

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЛИСТОВЫХ СТЕКОЛ ТОНКИХ НОМИНАЛОВ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКИ

*А.П. Кравчук, ст. преподаватель, канд. техн. наук  
Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь  
[kravchuk@belstu.by](mailto:kravchuk@belstu.by)*

**Abstract.** In the work with attraction of the planning experiment methods possibility of increase of mechanical strength thin glasses with nominal thickness less than 2 mm by method of chemical hardening in fusion of  $KNO_3$  is studied. Regression dependences properties of glasses on temperature and time of processing in melt  $KNO_3$  are received. Researches changing of the chemical composition chip of samples as a result of chemical hardening by means of the microprobe analysis are conducted. On the basis of experimental data the temperature and time mode processing of thin glasses providing a gain of their mechanical strength by 2–3 times and thermal stability by 1,5 times in comparison with the untreated samples. Use of the strengthened thin glasses will allow to lower the weight of products on the basis of sheet glass.

В последнее время все большее внимание уделяется производству листовых стекол тонких номиналов, отличающихся повышенными механическими характеристиками, что позволяет снизить вес изделия и увеличить его надежность при эксплуатации. Такие стекла используются для остекления теплиц, транспорта, изготовления стеклопакетов, солнечных батарей.

Упрочнение стеклянных изделий осуществляют разными способами:

- путем нейтрализации дефектов и повышения качества поверхности. Сюда относят механическую, огневую и химическую полировку, методы нанесения защитных пленок;
- путем создания сжимающих напряжений в результате закалки или ионного обмена.

Основным недостатком способов упрочнения первой группы, является существенное снижение прочности стекол при повреждении поверхности стекла в результате механического или химического воздействия. Серьезным препятствием для широкого применения химической полировки служат необходимость использования токсичных сред, большие затраты фтористоводородной кислоты, непроизводительные потери стекла.

Среди способов второй группы воздушная закалка получила самое широкое распространение в производстве стеклоизделий, обладающих высокой прочностью, термостойкостью, сравнительно малой массой и «безопасным» характером разрушения. Однако, несмотря на свою сравнительную простоту и низкую стоимость, она малоэффективна (непригодна) при упрочнении тонких стекол (3 мм и менее) и вызывает изменения оптических характеристик стекла (появление «закалочных пятен»), а также частую деформация изделий в ходе термообработки.

Для упрочнения тонких стекол, стеклоизделий сложной конфигурации, в том числе полых и переменной толщины, для которых использование закалки невозможно или малоэффективно, целесообразно применять низкотемпературное ионообменное упрочнение в расплавах солей, которое в отличие от закалки позволяет обеспечить более высокое приращение прочности и отсутствие саморазрушения при хранении, царапании, резании, сверлении. Кроме того, поскольку остаточные сжимающие напряжения создаются при температурах ниже  $T_g$ , это позволяет исключить вязкую деформацию стеклоизделий при ионообменном упрочнении [1, 2].

В работе проведены исследования влияния температурно-временного режима химической закалки листовых стекол тонких номиналов в расплаве  $KNO_3$  на их свойства. Планирование эксперимента осуществлялось согласно трехуровневому полному факторному плану (ПФЭ  $3^2$ ), в котором реализованы комбинации для 2-х факторов (температура и время обработки образцов листового стекла в расплаве  $KNO_3$ ). Интервал изменения температуры составлял 400–500 °С. Это обусловлено тем, что величина температуры должна обеспечивать получение расплава  $KNO_3$  и

при этом не должна вызывать релаксацию напряжений для того, чтобы возникающие в результате диффузии ионов напряжения накапливались в стекле. Время обработки варьировалось в пределах 0,5–3,5 ч.

Образцы стекол тонких номиналов погружали в расплав  $KNO_3$  при различных температурах и времени выдержки в соответствии с условиями опытов, представленными в матрице планирования ПФЭ  $3^2$ . Каждый опыт повторялся несколько раз для оценки дисперсии воспроизводимости и проверки адекватности получаемой статистической модели.

На основе результатов исследований свойств: термостойкости, механической прочности (оценивалась по высоте падения стального шара массой 120 г, при которой происходило разрушение образца) и микротвердости по Виккерсу обработанных образцов стекол, по методу наименьших квадратов в программе Mathcad 15 рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии.

Анализ полученных данных показал, что существенное влияние на свойства стекол тонких номиналов оказывают, как температура, так и время их ионообменной обработки в расплаве  $KNO_3$ . Повышение температуры до 500 °С и времени обработки до 3,5 ч обеспечивают существенный прирост термостойкости, микротвердости и механической прочности стекол (таблица 1).

Таблица 1 – Физико-химические свойства стекол

Показатели	Значения показателя после ионообменной обработки при температуре		
	400 °С	450 °С	500 °С
Термическая стойкость, %	190–200	210–220	230–260
Микротвердость, МПа	4860–4950	5300–5470	5400–5710
Коэффициент упрочнения по прочности на удар (ГОСТ 10377)	2,0	2,3	2,8
Светопропускание, %	89,5–90		

Результаты определения свойств подтверждаются данными микросондового анализа химического состава скола образцов. Выявлено, что распределение концентрации ионов  $K^+$  по глубине поверхностного слоя стекла изменяется экспоненциально. Диффузия ионов  $K^+$  осуществляется в узком поверхностном слое стекла, глубина которого не превышает 10–15 мкм вне зависимости от температурно-временного режима ионообменного упрочнения. Повышение времени и температуры обработки обуславливает значительный рост концентрации ионов  $K^+$  за счет замещения ионов  $Na^+$  на глубине не более 1–2,5 мкм, по-видимому, заполнение полостей кремнекислородного каркаса стекла более крупными ионами  $K^+$  обеспечивает уплотнение структуры поверхностного слоя и не позволяет им проникать на большую толщину стекла. Максимальная концентрация ионов  $K^+$  равная 10,6 мас.% достигается в поверхностном слое стекла при температуре 500 °С и времени обработки 3,5 ч, что обуславливает возникновение высоких значения напряжений сжатия и, как следствие, прирост механической прочности стекла в 2–3 раза, а термостойкости в 1,5 раза по сравнению с исходным.

Таким образом, метод низкотемпературного ионного обмена позволяет значительно повысить физико-химические свойства листового стекла тонких номиналов (толщина 0,4–1 мм), обеспечив их эксплуатационные характеристики на уровне стекла толщиной 2–3 мм.

Одновременно с увеличением прочности стекла тонких номиналов приобретают высокую прозрачность (за счет снижения толщины стекла), повышенную термостойкость и твердость поверхности.

1. Бутаев, А.М. Прочность стекла. Ионообменное упрочнение / Бутаев А.М. – Махачкала: ДГУ, 1997. – 253 с.
2. Соболев, Е.В. Состояние и перспективы работ по внедрению в производство ионообменного метода упрочнения стекла / В.Г. Соболев // Ионный обмен в производстве стекла: сб. науч. ст. / Гос. науч.-исслед. Институт стекла. – М, 1988. – С.3–4.