

## Коэффициент Пуассона и пластичность стекол

© Д.С. Сандитов,<sup>1,2</sup> В.В. Мантатов,<sup>1</sup> Б.Д. Сандитов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Бурятский государственный университет,  
670000 Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия

<sup>2</sup> Отдел физических проблем Бурятского научного центра СО РАН,  
670047 Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия  
e-mail: Sanditov@bsu.ru

(Поступило в Редакцию 19 июня 2008 г.)

При анализе экспериментальных данных обнаружена закономерная связь между коэффициентом Пуассона и пластическими характеристиками неорганических стекол.

PACS: 05.70.-a

### Введение

Коэффициент Пуассона  $\mu$  как параметр линейной теории упругости в принципе не должен зависеть от неупругих свойств твердых тел. Тем не менее установлена определенная взаимосвязь между  $\mu$  и пластической деформацией металлов при растяжении (относительным удлинением)  $\varepsilon_y$  [1]

$$\mu = 0.25 + 0.3\varepsilon_y^{3/2}.$$

У таких мягких и пластичных металлов, как золото ( $\mu = 0.420$ ), серебро ( $\mu = 0.379$ ), медь ( $\mu = 0.340$ ), с высокими значениями коэффициента Пуассона пластическая деформация составляет  $\varepsilon_y \cong 0.50-0.55$ , а у стали, с низким значением коэффициента Пуассона ( $\mu = 0.26$ ), она равна  $\varepsilon_y = 0.21$  [1]. Вместе с увеличением  $\mu$  уменьшается твердость по Бринеллю  $H_B$  (рис. 1), которая для металлов, как известно, однозначно связана с пределом текучести (пластичности)  $H_B/\sigma_y \cong 3$ .

У бездефектных высокопрочных неорганических стекол, у которых предел текучести  $\sigma_y$  меньше предела прочности  $\sigma_B$ , наблюдается пластическая деформация [2].

Условие  $\sigma_y < \sigma_B$  выполняется при испытании стекол на микротвердость. При микровдавливании заостренных инденторов в виде алмазного конуса или пирамиды, а также сферы с малым радиусом напряженное состояние локализуется в малом микрообъеме, линейные размеры которого, как правило, меньше средних расстояний между поверхностными микротрещинами. Поэтому на результаты измерений микротвердости стекол не влияют микротрещины и подобные им дефекты. После снятия индентора в стекле остается пластичный микроотпечаток, который внешне практически ничем не отличается от такового в металлах [3]. Поэтому пластичность стекол удобно изучать с помощью метода микротвердости.

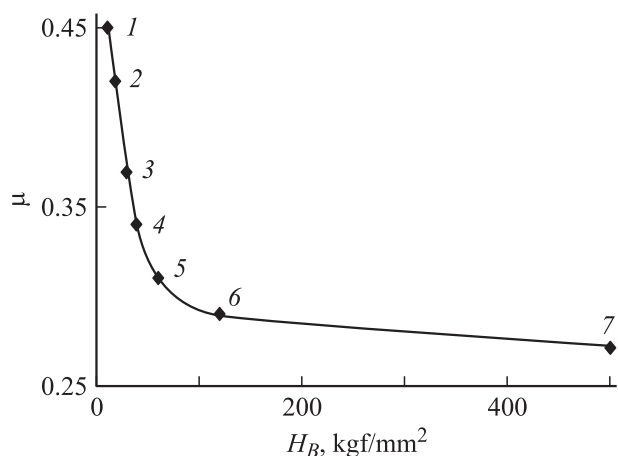
Настоящая работа посвящена изучению взаимосвязи между коэффициентом Пуассона и пластическими свойствами стекол.

### Коэффициент Пуассона и предел текучести

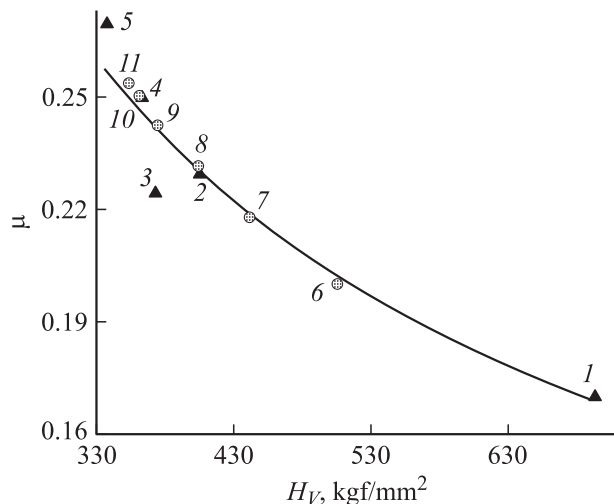
Так же как и у кристаллов, микротвердость стекол пропорциональна пределу текучести:  $H_V/\sigma_y \cong \text{const} \cong 1.6$  [4]. Поэтому она может служить характеристикой пластичности стекол: по порядку величины микротвердость равна пределу текучести.

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента Пуассона щелочно-силикатных стекол от микротвердости по Виккерсу. Как видно из этой зависимости, чем больше  $\mu$ , тем меньше  $H_V$ , т.е. тем при меньшем механическом напряжении  $\sigma_y$  начинается пластическая деформация, что аналогично случаю с металлами (рис. 1).

Кварцевое стекло  $\text{SiO}_2$  характеризуется низким коэффициентом Пуассона  $\mu = 0.17$  и высокой микротвердостью  $H_V \cong 700 \text{ Kgf/mm}^2$ . Введение щелочного окисла в  $\text{SiO}_2$  приводит к резкому уменьшению микротвердости и росту коэффициента Пуассона (рис. 2). Например, при изменении содержания окиси калия  $\text{K}_2\text{O}$  в калиевосиликатном стекле  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  с 0 до 26 mol.% величина  $\mu$  растет с  $\mu = 0.17$  до 0.27, а микротвердость



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента Пуассона от твердости по Бринеллю для металлов [1]: 1 — Pb, 2 — Au, 3 — Ag, 4 — Cu, 5 — Ni, 6 — сталь мягкая, 7 — сталь закаленная.



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента Пуассона от микротвердости по Виккерсу  $H_V$  для кварцевого стекла  $\text{SiO}_2$  и щелочно-силикатных стекол; 1 —  $\text{SiO}_2$ , 2–5 — стекла  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  с содержанием  $\text{K}_2\text{O}$ , mol.%.: 2 — 12.1, 3 — 15.8, 4 — 19.6, 5 — 26.4; 6–11 — стекла  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  с содержанием  $\text{Na}_2\text{O}$ , mol.%.: 6 — 11.8, 7 — 15.7, 8 — 19.5, 9 — 23.3, 10 — 27, 11 — 30.8.

падает с  $H_V = 700$  до  $337 \text{ Kgf/mm}^2$  [5,6]. Такое изменение механических свойств при переходе от кварцевого стекла  $\text{SiO}_2$  к щелочно-силикатным стеклам  $\text{R}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  принято объяснять образованием немостиковых ионов кислорода  $\text{O}^-$ , к которым присоединяются ионы щелочных металлов  $\text{R}^+$ . Происходит переход от сеточной ( $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ ) к линейно-разветвленной структуре с ионной группировкой [3,6]



Поэтому у щелочно-силикатных стекол предел текучести значительно ниже, чем у кварцевого стекла.

### Коэффициент Пуассона и пластическая деформация

Из модели возбужденного состояния [7] следует, что пластическая деформация стекол  $\epsilon_y$ , соответствующая пределу текучести  $\sigma_y$ , в первом приближении обратно пропорциональна решеточному параметру Грюнайзена  $\gamma_L$ , характеризующему агармонизм колебаний решетки и нелинейность силы межатомного взаимодействия

$$\epsilon_y \cong \frac{c}{\gamma_L}, \tag{1}$$

где  $c$  — коэффициент пропорциональности.

В свою очередь у стеклообразных твердых тел параметр  $\gamma_L$  является функцией коэффициента Пуассона [8,9]

$$\gamma_L \cong 0.8 \left( \frac{1 + \mu}{1 - 2\mu} \right). \tag{2}$$

Наряду с этой зависимостью предложена аналогичная, но несколько иная функция [10]

$$\gamma_L = 0.75 \left( \frac{1 + \mu}{1 - 1.5\mu} \right). \tag{3}$$

В данной работе использовано соотношение (2).

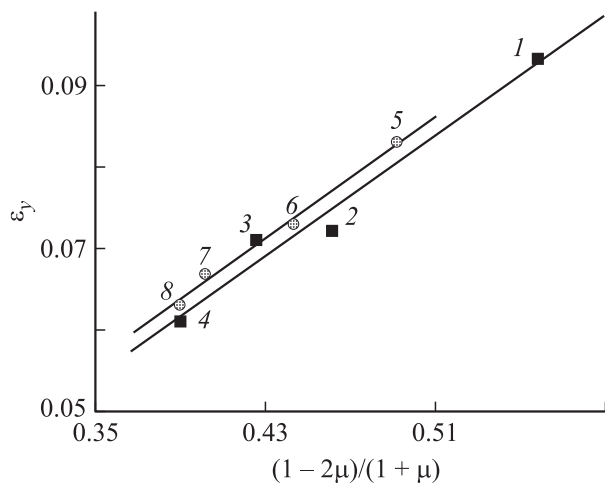
Из выражений (1) и (2) следует связь между пластической деформацией стекол и коэффициентом Пуассона в виде

$$\epsilon_y \cong c_1 \left( \frac{1 - 2\mu}{1 + \mu} \right), \tag{4}$$

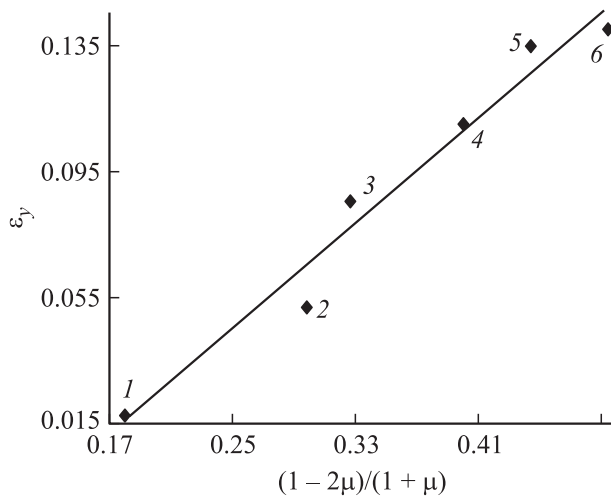
где  $c_1 = 1.25c$  — эмпирическая постоянная, не зависящая от  $\mu$ . Для проверки этой зависимости  $\epsilon_y(\mu)$  необходимо определить величину  $\epsilon_y$ . В первом приближении, полагая  $\sigma_y \approx H_V$ , за меру пластической деформации неорганических стекол можно принять отношение микротвердости к модулю упругости

$$\epsilon_y \approx \frac{\sigma_y}{E} \approx \frac{H_V}{E}. \tag{5}$$

После оценки таким образом  $\epsilon_y$ , для ряда стекол были построены графики в координатах  $\epsilon_y - (1 - 2\mu)/(1 + \mu)$ . Как видно из рис. 3 и 4, для натриевосиликатных, натриевогерманатных и халькогенидных стекол зависимость  $\epsilon_y(\mu)$  в указанных координатах оказывается линейной, что подтверждает для них справедливость соотношения (4).



**Рис. 3.** Зависимость пластической деформации натриевосиликатных (квадраты) и натриевогерманатных (кружки) стекол  $\epsilon_y$  от функции коэффициента Пуассона  $(1 - 2\mu)/(1 + \mu)$ . 1 —  $\text{SiO}_2$ , 2–4 — стекла  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  с содержанием  $\text{Na}_2\text{O}$ , mol.%.: 2 — 16, 3 — 20, 4 — 33.5; 5 —  $\text{GeO}_2$ ; 6–8 — стекла  $\text{Na}_2\text{O}-\text{GeO}_2$  с содержанием  $\text{Na}_2\text{O}$ , mol.%.: 6 — 5, 7 — 20, 8 — 30.



**Рис. 4.** Зависимость  $\epsilon_\gamma$  от функции коэффициента Пуассона  $(1 - 2\mu)/(1 + \mu)$  для халькогенидных стекол: 1 — As<sub>10</sub>S<sub>90</sub>, 2 — As<sub>20</sub>S<sub>80</sub>, 3 — As<sub>28</sub>S<sub>72</sub>, 4 — Ge<sub>13</sub>As<sub>24</sub>S<sub>63</sub>, 5 — Ge<sub>26</sub>Sb<sub>8</sub>S<sub>66</sub>, 6 — Ge<sub>32</sub>As<sub>2</sub>S<sub>66</sub>.

Таким образом, приведенные результаты указывают на факт существования закономерной связи между коэффициентом Пуассона (коэффициентом поперечной деформации) и пластическими свойствами ряда стеклообразных твердых тел.

## Заключительные замечания

Приходится признать, что в настоящее время нет полной ясности относительно природы коэффициента Пуассона (см., например, [9–14]). Особенность выражений (2) и (3) заключается в том, что гармонический линейный параметр теории упругости  $\mu$  оказывается однозначной функцией параметра Грюнайзена — сугубо ангармонической нелинейной величины. Между тем принято считать, что ангармонический и гармонический коэффициенты в разложении потенциальной энергии решетки по деформации являются независимыми параметрами.

Не так давно был получен полимерный материал с отрицательным коэффициентом поперечной деформации  $\mu = -0.7$  [14]. Это означает, что при одноосном растяжении стержня из такого материала происходит его поперечное расширение, а не сжатие, как принято считать в физике твердого тела.

Так что связь коэффициента Пуассона с пластичностью твердых тел не является единственным необычным явлением, касающимся коэффициента поперечной деформации.

По-видимому, тот факт, что  $\mu$  определяется деформациями материала, происходящими одновременно во взаимно перпендикулярных направлениях, выражает своеобразную зависимость  $\mu$  от интенсивности развития процессов неупругости в деформируемом теле [11].

## Список литературы

- [1] Черкасов И.И. // ЖТФ. 1952. Т. 22. Вып. 11. С. 1834–1837.
- [2] Бартнев Г.М. Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стекла. М.: Стройиздат, 1974. 240 с.
- [3] Сандитов Д.С., Бартнев Г.М. Физические свойства неупорядоченных структур. Новосибирск: Наука, 1982. 259 с.
- [4] Сандитов Д.С. // Изв. вузов. Физика. 1969. № 10. С. 110–115.
- [5] Мазурин О.В., Стрельцина М.В., Швайко-Швайковская Т.Н. Свойства стекол и стеклообразующих расплавов. Справочник. Т. 1. Л.: Наука, 1973. 444 с.
- [6] Бокин П.Я. Механические свойства силикатных стекол. Л.: Наука, 1970. 180 с.
- [7] Сандитов Д.С. // Высокомолек. соед. А. 2005. Т. 47. № 3. С. 478–489.
- [8] Сандитов Д.С., Мантатов В.В. // Высокомолек. соед. Б. 1990. Т. 32. № 11. С. 869–874.
- [9] Сандитов Д.С., Козлов Г.В. // ФХС. 1995. Т. 21. № 6. С. 549–578.
- [10] Беломестных В.Н., Теслева Е.П. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 8. С. 140–142.
- [11] Кузьменко В.А. Новые схемы деформирования твердых тел. Киев: Наукова думка, 1973. 200 с.
- [12] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1965. 204 с.
- [13] Новиков В.В., Wojciechowski K.W. // ФТТ. 1999. Т. 41. Вып. 12. С. 2147–2153.
- [14] Берлин Ал.Ал., Ротенбург Л., Басэрт Р. // Высокомолек. соед. Б. 1991. Т. 33. № 8. С. 619–621.