

## Модуль упругости, поверхностного натяжения, адгезии, идеальная и реальная прочность твердых тел

© Е.Ф. Кустов,<sup>1</sup> М.Е. Кустов,<sup>2</sup> В.А. Антонов<sup>1,¶</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет (МЭИ),  
112250 Москва, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт технического стекла,  
117218 Москва, Россия

¶ e-mail: Antonov913@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 2 сентября 2016 г.)

Получены формулы поверхностного натяжения, энергии адгезии, модуля упругости и прочности твердых тел, в зависимости от плотности атомов. Теоретические значения этих величин подтверждаются экспериментальными значениями на большом массиве металлов, диэлектриков, полупроводников.

DOI: 10.21883/JTF.2017.04.44317.2026

### Введение

Поверхностное натяжение представляет собой основную термодинамическую характеристику поверхностного слоя жидкостей и твердых тел на границе с различными фазами (газами, жидкостями, твердыми телами).

Поверхностное натяжение определяет такие важные для физики величины, как капиллярное давление жидкости под искривленной поверхностью по уравнению Лапласа; краевой угол смачивания, образуемый жидкостью возле поверхности твердого тела по уравнению Юнга [1,2]. Кроме того, оно определяет давление насыщенного пара над искривленной поверхностью жидкости по уравнению Кельвина, адсорбцию веществ, самопроизвольно концентрирующихся на поверхности раздела фаз по уравнению Гиббса. Поверхностное натяжение определяет эффекты, связанные с электрическими полями на поверхности. Это электрокапиллярный эффект по уравнению Липпмана и дифференциальная емкость двойного электрического слоя и т.п. Оно же определяет внешние формы веществ: равновесную форму (огранку) кристаллов, работу образования критического зародыша при образовании новой фазы, а также идеальную и реальную прочность твердых тел. Из анализа свойств двойного слоя атомов можно получить формулу модуля упругости, зависящего от плотности атомов в степени  $N_V^{4/3}$  и параметра сил отталкивания. Теоретические значения модуля упругости  $E$  подтверждаются экспериментальными значениями на большом массиве металлов, диэлектриков, полупроводников.

Эти рассуждения позволяют получить формулу для механической прочности упругих тел, которые зависят от произведения модуля упругости (модуль Юнга) и поверхностного натяжения  $E_\gamma$ .

### Сила и энергия взаимодействия двойного слоя атомов

Для силы и энергии взаимодействия между атомами в модели двойного слоя была получена [3] следующая

формула:

$$F = \frac{B}{r_0^2} \left( -\frac{1}{(1+x)^{n+1}} + \frac{1}{(1+x)^2} \right),$$

$$W = \frac{B}{r_0} \left( -\frac{1}{n(x+1)^n} - \frac{1}{(x+1)} \right), \quad (1)$$

где  $x = \varepsilon - 1$  и  $\varepsilon = \frac{r}{r_0}$  — деформация относительно равновесного расстояния  $r_0$ ,  $B$  — параметр взаимодействия между атомами,  $n$  — параметр теории, определяющей силы отталкивания при взаимодействии атомов в твердом теле.

Модуль упругости Юнга  $E$  можно найти из значения производной силы по расстоянию, умноженной на количество атомов  $N_S$  на единице площади двойного слоя:

$$E = N_S \left. \frac{dF}{dx} \right|_{x,(W=0)}. \quad (2)$$

Состояние упругости определяется не условием равновесия, где  $F = 0$ ,  $x = 0$  и  $r = r_0$ , а условием  $r < r_0$  и  $x < 0$ , где силы отталкивания преобладают над силами притяжения.

Модуль упругости, определенный в области деформаций  $r < r_0$  и  $x < 0$ , равен

$$E = 2.3 \cdot 10^{-29} N_V^{4/3} \left( (n+1)n^{\frac{n+2}{n-1}} - 2n^{\frac{3}{n-1}} \right), \quad (3)$$

где  $N_V$  — объемная плотность атомов.

Объемная плотность атомов равна

$$N_V = -\frac{\rho}{m} \quad (\text{N/m}), \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность вещества,  $M$  — вес молекулы в единицах атомной массы,  $m = 1.66 \cdot 10^{-27}$  kg — единица атомной массы.

Аналогично формула энергии поверхностного натяжения через поверхностную атомную плотность имеет вид

$$\gamma = 2.31 \cdot 10^{-28} N_S^{3/2} \frac{n-1}{2n}, \quad (5)$$

где  $N_S$  — поверхностная атомная плотность,  $\text{m}^{-2}$ .

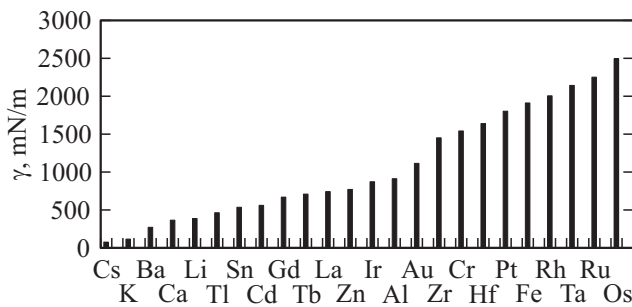


Рис. 1. Диаграмма поверхностного натяжения расплавов металлов.

## Поверхностное натяжение элементов

Значения величины поверхностного натяжения элементов периодической системы, рассчитанные по выведенной формуле (5), приведены на рис. 1. Значения параметра отталкивания  $n$  были получены из сравнения теоретической и экспериментальных значений поверхностного натяжения. Следует отметить, что изменение этого параметра на массиве элементов находится в пределе  $n = 1-2$ , в то время как значения поверхностного натяжения меняются на 3–4 порядка, отслеживая изменение атомной поверхностной плотности, как это предсказывает формула (5).

## Адгезия твердых тел

Равновесная работа адгезии  $A$  определяется убылью свободной поверхностной энергии

$$A = \gamma_c + \gamma_a - \gamma_{ca}, \quad (6)$$

где  $\gamma_c, \gamma_a$  — энергии поверхностного натяжения субстрата ( $c$ ) и адгезива ( $a$ ) до адгезии и  $\gamma_{ca}$  — при адгезии субстрата и адгезива [4].

Подставляя в (6) формулу (5), для субстрата, адгезива и слоя субстрат–адгезив получим формулу энергии адгезии субстрата и адгезива

$$A = 2.31 \cdot 10^{-28} \left[ N_{S_c}^{3/2} \frac{n_c - 1}{2n_c} + N_{S_a}^{3/2} \frac{n_a - 1}{2n_a} - N_{S_{ca}}^{3/2} \frac{n_{ca} - 1}{2n_{ca}} \right]. \quad (7)$$

Для атомной поверхностной плотности субстрата и адгезива формулу (4) можно представить следующим образом:

$$N_{S_c}^{3/2} = \frac{\rho_c}{M_c m}, \quad N_{S_a}^{3/2} = \frac{\rho_a}{M_a m}, \quad N_{S_{ca}}^{3/2} = \frac{\rho_c + \rho_a}{(M_c + M_a) m}.$$

Таблица 1. Энергия адгезии некоторых материалов к пленкам  $\text{In}_2\text{O}_3$ , In,  $\text{SnO}_2$ , Sn,  $\text{H}_2\text{O}$

| Субстрат                | Энергия адгезии $A$ , $\text{J/m}^2$ |       |                |       |                      |
|-------------------------|--------------------------------------|-------|----------------|-------|----------------------|
|                         | $\text{In}_2\text{O}_3$              | In    | $\text{SnO}_2$ | Sn    | $\text{H}_2\text{O}$ |
| $\text{SiO}_2$          | 0.889                                | 1.884 | 0.920          | 1.838 | 0.694                |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 1.759                                | 3.727 | 1.820          | 3.638 | 1.373                |
| $\text{BeO}$            | 1.468                                | 3.110 | 1.518          | 3.036 | 1.146                |
| $\text{MgO}$            | 1.367                                | 2.896 | 1.414          | 2.827 | 1.067                |
| $\text{ZrO}_2$          | 1.283                                | 2.718 | 1.327          | 2.653 | 1.001                |
| $\text{ThO}_2$          | 1.155                                | 2.447 | 1.195          | 2.388 | 0.901                |
| Стекло 1                | 0.128                                | 0.271 | 0.132          | 0.264 | 0.100                |
| Стекло 2                | 0.131                                | 0.277 | 0.135          | 0.270 | 0.102                |
| Стекло 3                | 0.139                                | 0.295 | 0.144          | 0.288 | 0.109                |
| Стекло 4                | 0.139                                | 0.295 | 0.144          | 0.288 | 0.109                |
| Стекло 5                | 0.263                                | 0.557 | 0.272          | 0.543 | 0.205                |
| Стекло 6                | 0.248                                | 0.525 | 0.256          | 0.513 | 0.194                |
| Стекло                  | 0.232                                | 0.492 | 0.240          | 0.480 | 0.181                |
| Пирекс                  |                                      |       |                |       | 0.146*               |

Примечание. \* Работа адгезии, измеренная экспериментально [5].

Тогда энергия адгезии будет

$$A = 2.31 \cdot 10^{-29} \left[ \frac{\rho_c}{M_c m} \frac{n_c - 1}{2n_c} + \frac{\rho_a}{M_a m} \frac{n_a - 1}{2n_a} - \frac{\rho_c + \rho_a}{(M_c + M_a) m} \frac{n_{ca} - 1}{2n_{ca}} \right].$$

Если учесть величину единицы атомной массы  $m = 1.66 \cdot 10^{-27}$  kg, эта формула будет иметь следующий вид:

$$A = 1.38 \left[ \frac{\rho_c}{M_c} \frac{n_c - 1}{2n_c} + \frac{\rho_a}{M_a} \frac{n_a - 1}{2n_a} - \frac{\rho_c + \rho_a}{(M_c + M_a)} \frac{n_{ca} - 1}{2n_{ca}} \right], \quad (8)$$

где  $\rho$  — плотность вещества,  $\text{kg/m}^3$ ,  $M$  — вес молекулы в единицах атомной массы.

Второе приближение для энергии адгезии можно получить через среднегеометрическое значение энергии поверхностного натяжения субстрата и адгезива [5]

$$A = 2\sqrt{\gamma_c \gamma_a}. \quad (9)$$

Подставляя формулу (5) в (9), для энергии адгезии получим

$$A = 2.31 \cdot 10^{-28} \left[ N_{S_c}^{3/4} N_{S_a}^{3/4} \sqrt{\frac{n_c - 1}{n_c} \frac{n_a - 1}{n_a}} \right]. \quad (10)$$

Эта же формула через атомные плотности субстрата и адгезива будет иметь следующий вид:

$$A = 0.138 \sqrt{\frac{\rho_c}{M_c} \frac{\rho_a}{M_a} \frac{n_c - 1}{n_c} \frac{n_a - 1}{n_a}} \quad (\text{J/m}^2). \quad (11)$$

**Таблица 2.** Спецификация стекол

|          |                        |
|----------|------------------------|
| Стекло 1 | Кварцевое непрозрачное |
| Стекло 2 | Кварцевое прозрачное   |
| Стекло 3 | Электровакuumное       |
| Стекло 4 | Электроизоляционное    |
| Стекло 5 | Иенское крон           |
| Стекло 6 | Иенское флинт          |

Непосредственное измерение энергии адгезии является трудным в реализации экспериментом. Поэтому энергия адгезии, рассчитанная теоретически по формулам (8) или (11), может служить ориентиром для экспериментаторов, по которому можно проводить сравнительный анализ изменения энергии адгезии для различных материалов. В табл. 1 даны эти величины для некоторых проводящих оптически прозрачных пленок, применяющихся для изделий конструктивной оптики. В табл. 2 приведена спецификация стекол, для которых определялась энергия адгезии.

Обычно измеряют адгезионную прочность по силе отрыва пленки. Сила отрыва пленки зависит от геометрических размеров пленки, скорости отрыва и т.п., а также процессов когезии, т.е. силы отрыва слоев внутри адгезива или субстрата.

Работу адгезии жидкости к поверхности твердых тел можно измерить экспериментально по краевому углу смачивания  $\theta$  жидкости с поверхностным натяжением  $\gamma_a$  [6]

$$A = \gamma_a(1 + \cos \theta). \tag{12}$$

По формуле (13) и формуле (9) можно определить угол смачивания

$$1 + \cos \theta = 2\sqrt{\frac{\gamma_c}{\gamma_a}} = 2\frac{N_{S_c}^{3/4}}{N_{S_a}^{3/4}}\sqrt{\frac{n_a(n_c - 1)}{n_c(n_a - 1)}}. \tag{13}$$

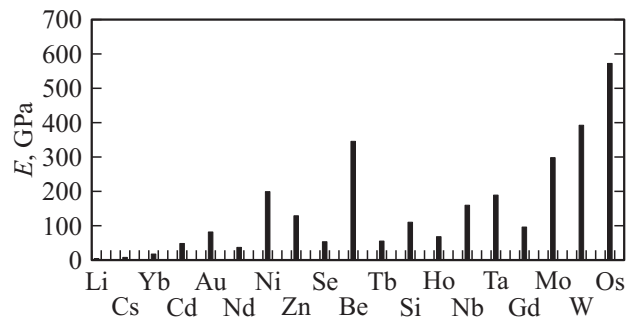
В табл. 1 приведена также величина энергии адгезии, полученная по измерению угла смачивания H<sub>2</sub>O поверхности пирекса.

### Формула модуля упругости и эксперимент

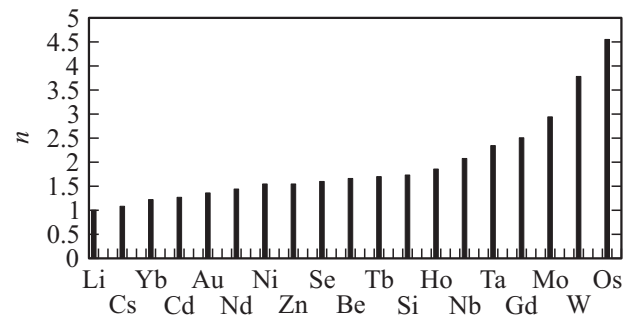
Модуль упругости и параметр сил отталкивания элементов периодической системы, рассчитанный по формуле (3), представлен в табл. 3 и на рис. 2 и 3 одинаковой последовательностью элементов.

Разница теоретически рассчитанного и экспериментального значения модуля упругости составляет десятки доли процента.

В табл. 4 и 5, на диаграммах рис. 4 и 5 приведены модули упругости неорганических веществ и некоторых



**Рис. 2.** Диаграмма модуля упругости E некоторых элементов периодической системы.



**Рис. 3.** Диаграмма параметра сил отталкивания n некоторых элементов периодической системы.

стекло, рассчитанные теоретически по вышеприведенным формулам, а также экспериментальные значения для некоторых веществ.

Экспериментальные значения модуля упругости брались из работы [13].

### Модуль прочности твердых тел

Условие разрушения материалов определяется условиями изменения энергии тела при возникновении и распространении трещин или других дефектов.

Можно рассматривать идеальную  $P_{id}$  и реальную  $P_{real}$  прочности (N/m<sup>2</sup>) твердых тел. Идеальная  $P_{id}$  и реальная  $P_{real}$  прочности твердых тел определяются уравнениями Поляни-Смекала и Гриффитса:

$$P_{id} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\delta}}, \quad P_{real} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}}, \tag{14}$$

где  $E$  — модуль Юнга,  $\gamma$  — поверхностное натяжение,  $\delta$  — межатомное расстояние,  $l$  — длина зародышевой трещины, которая при напряжении  $P_{real}$  начинает самопроизвольно расти.

Во всех этих теориях используется произведение модуля Юнга на поверхностное натяжение. Можно использовать формулы модуля упругости (3) и поверхностного

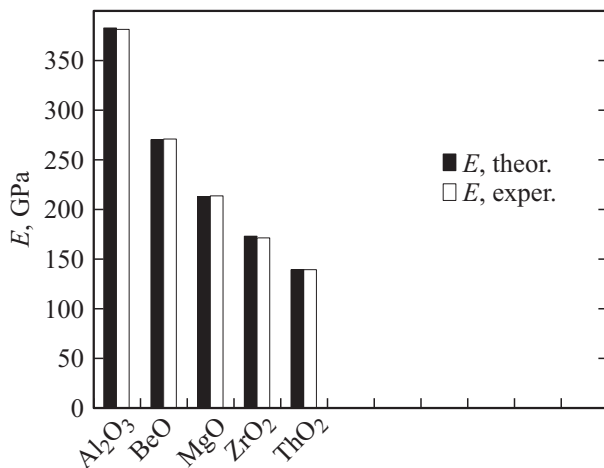


Рис. 4. Диаграмма модуля упругости неорганических веществ.

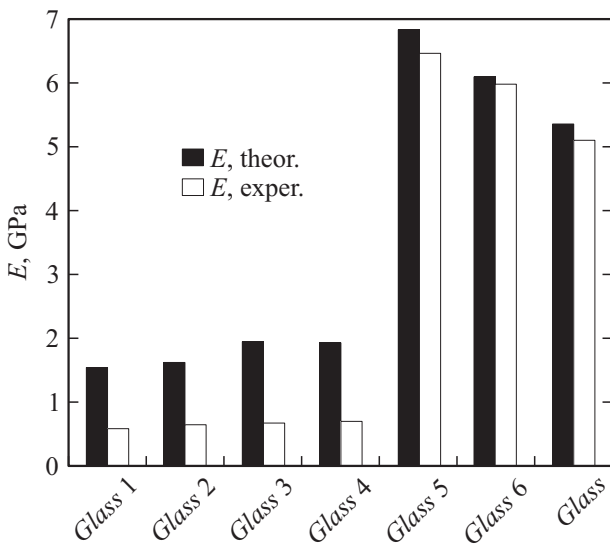


Рис. 5. Диаграмма модуля упругости стекол.

натяжения (5), и произведение  $E\gamma$  будет равно:

$$E\gamma = 5.31 \cdot 10^{-57} N_V^{7/3} \frac{n-1}{2n} \left( (n+1)n^{\frac{n+2}{n-1}} - 2n^{\frac{3}{n-1}} \right). \quad (15)$$

Подставляя это произведение в формулы (14), получим формулы идеальной и реальной прочностей твердых тел:

$$P_{id} = 7.29 \cdot 10^{-29} N_V^{7/6} \sqrt{\frac{n-1}{n} \left( (n+1)n^{\frac{n+2}{n-1}} - 2n^{\frac{3}{n-1}} \right)} \frac{1}{\delta}, \quad (16)$$

$$P_{real} = 7.29 \cdot 10^{-29} N_V^{7/6} \sqrt{\frac{n-1}{n} \left( (n+1)n^{\frac{n+2}{n-1}} - 2n^{\frac{3}{n-1}} \right)} \frac{1}{\pi l}. \quad (17)$$

В формуле (16) можно ввести упрощение  $\delta = l'N_V^{-1/3}$ , или  $\pi l = l'N_V^{-1/3}$ , где  $l'$  — длина трещины в относительных единицах расстояния между атомами.

Внося это упрощение в формулу идеальной и реальной прочностей, получим

$$P = 7.29 \cdot 10^{-29} N_V^{4/3} \times \sqrt{\frac{n-1}{n} \left( (n+1)n^{\frac{n+2}{n-1}} - 2n^{\frac{3}{n-1}} \right)} \text{ (Pa)}. \quad (18)$$

В зависимости от объемной плотности атомов  $N_V$  предел прочности определяется как  $N_V^{4/3}$ , также как модуль упругости.

Для получения точного значения предела прочности необходимо вводить относительную длину трещины  $l'$  как параметр и определять ее значение из сравнения экспериментальных и теоретических значений предела прочности. Однако можно использовать формулы (16) и (17) для определения фактора прочности  $\delta$ , как отклонения реальной прочности веществ от идеальной:

$$\delta = \frac{P(l')}{P(l'=1)} = \frac{1}{\sqrt{l'}}. \quad (19)$$

Фактор прочности меняется от единицы,  $\delta = 1$ , когда реальная прочность равна идеальной, до  $\delta = 0$ ,  $l' \gg 1$ ,

Таблица 3. Модуль упругости и параметр сил отталкивания элементов периодической системы

| Элемент | E, GPa   | n      | Элемент | E, GPa   | n     |
|---------|----------|--------|---------|----------|-------|
| Cs      | 1.76801  | 1.0802 | Gd      | 97.82058 | 2.52  |
| Rb      | 2.458781 | 1.081  | Pr      | 98.50032 | 2.8   |
| Li      | 5.02923  | 1.0223 | Dy      | 98.75342 | 2.45  |
| Tl      | 7.92622  | 1.053  | Si      | 109.955  | 1.73  |
| In      | 10.55944 | 1.063  | Ti      | 110.5316 | 1.575 |
| Pb      | 17.98408 | 1.142  | Er      | 114.9799 | 2.785 |
| Yb      | 18.02245 | 1.232  | Pd      | 125.0918 | 1.487 |
| Ca      | 26.03343 | 1.4    | Cu      | 129.9451 | 1.342 |
| Bi      | 32.00141 | 1.375  | Zn      | 130.5869 | 1.55  |
| La      | 38.38118 | 1.5348 | Hf      | 150.6995 | 2.48  |
| Nd      | 38.39719 | 1.45   | Nb      | 160.4527 | 2.08  |
| Ce      | 44.02304 | 1.55   | V       | 170.9378 | 1.68  |
| Te      | 44.73772 | 1.55   | Pt      | 174.791  | 1.83  |
| Mg      | 44.86112 | 1.278  | Ta      | 190.3775 | 2.35  |
| Cd      | 49.95116 | 1.282  | Mn      | 199.7896 | 1.672 |
| Se      | 54.52143 | 1.6    | Ni      | 200.0146 | 1.54  |
| Sn      | 54.91102 | 1.73   | Fe      | 200.1158 | 1.625 |
| Sm      | 55.00902 | 1.708  | Co      | 206.0308 | 1.569 |
| Tb      | 57.40401 | 1.7    | U       | 210.1488 | 3     |
| Y       | 65.93305 | 1.925  | Mo      | 300.1759 | 2.94  |
| Ho      | 67.5904  | 1.85   | Cr      | 314.6545 | 2.265 |
| Al      | 69.51709 | 1.275  | Be      | 345.4163 | 1.665 |
| Sb      | 77.40375 | 1.98   | Rh      | 384.242  | 3.15  |
| Th      | 79.26929 | 2.2    | W       | 394.4927 | 3.8   |
| Ag      | 80.68181 | 1.35   | Re      | 474.2556 | 4.1   |
| Ge      | 81.51387 | 1.6    | Ru      | 500.8337 | 3.9   |
| Au      | 83.02654 | 1.36   | Os      | 574.9851 | 4.56  |
| Zr      | 96.90856 | 1.82   | Ir      | 589.8954 | 4.727 |

Примечание. Экспериментальные значения модуля упругости брались из следующих справочников и научных работ [7–12].

когда отклонение реальной прочности от идеальной существенно. В табл. 6 и 7 приведены факторы прочности некоторых элементов периодической системы и неорганических веществ, рассчитанные по формуле (19).

**Таблица 4.** Модуль упругости неорганических веществ и стекол

| Вещество         | $N_V \cdot 10^{28}$ ,<br>$m^{-3}$ | Плотность,<br>$kg/m^3$ | $n$  | $E$ , GPa<br>(теоретические) |
|------------------|-----------------------------------|------------------------|------|------------------------------|
| CuCl             | 4.5                               | 3700                   | 1.21 | 37.9                         |
| CuBr             | 3.96                              | 4720                   | 1.21 | 32.0                         |
| CuI              | 3.57                              | 5650                   | 1.21 | 27.9                         |
| AgI              | 2.91                              | 5670                   | 1.21 | 21.2                         |
| BeS              | 6.92                              | 2360                   | 1.21 | 67.3                         |
| MnS              | 5.53                              | 3990                   | 1.21 | 49.8                         |
| MnSe             | 4.99                              | 5550                   | 1.21 | 43.5                         |
| ZnS              | 5.06                              | 4090                   | 1.21 | 44.3                         |
| ZnSe             | 4.52                              | 5420                   | 1.21 | 38.2                         |
| ZnTe             | 3.96                              | 6340                   | 1.21 | 31.9                         |
| CdTe             | 2.94                              | 5860                   | 1.21 | 21.5                         |
| HgS              | 4                                 | 7730                   | 1.21 | 32.4                         |
| HgSe             | 3.56                              | 8270                   | 1.21 | 27.8                         |
| HgTe             | 2.97                              | 8090                   | 1.21 | 21.8                         |
| AlP              | 4.99                              | 2400                   | 1.21 | 43.5                         |
| AlAs             | 4.37                              | 3700                   | 1.21 | 36.5                         |
| AlSb             | 3.48                              | 4300                   | 1.21 | 26.9                         |
| GaP              | 4.95                              | 4140                   | 1.21 | 43.1                         |
| GaAs             | 4.46                              | 5350                   | 1.21 | 37.4                         |
| GaSb             | 3.53                              | 5610                   | 1.21 | 27.4                         |
| InP              | 3.96                              | 4790                   | 1.21 | 31.9                         |
| InAs             | 3.61                              | 5680                   | 1.21 | 28.2                         |
| InSb             | 2.94                              | 5780                   | 1.21 | 21.5                         |
| BP               | 8.33                              | 2890                   | 1.21 | 86.2                         |
| SiC              | 9.65                              | 3210                   | 1.21 | 104.7                        |
| SiO <sub>2</sub> | 7.97                              | 2650                   | 1.21 | 81.2                         |

**Таблица 5.** Сравнение рассчитанных значений модуля упругости неорганических веществ и стекол со значениями, полученными экспериментально

| Вещество                       | $N_V \cdot 10^{28}$ ,<br>$m^{-3}$ | Плотность,<br>$kg/m^3$ | $n$   | $E$ , GPa<br>(теоретические) | $E$ , GPa<br>(экспериментальные) |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------|------------------------------|----------------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.18                              | 3990                   | 1.85  | 382.5                        | 382                              |
| BeO                            | 14.5                              | 3020                   | 1.35  | 271.0                        | 272                              |
| MgO                            | 10.7                              | 3580                   | 1.44  | 213.1                        | 214                              |
| ZrO <sub>2</sub>               | 8.21                              | 5600                   | 1.54  | 173.3                        | 172                              |
| ThO <sub>2</sub>               | 8.32                              | 9690                   | 1.39  | 139.5                        | 140                              |
| Стекло 1                       | 5.74                              | 2100                   | 1.01  | 1.5                          | 0.6                              |
| Стекло 2                       | 6.01                              | 2200                   | 1.01  | 1.6                          | 0.65                             |
| Стекло 3                       | 6.83                              | 2500                   | 1.01  | 1.9                          | 0.65                             |
| Стекло 4                       | 6.83                              | 2500                   | 1.01  | 1.9                          | 0.7                              |
| Стекло 5                       | 6.83                              | 2500                   | 1.018 | 6.8                          | 6.5                              |
| Стекло 6                       | 6.83                              | 2500                   | 1.016 | 6.1                          | 6                                |
| Стекло                         | 6.83                              | 2500                   | 1.014 | 5.3                          | 5.1                              |

Примечание. Спецификация стекол 1–6 представлена в табл. 2. Типы стекол на диаграммах соответствуют табл. 2.

**Таблица 6.** Фактор прочности элементов периодической системы

| Элемент | $l'$ , m | $\delta$ , % | Элемент | $l'$ , m | $\delta$ , % |
|---------|----------|--------------|---------|----------|--------------|
| Cs      | 1        | 96.83        | Dy      | 2803     | 1.89         |
| Li      | 44       | 15.14        | Pr      | 12347    | 0.90         |
| Tl      | 190700   | 0.23         | Ti      | 6578     | 1.23         |
| Yb      | 3838     | 1.61         | Er      | 2276     | 2.10         |
| Pb      | 165564   | 0.25         | Pd      | 15566    | 0.80         |
| Ca      | 8213     | 1.10         | Cu      | 17915    | 0.75         |
| Bi      | 117162   | 0.29         | Zn      | 37884    | 0.51         |
| La      | 3086     | 1.80         | Hf      | 821      | 3.49         |
| Nd      | 2042     | 2.21         | Si      | 705      | 3.77         |
| Te      | 694738   | 0.12         | Nb      | 7476     | 1.16         |
| Ce      | 6102     | 1.28         | V       | 18101    | 0.74         |
| Mg      | 8756     | 1.07         | Pt      | 38075    | 0.51         |
| Cd      | 25239    | 0.63         | Ta      | 2736     | 1.91         |
| Sn      | 95722    | 0.32         | Fe      | 15126    | 0.81         |
| Sm      | 5649     | 1.33         | Ni      | 8791     | 1.07         |
| Y       | 1177     | 2.91         | Co      | 24981    | 0.63         |
| Ho      | 1743     | 2.40         | U       | 6988     | 1.20         |
| Al      | 112180   | 0.30         | Mo      | 2925     | 1.85         |
| Sb      | 2194387  | 0.07         | Cr      | 21707    | 0.68         |
| Ag      | 16006    | 0.79         | Be      | 185315   | 0.23         |
| Th      | 2655     | 1.94         | Rh      | 12438    | 0.90         |
| Ge      | 46949    | 0.46         | W       | 6786     | 1.21         |
| Au      | 14455    | 0.83         | Re      | 8987     | 1.05         |
| Zr      | 4690     | 1.46         | Ru      | 10617    | 0.97         |
| Gd      | 1066     | 3.06         | Ir      | 18386    | 0.74         |

**Таблица 7.** Фактор прочности неорганических веществ

| Неорганическое вещество        | $l'$ , m | $\delta$ , % |
|--------------------------------|----------|--------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 346199   | 0.17         |
| BeO                            | 1123322  | 0.09         |
| MgO                            | 793819   | 0.11         |
| ZrO <sub>2</sub>               | 228215   | 0.21         |
| ThO <sub>2</sub>               | 327470   | 0.17         |
| Стекло 1                       | 243      | 6.42         |
| Стекло 2                       | 122      | 9.05         |
| Стекло 3                       | 247      | 6.36         |

Исходя из анализа этих данных, следует выделить щелочные элементы Cs, Li, для которых  $\delta \approx 100$  и  $\approx 15\%$  соответственно.

Из неорганических материалов максимальный предел прочности имеют стекла  $\delta \approx 6-9\%$ .

### Заключение

Теоретические значения поверхностного натяжения, энергии адгезии, модуля упругости и прочности твердых тел, полученные в настоящей работе, подтверждаются экспериментальными значениями на большом массиве металлов, диэлектриков, полупроводников. Установлено,

что энергия поверхностного натяжения, модули упругости и прочности твердых тел зависят от поверхностной и объемной концентрации атомов, как  $N_S^{3/2}$  и  $N_V^{4/3}$ .

## Список литературы

- [1] *Гиббс Дж.В.* Термодинамика. Статистическая механика. М.: Наука, 1982. 584 с.
- [2] *Абрамзон А.А.* Поверхностно-активные вещества. Л.: Химия, 1981. 200 с.
- [3] *Кустов М.Ф., Кустов Е.Ф., Мирошниченко А.Ю., Шеметова В.К.* // Вестник МЭИ. 2013. № 5. С. 162–168.
- [4] Физическая энциклопедия в пяти томах / Под ред. А.М. Прохорова. Т. 1. М.: Советская энциклопедия, 1988. 503 с.
- [5] *Зимон А.Д.* Адгезия жидкости и смачивание. М.: Химия, 1974. 413 с.
- [6] *Зимон А.Д.* Адгезия пленок и покрытий. М.: Химия, 1977. 352 с.
- [7] Металловедение и термическая обработка стали. Справочник. Т. 1. М.: Изд-во по черной и цветной металлургии, 1961. 1204 с.
- [8] Механические свойства редких металлов / Под ред. Л.Д. Соколова. М.: Металлургия, 1972. 288 с.
- [9] Конструкционные материалы / Под ред. А.Т. Туманова. Т. 1. М.: Советская энциклопедия, 1965. 416 с.
- [10] *Буркхардт А.* Механические и технологические свойства чистых металлов. М.: Металлургиздат, 1941. 264 с.
- [11] *Фришман Я.Б.* Механические свойства металлов. М.: Машиностроение, 1974. 574 с.
- [12] Благородные металлы. Справочник / Под ред. Е.М. Савицкого. М.: Металлургия, 1984. 511 с.
- [13] *Портной К.И.* Структура и свойства композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1979. 256 с.