
**ОСТАТОЧНАЯ ПРОЧНОСТЬ ОСТЕКЛЕНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ СОУДАРЕНИЯХ
С КОСМИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ НА ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ**

© 2019 г. **В. Ф. Солинов**^{1, 3, **, *}, **Е. Ф. Солинов**^{1, 3}, **Е. Ф. Кустов**^{2, 3},
М. Е. Кустов¹, **Д. М. Кустов**², **Э. Н. Муравьев**^{1, 3, *}

¹АО «Научно-исследовательский институт технического стекла»
Россия, 117218, Москва, ул. Кржижановского, 29, кор. 5

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Россия, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14

³Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова
Россия, 123557, Москва, Пресненский вал, 19

*e-mail: en_mur@mail.ru

**e-mail: gigaset2009@gmail.com

Поступила в редакцию 03.08.17 г.

После доработки 26.04.18 г.

Принята к публикации 08.10.18 г.

Надежность эксплуатации стекол в иллюминаторах космических аппаратов зависит от размеров дефектов, образующихся при попадании в иллюминатор метеоритных частиц, их размеров, плотности, скорости и углов соударений. В статье на основании теории прочности в модели двойного слоя выводятся формулы зависимости остаточной прочности стекла от диаметра частиц, их плотности, скорости относительно первой космической скорости и углов соударения.

Ключевые слова: стекло, прочность, плотность, скорость, кинетическая энергия

DOI: 10.1134/S0132665119010177

ВВЕДЕНИЕ

Космические аппараты (КА) в околоземном пространстве сталкиваются с большим количеством метеоритных и искусственного происхождения частиц. Надежность герметичности КА в существенной степени зависит от остаточной прочности стекла иллюминаторов после соударения с частицами на орбитах в космическом пространстве. В работах [1, 2] проводилась имитация ударов метеоритных и искусственного происхождения частиц при первой космической скорости и с размерами соизмеримыми при испытаниях в земных условиях и реальных размеров дефектов на иллюминаторах космической станции «Мир». В работе [3] было получено, что основным фактором, влияющим на остаточную прочность стекла является кинетическая энергия частицы. Поэтому можно заключить, что на остаточную прочность стекла (ОПС) влияют три фактора: плотность, размеры и скорость частицы. Целью настоящей работы было определить зависимость ОПС от этих трех факторов метеоритных частиц.

ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ СТЕКОЛ

Предел прочности стекол при различных видах обработки исследовался в ряде работ, например в [4]. Теория прочности стекол на основании модели двойного слоя разрабатывалась в работах [5, 6].

Разрушение стеклянного листа, толщиной h происходит, когда образуется микротрещина на всю толщину листа. Свободная энергия F складывается из упругой энергии тела W и поверхностной энергии трещины S . При приложении внешнего механического напряжения если увеличение упругой энергии будет больше чем энергия поверхности трещины, то трещина может развиваться, как это происходит при резке стекла.

Упругая энергия стеклянного листа W равна:

$$W = h \frac{\pi P^2 l^2 (1 - \nu^2)}{E}, \quad (1)$$

где l – длина микротрещины, P – коэффициент механического напряжения, E – модуль упругости и ν – коэффициент Пуассона, h – толщина листа.

Энергия поверхности трещины равна $S_\gamma = 4lh\gamma$, где γ – поверхностная энергия, которая затрачивается на преодоление сил сцепления между 2-мя поверхностями, тогда F изменится на величину ΔF (где ΔF – изменение свободной энергии)

$$\Delta F = -W + S_\gamma. \quad (2)$$

Подставив в (2) значение W и S_γ получим:

$$\Delta F = -W + 4\gamma hl = -h \frac{\pi P^2 l^2 (1 - \nu^2)}{E} + 4\gamma hl. \quad (3)$$

Функция ΔF имеет максимум при длине трещины l при этом

$$\frac{2\pi P^2 l (1 - \nu^2)}{E} = 4\gamma. \quad (4)$$

Откуда

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l (1 - \nu^2)}}, \quad (5)$$

где величина P_{cr} представляет собой критическое механическое напряжение, при $P > P_{cr}$, $\partial F / \partial l < 0$, где $\partial F / \partial l$ – коэффициент дифференцирования, и уже существующая трещина данной ширины l начнет расширяться.

Максимальное значение энергии при критической длине трещины равно:

$$F_{cr} = \frac{4\gamma^2 E h}{\pi P^2 (1 - \nu^2)}. \quad (6)$$

При соударении с поверхностью стекла метеоритной частицы с кинетической энергией ε возникает критическое механическое напряжение, которое находится из решения уравнения: $F = F_0 + \varepsilon$, где $F_0 = 0$ в данном случае.

$$\varepsilon = \frac{4\gamma^2 E h}{\pi P^2 (1 - \nu^2)}, \quad (7)$$

откуда коэффициент остаточной прочности $P_{ост}$ равен:

$$P_{\text{ост}} = \sqrt{\frac{4\gamma^2 Eh}{\pi\varepsilon (1 - \nu^2)}} \quad (8)$$

Если взять $P_{\text{ост}}$ относительно исходной прочности $p = P/P_0$ и

$$p = \sqrt{\frac{4\gamma^2 Eh}{\pi\varepsilon (1 - \nu^2) P_0^2}} \quad (9)$$

тогда это можно выразить через длину трещины исходного стекла:

$$p = \sqrt{\frac{2\gamma hl}{\varepsilon}} \quad (10)$$

Теперь надо провести перенормировку формулы с учетом граничного условия: при $\varepsilon = 0, p = 1$.

$$p = \frac{1}{1 + A\sqrt{\varepsilon}}, \text{ где } A = \frac{1}{\sqrt{2h\gamma l}}, \quad (11)$$

где A – расчетный параметр.

Кинетическую энергию метеоритной частицы можно представить следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{1}{6} \pi \rho V^2 d^3, \quad (12)$$

где V – скорость, ρ – плотность и d – диаметр метеоритной частицы.

$$p = \frac{1}{1 + B v \sqrt{\delta^3}}, \quad B = \sqrt{\frac{\pi V_1^2 \rho d_0^3}{24h\gamma l}}, \quad (13)$$

где B – расчетный параметр, где относительная скорость $v = V/V_1$ и V_1 – первая космическая скорость и относительный диаметр частицы $\delta = d/d_0$ относительно, базового диаметра d_0 (если диаметр частицы измеряется в миллиметрах, то $d_0 = 1$ мм).

Зависимость ОПС от диаметра метеоритных частиц. В табл. 1 и на рис. 1 представлены зависимости остаточной прочности стекла при соударениях с метеоритными частицами от диаметра частиц d (мм) со скоростями $v = V/V_1$, составляющие доли первой космической скорости V_1 в масштабе диаметров до 1-го мм (рис. 1б) и до 0,2-х мм (рис. 1а). Вычисления проводились в предположении, что плотность метеоритных частиц постоянна и не зависит от диаметра.

На рис. 1 представлены экспериментальные точки остаточной прочности стекла на иллюминаторах МКС по данным работы [3].

Теоретически рассчитанные зависимости остаточной прочности стекла хорошо согласуются с экспериментальной зависимостью ОПС [3] в интервале скоростей 1.2 до 0.6 от первой космической скорости.

ОПС иллюминаторов от соударений метеоритных частиц уменьшается в зависимости от диаметра, скорости и плотности метеоритных частиц.

Кроме того, редукция ОПС зависит от поверхностного натяжения (ПН) γ стекла в соответствии с параметром $B = \sqrt{\pi V_1^2 \rho d_0^3 / 24h\gamma l}$. С увеличением ПН параметр B уменьшается, что приведет к увеличению ОПС и ослаблению зависимости ОПС от диаметра и скорости метеоритных частиц. При увеличении ПН стекла для создания трещин необходимы частицы с большими энергиями. Поэтому стекла с большими значениями ПН будут иметь большую стойкость от соударений с метеоритными частицами.

Таблица 1. Зависимость остаточной прочности стекла при соударениях с метеоритными частицами с первой космической скоростью V_1 в зависимости от диаметра частиц (при значении параметра $B = 100$)

d , мм	P/P_0 (эксп.)	P/P_0 (теор.)					
		$V/V_1 = 0.1$	$V/V_1 = 0.3$	$V/V_1 = 0.6$	$V/V_1 = 1$	$V/V_1 = 1.1$	$V/V_1 = 1.2$
0	1	1	1	1	1	1	1
0.027	0.78	0.978855	0.940299	0.890155	0.834286	0.821889	0.810028
0.037	0.74	0.968785	0.914229	0.847313	0.777371	0.762433	0.748324
0.05	0.66	0.94806	0.864605	0.772567	0.685878	0.668407	0.652208
0.096	0.56	0.877633	0.726454	0.598708	0.501068	0.483297	0.467292
0.1	0.53	0.871635	0.716357	0.587487	0.490156	0.472534	0.456686
0.13	0.49	0.827816	0.648507	0.516016	0.422857	0.406496	0.391898
0.15	0.46	0.795877	0.604542	0.472857	0.383841	0.368454	0.35478
0.18	0.44	0.757994	0.557155	0.428634	0.344935	0.330676	0.31805
0.2	0.42	0.726543	0.521054	0.396321	0.317113	0.303747	0.29194
0.3		0.615089	0.410668	0.303462	0.239514	0.228965	0.219698
0.4		0.53226	0.341206	0.248614	0.195001	0.186248	0.178578
0.5		0.469554	0.293527	0.212175	0.16585	0.15833	0.151748
0.6		0.420793	0.258693	0.186063	0.145132	0.138511	0.13272
0.7		0.381896	0.232058	0.166344	0.129569	0.123633	0.118445
0.8		0.350168	0.210977	0.150871	0.1174	0.112007	0.107295
0.9		0.323793	0.193839	0.138371	0.107594	0.102641	0.098315
1		0.301511	0.179605	0.128037	0.099504	0.094916	0.090909

Поверхностное натяжение, модуль упругости и прочность веществ. В работах [7, 8] в модели двойного слоя представлена теория энергии поверхностного натяжения модуль упругости и прочность различных веществ и исследовалась зависимость этих величин от отношения плотности ρ (кг/м³) к молекулярному весу M (в единицах атомной массы 1.66×10^{-27} кг) со следующими формулами.

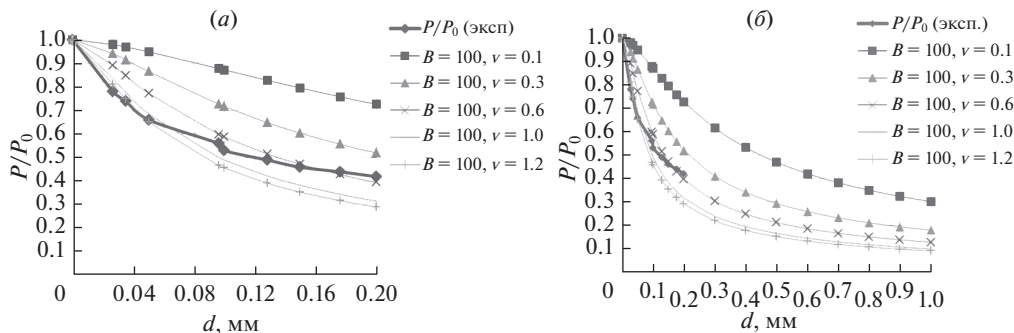


Рис. 1. Зависимость остаточной прочности стекла при соударениях с метеоритными частицами от диаметра частиц со скоростями составляющие доли первой космической скорости V_1 : масштаб диаметра 0.1 (а), масштаб диаметра 0.02 (б).

Таблица 2. Зависимость остаточной прочности стекла при соударениях с метеоритными частицами с первой космической скоростью V_1 в зависимости от диаметра частиц при различных углах соударений для параметра $B = 100$.

d , мм	$\theta = 0$	$\theta = 45$	$\theta = 60$	$\theta = 70$	$\theta = 80$	$\theta = 85$	$\theta = 45$ (эксп)	$\theta = 60$ (эксп)
0	1	1	1	1	1	1	1	1
0.027	0.834286	0.874063	0.905893	0.93266	0.963975	0.981341		
0.037	0.777371	0.826703	0.867862	0.903754	0.947385	0.972406	0.86	0.92
0.05	0.685878	0.746118	0.799775	0.849511	0.914295	0.953915		
0.096	0.501068	0.567037	0.633361	0.703254	0.811089	0.890088		
0.1	0.490156	0.555817	0.62226	0.692809	0.802875	0.884582		
0.13	0.422857	0.485143	0.550615	0.623367	0.745212	0.844036		
0.15	0.383841	0.443073	0.506609	0.579018	0.705523	0.81413		
0.18	0.344935	0.400383	0.460982	0.531728	0.660677	0.778283		
0.2	0.317113	0.369432	0.427325	0.496027	0.625074	0.74822		
0.3	0.239514	0.281455	0.329272	0.388382	0.508671	0.639605		
0.4	0.195001	0.230048	0.27056	0.321624	0.429909	0.556946		
0.5	0.16585	0.196079	0.231286	0.276154	0.373612	0.493389		
0.6	0.145132	0.171811	0.20303	0.243089	0.331445	0.44344		
0.7	0.129569	0.153521	0.181638	0.217881	0.298664	0.403296		
0.8	0.1174	0.139189	0.164823	0.197973	0.272417	0.370371		
0.9	0.107594	0.127621	0.15122	0.181813	0.250897	0.342887		
1	0.099504	0.118065	0.139965	0.168406	0.232908	0.319593		

Поверхностное натяжение:

$$\gamma = f_n \frac{\rho}{M}, \quad f_n = 2.31 \times 10^{-28} \frac{n-1}{2n},$$

где n расчетный параметр [8], имеющий значения от 1.1 до 1.5 для различных веществ. Модуль упругости [9]:

$$E = f(n) \left(\frac{\rho}{M} \right)^{\frac{4}{3}}, \quad f(n) = 2.31 \times 10^{-29} \left[(n+1)n^{\frac{n+2}{n-1}} - 2n^{\frac{3}{n-1}} \right].$$

Для остаточной прочности формулы (8) можно получить следующую зависимость от плотности и молекулярного веса:

$$P_{\text{ост}} = f_p \left(\frac{\rho}{M} \right)^{\frac{5}{3}}, \quad (14)$$

где f_p – коэффициент, зависящий от параметра взаимодействия n .

Отсюда можно заключить, что в соответствии с (14) ОПС ($P_{\text{ост}}$) имеет большие значения для стекол с большими плотностями ρ (кг/м³) и малым молекулярным весом M .

Зависимость ОПС от углов соударений с метеоритными частицами. При соударении метеоритных частиц, летящих в иллюминатор космического аппарата под углом θ относительно нормали к поверхности стекла, остаточная прочность стекла определяется следующей формулой:

$$P_{\text{ост}} = \frac{1}{1 + Bv\sqrt{d^3} \cos\theta}. \quad (15)$$

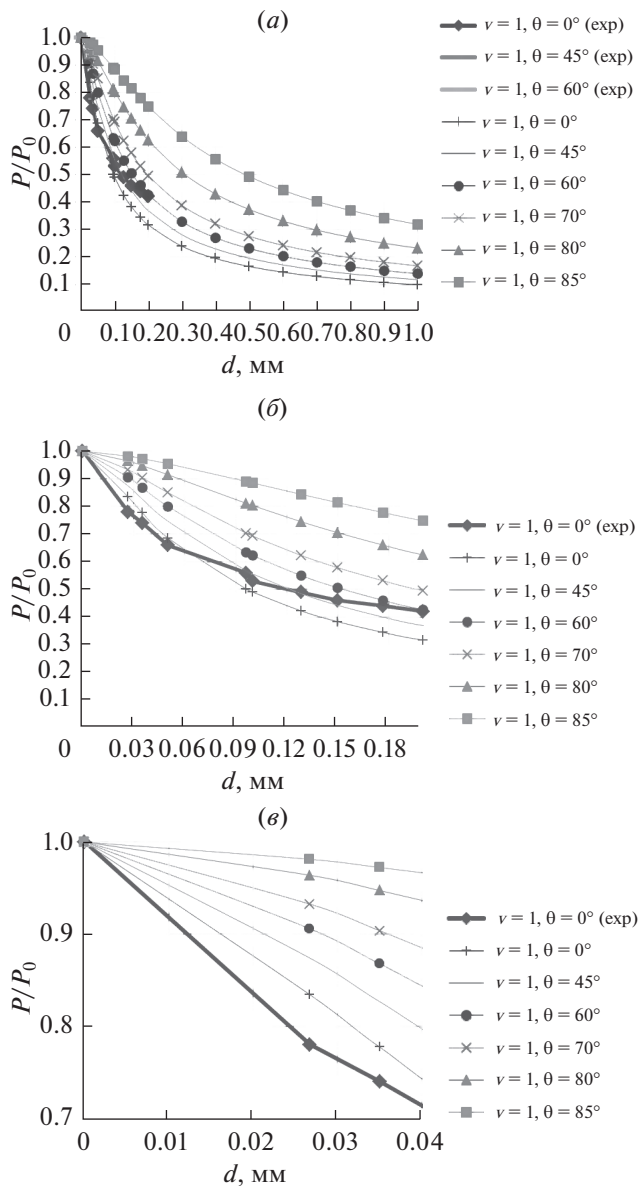


Рис. 2. Зависимость остаточной прочности стекла при соударениях с метеоритными частицами с первой космической скоростью V_1 от диаметра частиц при различных углах θ соударений: масштаб диаметра 0.1 (а), масштаб диаметра 0.03 (б), масштаб диаметра 0.01 (е).

В табл. 2 и на рис. 2 представлены зависимости остаточной прочности стекла при соударениях с метеоритными частицами с первой космической скорости V_1 под различными углами θ от диаметра частиц d (мм) в масштабе диаметров до 1-го мм (рис. 1а), до 0.2-х мм (рис. 1б) и до 0.04 мм (рис. 1е). На рис. 2 представлены экспериментальные точки остаточной прочности стекла на иллюминаторах МКС по данным работы [3].

Максимальное уменьшение ОПС наблюдаются для частиц с вектором соударения перпендикулярным поверхности стекла $\theta = 0$. С увеличением угла θ ОПС увеличивается. Углы соударений это четвертый фактор, определяющий ОПС иллюминаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОПС иллюминаторов от соударений метеоритных частиц уменьшается, т.е. обратно пропорционально диаметру, скорости и плотности метеоритных частиц и увеличивается с увеличением углов соударения. ОПС зависит от поверхностного натяжения (ПН) γ и модуля упругости E стекла как $P_{\text{ост}} \approx \sqrt{\gamma^2 E}$ или от плотности (ρ) и молекулярного веса (M) стекла как $P_{\text{ост}} \approx (\rho/M)^{5/3}$. Стекла с большими плотностями ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$) и малым молекулярным весом M должны иметь большие значения ОПС. Теоретический расчет величины снижения ОПС иллюминаторов от соударений метеоритных частиц предполагает расширить объем экспериментальных исследований зависимости ОПС от диаметра, скорости и плотности метеоритных частиц как это предсказывают теоретические вычисления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солинов В.Ф. Морфология дефектов и остаточная прочность щелочно-силикатных и кварцевых стекол при ударе метеоритов различной мощности // Стекло и керамика. 2012. № 9. С. 3–8.
2. Солинов В.Ф. Изучение дефектов кварцевого стекла при воздействии высокоскоростных частиц на иллюминатор // Стекло и керамика. 2010. № 8. С. 9–12.
3. Солинов В.Ф. Оценка размеров микрометеоритов, соударяющихся с иллюминаторами МКС и остаточная прочность стекла // Наука технологии в промышленности. 2015. № 1. С. 36–38.
4. Кустов М.Е., Курчатова И.С., Муравьев Э.Н., Ревенко В.И., Солинов В.Ф., Солинов Е.Ф. Влияние различных методов обработки силикатных стекол на их прочностные характеристики // Стекло и керамика. 2013. № 5. С. 22–24.
5. Кустов Е.Ф., Кустов М.Е., Солинов В.Ф., Солинов Е.Ф. К вопросу о пределе прочности стекол // Стекло Glass Russia. Март. 2014. С. 24–28.
6. Кустов М.Е., Солинов В.Ф. Модуль упругости и предел прочности неорганических веществ // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. 2013. № 3. С. 19–30.
7. Кустов Е.Ф., Кустов М.Е. Поверхностное натяжение расплавов неорганических веществ // Вестник МЭИ. 2013. № 4. С. 216–221.
8. Кустов М.Е. Поверхностное натяжение и адгезия неорганических веществ // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. 2013. № 3. С. 93–105.
9. Кустов М.Е., Кустов Е.Ф., Мирошниченко А.Ю., Шеметова В.К. Упругость твердых тел в модели двойного слоя // Вестник МЭИ. 2013. № 6. С. 162–169.