

И. А. БОГУСЛАВСКИЙ, Ф. Т. ГОРОБЕЦ, А. М. БУТАЕВ,
А. Н. ЯБОРОВ, Г. И. БАРАНЦЕВА

О ПРОЧНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ЛИСТОВОГО СТЕКЛА, УПРОЧНЕННОГО ИОНООБМЕННЫМ СПОСОБОМ

(Представлено академиком Н. Н. Семеновым 15 VIII 1975)

Расширение областей применения стекол, упрочненных ионообменными способами, в значительной мере связано с вопросами надежности стеклоизделий в эксплуатации и стабильности их прочностных характеристик, которые изучены недостаточно. В большинстве случаев эффективность ионообменного упрочнения стекол оценивают по изменению их средней прочности (¹⁻⁵), однако для определения конструкционной прочности изделий (⁶) и оценки их надежности при эксплуатации необходимо получить статистические кривые распределения частных значений прочности и вероятности разрушения стекол при различных нагрузках.

Цель настоящей работы заключалась в том, чтобы на основе статистического анализа прочности исходного и упрочненного флоат-стекла дать достоверную оценку нижнего уровня прочности и выяснить возможные пути его повышения.

Испытание стекол на прочность проводили методом центрально-симметричного изгиба (⁷) на образцах размером $60 \times 60 \times 3$ мм³, вырезанных из крупногабаритных стеклянных листов (~ 2 м²) до и после их упрочнения.

Исследования велись в условиях промышленного упрочнения крупногабаритных стекол, причем на стадиях изготовления, хранения, транспортировки, резки, обработки и испытания стекол не принималось никаких специальных мер, которые в лабораторных условиях позволяют (⁸) исключать возникновение на поверхности исходных и упрочненных стекол различного рода случайных дефектов.

На рис. 1 представлена кривая дисперсии прочности исходного стекла, построенная по результатам испытаний 400 образцов. Кривая характеризуется большой дисперсией прочности (от 1 до 50 кг/мм²) и двумя максимумами на уровнях 14 и 23 кг/мм², которые могут быть обусловлены различными условиями термохимической обработки противоположных сторон листа в процессе производства флоат-стекла. Действительно, испытания стекол на прочность при условиях, когда растягивающие напряжения создавались на стороне, контактировавшей с расплавом олова (первая партия образцов) и атмосферой (вторая партия), показали, что средние значения прочности в первом случае 16 кг/мм², а во втором — 23 кг/мм² хорошо согласуются с данными, полученными из вариационной кривой (рис. 1). Вопрос о прочности флоат-стекла в связи с условиями его получения и применения представляет несомненный практический интерес и заслуживает специального изучения.

На рис. 2 приведены результаты испытаний на прочность 5500 образцов упрочненных (в расплаве KNO₃ при $450 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение двух часов) стекол. Сопоставление рис. 1 и 2 показывает возрастание средней прочности стекол до 50—55 кг/мм² в результате их упрочнения, однако вероятность разрушения отдельных образцов полностью не исключается и при нагрузках менее 10 кг/мм². Это существенно ограничивает возможности

использования упрочненных стекол в качестве конструкционного материала даже в многослойных изделиях.

Большая дисперсия прочности стекол, упрочненных ионным обменом, и существование отдельных низких значений на вариационной кривой связаны, по-видимому, с возникновением на поверхности дефектов как до упрочнения листового стекла, так и в процессе обработки стеклянных листов в расплаве солей ⁽³⁾, изготовления из них образцов и их испытания. Поэтому можно было ожидать, что дальнейшего повышения прочности сте-

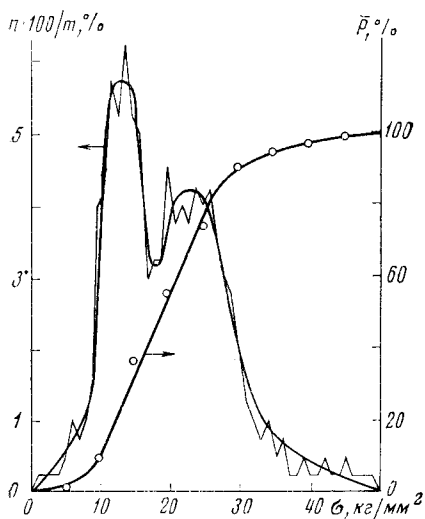


Рис. 1. Полигон распределения прочности флоат-стекла

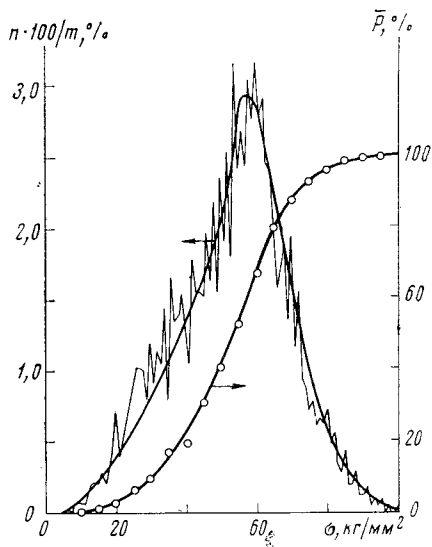


Рис. 2. Полигон распределения прочности флоат-стекла, упрочненного ионным обменом

кол и их надежности в эксплуатации удастся достигнуть при сочетании ионного обмена с химическим травлением.

Возможности увеличения средней прочности стекол, упрочненных в расплаве соли нитрата калия, за счет предварительного улучшения качества их поверхности, в том числе и травления, были показаны ранее ⁽³⁾. При проведении настоящей работы предполагалось более подробно изучить влияние предварительного травления на изменение дисперсионных кривых прочности стекол, упрочненных ионным обменом.

Интерес к этому исследованию был вызван тем, что анализ кривых прочности упрочненных стекол (рис. 2) в сравнении с дисперсионными кривыми для исходного стекла (рис. 1) выявил характерную особенность изменения минимальных, средних и максимальных значений прочности стеклянных образцов. Особенность заключается в том, что рост максимальных значений прочности ($\Delta\sigma_{\max} \approx 50 \text{ кг/мм}^2$) опережает возрастание средних ($\Delta\sigma_{\text{ср}} \approx 35 \text{ кг/мм}^2$) и особенно минимальных значений ($\Delta\sigma_{\min} \approx 5 \text{ кг/мм}^2$). Это означает, что ответственными за нижний уровень прочности являются наиболее опасные дефекты (царапины, выколки), глубина которых может быть соизмерима с толщиной сжатого слоя в упрочненных стеклах при непродолжительных режимах обработки. При применении предварительного травления стекол ожидалось, что степень опасности дефектов будет значительно снижена, а возникающие в процессе ионного обмена сжимающие напряжения в поверхностном слое будут оказывать блокирующее действие, препятствуя возникновению новых опасных дефектов. Это должно было повлиять на рост не только средних, но и минимальных значений прочности упрочненных стекол.

Полученные результаты испытания стекол на прочность (рис. 3) подтвердили целесообразность сочетания травления стекла с последующим ионным обменом: вероятность разрушения стекла, упрочненного двухстадийным способом, равна нулю при нагрузке 20 кг/мм². На рис. 4 приведена зависимость вероятности разрушения от площади стекол, упрочненных ионным обменом и двухстадийным способом, при условии равномерного распределения нагрузки 30 кг/мм² по всей поверхности листа. Из рисунка видно, что при одинаковой вероятности разрушения комбинированный спо-

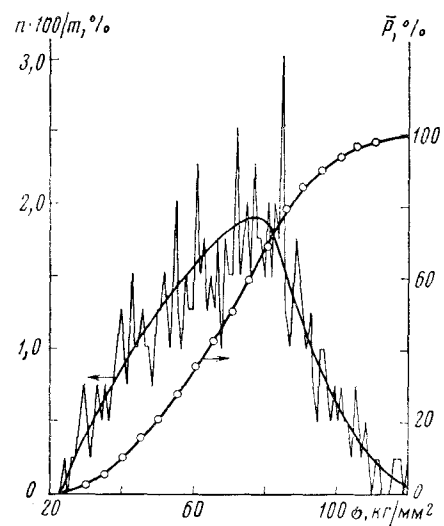


Рис. 3. Полигон распределения прочности флот-стекла, упрочненного методом травление+ионный обмен

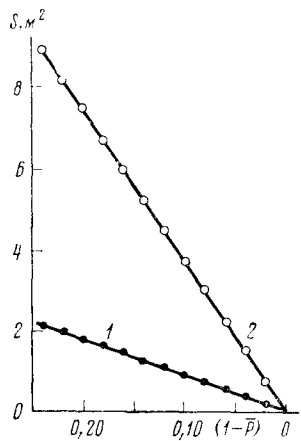


Рис. 4. Вероятности разрушения (1 — P) флот-стекла, упрочненного ионным обменом (1) и методом травление+ионный обмен (2) при нагрузке 30 кг/мм²

соб позволяет упрочнить стекло площадью в четыре раза большей, чем просто ионным обменом.

Существенный эффект упрочнения стекол способом травление + ионный обмен достигается при его многократном применении (табл. 1), но при условии, что перед каждой последующей обработкой в расплаве соли с поверхности стекла удаляют травлением слой толщиной не более 1—2 мкм. Такой многостадийный способ позволяет увеличить минимальный уровень прочности упрочненных стекол до 45—70 кг/мм².

Приведенные данные иллюстрируют эффективность применения комбинированного способа обработки стекла травлением и ионным обменом для

Таблица 1

Толщина страв- ленного слоя, мкм	Время упроч- нения стекла в расплаве KNO ₃ при 450° C, час	Прочность, кг/мм ²			Число испы- танных образцов
		σ_{min}	σ_{cp}	σ_{max}	
—	—	1	20	49	400
—	2	6	53	108	5500
60—80	2	23	73	122	400
60—80; 1—2	2; 2	45	84	145	90
60—80; 2×2 1—2	2; 0,5×2; 2	55	88	130	75
60—80; 2×3 1—2	2; 0,5×3; 2	64	105	166	45
60—80; 2×4 1—2	2; 0,5×4; 2	71	111	150	30

увеличения прочности и надежности крупногабаритных стеклянных листов и многослойных изделий.

В заключение авторы выражают большую благодарность проф. С. М. Бреховских, по инициативе которого была поставлена и проведена настоящая работа.

Поступило
5 VIII 1975

ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Прочность стекла, Сб. статей под ред. В. А. Степанова, М., «Мир», 1969, стр. 33, 239. ² *J. Word, B. Sugerman, C. Symmers*, Glass Technol., v. 6, № 3, 90 (1965). ³ *И. А. Богуславский, В. А. Абросимов, М. Я. Маркелова*, Стекло и керамика, № 2, 1 (1968). ⁴ *H. M. Garfinkel*, Glass Industry, v. 50, 28, 74 (1969). ⁵ *В. Б. Браиловский, В. А. Железцов, А. В. Бобылева*, Стекло и керамика, № 4, 11 (1967). ⁶ *И. А. Богуславский*, Высокопрочные закаленные стекла, М., Стройиздат, 1969, стр. 115. ⁷ *Ф. Ф. Витман, В. П. Пух*, Зав. лаб., № 29, 863 (1963). ⁸ *Ф. Ф. Витман, Г. С. Пугачев, В. П. Пух*, Стекло и керамика, № 9, 12 (1965).