Appl. Phys. Letters.* 2008. V. 92. № 261904.
36. *Rouxel T.* What we can learn from crystals about the mechanical properties of glass // *J. of the Ceramic Society of Japan.* 2022. V. 130. № 8. P. 519–530.

37. *Yamane M., Mackenzie J.D.* Vicker's Hardness of glass // *J. of Non-Cryst. Sol.* 1974. V. 15. № 2. P. 153–164.
38. *Ali S.* Properties and Hardness of Mixed Alkaline Earth Silicate Oxynitride Glasses // *Materials*. 2022. V. 15. P. 5022.
39. *Marti E., Kaisersberger E., Moukhina E.* Heat capacity functions of polystyrene in glassy and in liquid amorphous state and glass transition DSC and TMDSC study // *J. of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2006. V. 85. № 2. P. 505–525.
40. *Katara R., Bajpai R., Datt S.C.* Microhardness of Blends of Polystyrene and Polymethyl methacrylate // *Polymer Testing*. 1991. V. 10. P. 139–143.
41. <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/polystyrene>
42. <https://polymerdatabase.com/polymers/polystyrene.html>
43. <https://srdata.nist.gov/JPCRD/jpcrd202.pdf>; <https://pubs.usgs.gov/of/1994/0671/report.pdf>
44. *Fanderlik I.* 4 — Physical and Chemical Properties of Silica Glasses // *Glass Science and Technology*. 1991. V. 11. P. 194–270.
45. *Sharp D.E., Ginther L.B.* Effect of Composition and Temperature on the Specific Heat of Glass // *J. of the Amer. Ceramic Society*. 1951. V. 34. № 9. P. 260–271.
46. *Beake B.D., Smith J.F.* High-temperature nanoindentation testing of fused silica and other materials // *Phil. Mag. A*. 2002. V. 82. № 10. P. 2179–2186.
47. *Huang J., Gupta P.K.* Temperature dependence of the isostructural heat capacity of a soda lime silicate glass // *J. of Non-Cryst. Sol.* 1992. V. 139. P. 239–247.
48. *Cachiaras A., Gilde L., Swab J.J., Patel P.J., Quinn G.D.* Soda-Lime-Silicate Float Glass: A Property Comparison. US Army Research Laboratory. 2017. TR-8187.
49. *Watanabe T., Benino Y., Ishizaki K., Komatsu T.* Temperature Dependence of Vickers Hardness for TeO₂-Based and Soda-Lime Silicate Glasses // *J. of the Ceramic Society of Japan*. 1999. V. 107. № 1252. P. 1140–1145.
50. *Wilantewicz T.E., Varner J.R.* Vickers indentation behavior of several commercial glasses at high temperatures // *J. Mater. Sci.* 2008. V. 43. P. 281–298.

Информация об авторе:

Тверьянович Юрий Станиславович

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4343-9817>.