
Мачалін І.О.

СТРАТЕГІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Запропоновано методичку оптимізації різних варіантів стратегій технічного обслуговування транспортних систем навігації та зв'язку з використанням наземних автоматизованих засобів контролю. Показані умови ефективності впровадження кожної із стратегій.

Ключові слова: *технічне обслуговування, контроль працездатності, автоматизована система контролю, експлуатаційні витрати.*

УДК 621.73.06-52

Родичев Ю.М., Шабетя А.А., Горалик Е.Т.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНОГО ОСТЕКЛЕНИЯ ПО КРИТЕРИЯМ ПРОЧНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТАТИСТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

В статье показано, что технологические поверхностные дефекты, сформированные при обработке стекла, являются причиной мультимодального характера кривых распределения прочности по Вейбуллу. С учетом влияния механической обработки на дефектность поверхности стекла изучено статистическое распределение значений предела прочности при изгибе. Были изучены форма и размеры критических микротрещин – источников разрушения. Показано, что статистические характеристики конструкционной прочности стекла могут быть оптимизированы за счет контроля поверхностных дефектов и условий их формирования при производстве несущих конструкций на основе результатов прочности.

Ключевые слова: *стекло, поверхностные дефекты, статистическое распределение, прочность.*

Известно, что преимущественное влияние на прочность и долговечность конструкций из стекла оказывают поверхностные дефекты [1-3]. Нестабильность формы и глубины критических дефектов определяется несовершенством технологических процессов механической обработки стекла и отсутствием надлежащих методов контроля при производстве транспортно-остекления. В результате этого показатели прочности и долговечности конструктивных элементов из стекла характеризуются большим разбросом и сложными кривыми статистического распределения.

Целью настоящего исследования является анализ статистических характеристик распределения результатов испытаний на изгиб листового флоат стекла и создание на его основе подхода к совершенствованию технологии обработки элементов из стекла по критериям прочности и трещиностойкости.

При исследовании прочности листового флоат стекла нами было показано, что неопределенность уровня прочности конструктивных элементов типа балок, пластин, работающих в условиях изгиба, является следствием неконтролируемых на производстве микроскопических поверхностных трещин и дефектов. Неоднородность форм и глубины микротрещин приводит к значительному разбросу результатов механических испытаний и систематическому отклонению экспериментальных кривых распределения от моно-линейного распреде-

ления Вейбулла [2-4]. Разброс показателей прочности во многих случаях достигал 30 ... 50 % от среднего уровня прочности образцов разных форм и размеров. В результате прогнозирования нижнего уровня предела прочности при проектировании конструкций приводило к низким значениям прочности и допускаемых напряжений, которые были в 5...10 раз ниже среднего уровня прочности.

Экспериментальные результаты конструкционной прочности флоат стекла, полученные при испытаниях на четырехточечный изгиб плоских образцов размерами 6 x 40 x 400 мм приведены на рисунках 1 и 2 [4]. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Zwick Z100 с постоянной скоростью перемещения траверсы, которая составляла 5мм/мин. Расстояние между верхними нагружающими опорами было 175 мм, а между нижними – 350 мм. Образцы вырезали из листового стекла на промышленных установках для резки листов с размерами 3200 x 6000 мм. Резка осуществлялась твердосплавным роликом в автоматическом режиме. Торцы образцов обрабатывались на многошпиндельном станке, выполняющем грубую, тонкую шлифовку и полировку боковой грани и фасок 1мм x 45°. Контроль качества осуществлялся визуально. Режимы резки образцов и обработки торцов соответствовали рекомендованным при серийном производстве крупноразмерного архитектурного стекла.

На рис.1 показано распределение по Вейбуллу величины предела прочности образцов при испытании на чистый изгиб. Кромка образца, неповрежденная в результате резки находилась в зоне растяжения.

Как видно из рисунка, экспериментальная кривая распределения не является мономодальной. Среднее значение предела прочности $\bar{\sigma} = 61.5$ МПа. Большой разброс результатов – 30 % (коэффициент вариации – 20 %) связан со значительной неоднородностью параметров источников разрушения (микротрещин). В верхней части кривой распределения находятся результаты испытаний основной группы образцов с вероятностью разрушения выше 5 % и максимальным уровнем прочности $\sigma_{\max} = 100$ МПа.

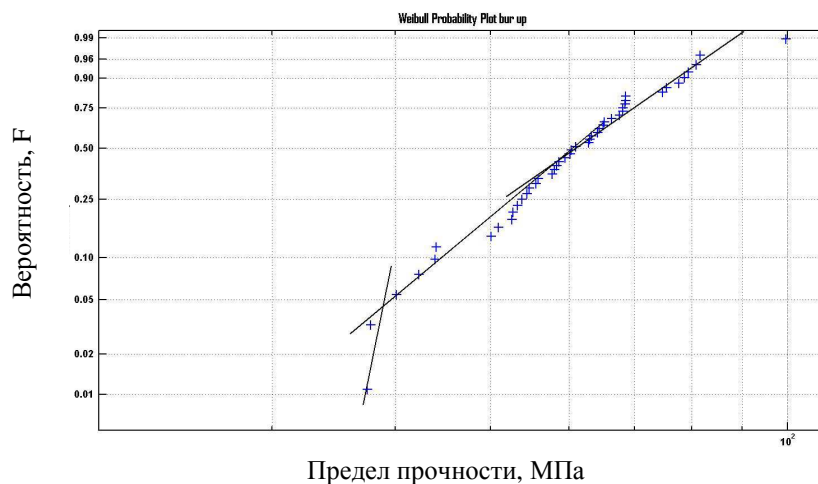


Рис.1. Распределение по Вейбуллу величины предела прочности образцов при испытании на изгиб (неповрежденная кромка в зоне растяжения)

Нижняя часть кривой распределения соответствует образцам с минимальным уровнем прочности (σ_{\min} около 40 МПа), обусловленным грубыми дефектами обработки и трещинами в фокусе разрушения. Угол наклона нижней части кривой к оси абсцисс значительно превышает угол наклона верхнего участка, что свидетельствует о различной природе формирования грубых дефектов по сравнению с другими дефектами обработки. Это обстоятельство необходимо учитывать при оценке нижней границы значений прочности при вероятности разрушения менее 5 %.

На рис.2 представлено распределение по Вейбуллу величины предела прочности образцов при испытании на чистый изгиб, когда кромка образца, неповрежденная в результате резки кромка находилась в зоне сжатия. Как и в предыдущем случае, наблюдается мультимодальность распределения (можно выделить три прямолинейных участка с различным углом наклона). Разброс результатов меньше, чем при испытаниях, когда неповрежденная кромка расположена в зоне растяжения. Среднее значение предела прочности $\bar{\sigma}$ составляет 51.5 МПа, максимальное – 59.0 МПа, минимальное – 34.5 МПа. Таким образом, чем крупнее и глубже поверхностные дефекты на резаной кромке, тем меньше разброс значений предела прочности обработанных стеклянных деталей.

Необходимо отметить, что средняя величина предела прочности не является определяющей характеристикой прочности стекла, что обусловлено большим статистическим разбросом значений предела прочности. Наибольшая неопределенность связана с определением нижней границы прочности при использовании в статистических расчетах монолинейной моды распределения Вейбулла, представленной верхними участками экспериментальных кривых распределения (рис.1,2). Это связано со значительным отклонением результатов испытаний в нижней части экспериментальной кривой от монолинейной моды распределения. В связи с этим проблема оценки нижней границы предела прочности и определения допускаемых напряжений при создании несущих элементов конструкций из стекла является чрезвычайно сложной. Таким образом, важной представляется задача оценки влияния технологических поверхностных дефектов на разрушение и статистические параметры прочности элементов из стекла.

Была испытана также группа образцов из флоат стекла толщиной 6мм, обработанного по другой технологии. Плоские образцы размерами 6 x 50 x 130 мм после резки подвергались шлифованию алмазным кругом с целью притупления кромок с образованием фаски 1 x 45°. Торцевая поверхность образцов не подвергалась шлифованию.

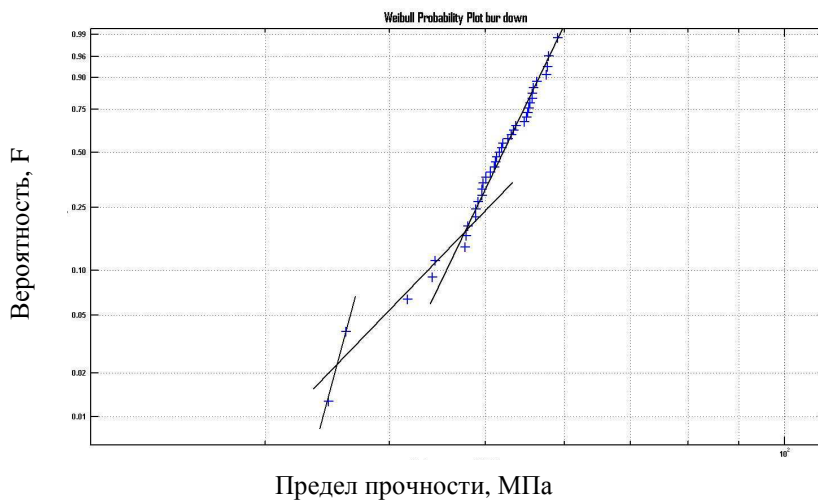


Рис.2. Распределение по Вейбуллу величины предела прочности образцов при испытании на изгиб (неповрежденная кромка в зоне сжатия)

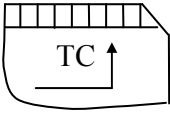
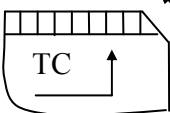
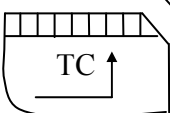
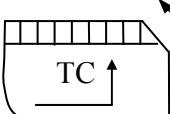
Образцы испытывались в условиях четырехточечного изгиба (расстояние между опорными роликами 100 мм, между нагружающими роликами – 50 мм) на универсальной гидравлической машине ZD-4 с постоянной скоростью нагружения 60 МПа/мин. Результаты испытаний приведены в таблицах 1, 2.

20 образцов были разделены на четыре подгруппы (по 5штук) и обработка их кромок осуществлялась четырьмя различными способами. Нашей задачей было оценить величину предела прочности стекла σ_u в зависимости от направления шлифования острой кромки. Схемы, указывающие направление шлифования фаски и расположение трещиноватого по-

верхностного слоя (ТС), изображены в комментариях к таблице 1. Торцевая поверхность края образцов, сформированная в результате резки стекла твердосплавным роликом, имеет малое количество дефектов благодаря высокой однородности внутренней структуры флотат стекла, и при технологической операции формирования фасок не повреждалась. Острые кромки, образовавшиеся при разламывании стекла на отдельные образцы для образцов 1-10 были ошлифованы и находились при испытаниях в зоне растяжения. Таким образом, предел прочности для образцов этой группы связан с технологической дефектностью, возникающей в процессе обработки острых кромок. Для группы образцов 11-20 обработка шлифованием осуществлялась с обратной стороны образцов, на которой кромки были повреждены в результате контакта с твердосплавным режущим роликом с образованием характерных латеральных микротрещин. Размер фаски был выбран исходя из условия удаления этих микротрещин в процессе шлифования.

Таблица 1

Результаты испытаний при чистом изгибе образцов размерами 6 x 50 x 130 мм флотат стекла с различными способами обработки кромок

№ п/п	σ_u , МПа	$\bar{\sigma}$ $\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$	Примечание	
1	52,5	$\frac{55,0}{50,7...60,0}$		"Ломаная" кромка, шлифованная со стороны трещиноватого слоя 1-3- краевой излом (КИ); 4,5- центральный излом (ЦИ)
2	60,0			
3	53,3			
4	50,7			
5	58,9			
1	57,6	$\frac{55,0}{48,0...58,9}$		"Ломаная" кромка – обратное направление шлифования 1,2,4,5-КИ; 3-ЦИ
2	48,0			
3	48,0*			
4	56,0			
5	58,9			
1	63,0	$\frac{59,0}{54,0...63,0}$		Кромка, поврежденная в процессе резки, шлифованная со стороны трещиноватого слоя 2,4,5-КИ; 1,3-ЦИ
2	59,0			
1	51,6	$\frac{53,7}{41,0...60,0}$		Кромка, поврежденная в процессе резки, обратное направление шлифования 1-4-КИ; 5-ЦИ
2	60,0			

Результаты испытаний четырех видов образцов сравнимы по полученным значениям предела прочности. Это позволило объединить их в общую статистическую выборку (рис.3). Эти результаты ясно отображают применимость монолинейного распределения Вейбулла для статистического анализа данных, полученных при оценке предела прочности элементов из стекла с однородными поверхностными дефектами, сформированными в результате одного конкретного вида механической обработки.

При этом, другие дефекты: исходные дефекты трещиноватого слоя, дефекты необработанной торцевой поверхности не оказывали заметного влияния на полученные результаты.

На рисунке 4 показан источник разрушения на остром крае стеклянного образца, притупленном фаской с фактическим размером 0.7 мм x 45°. Длинная поверхностная микротрещина

глубиной $b = 30\mu\text{м}$ была обнаружена в результате микрофрактографического анализа источника разрушения в зеркальной зоне поверхности разрушения образца при чистом изгибе.

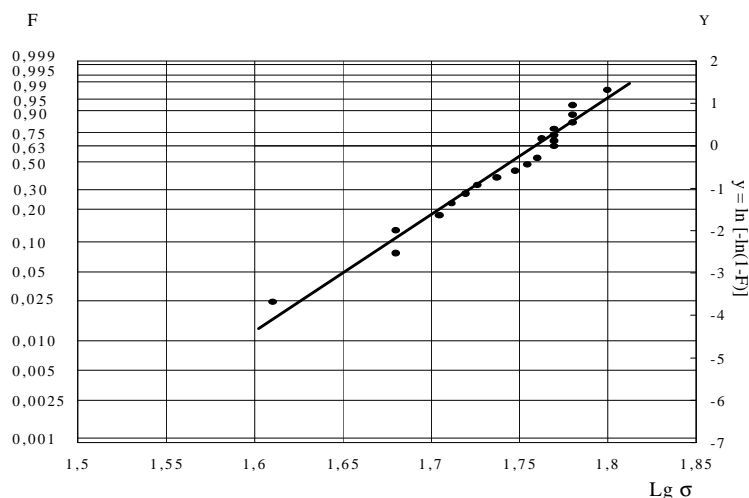


Рис.3. Распределение по Вейбуллу величины предела прочности при испытании на изгиб образцов размерами 6 x 50 x 130 мм флоат стекла с различными способами обработки кромок

Критический коэффициент интенсивности напряжений $K_{ICr} = 0.45 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ для данного образца был рассчитан по формуле

$$K_{ICr} = \sigma_u \cdot Y \cdot \sqrt{b},$$

где $\sigma_u = 45 \text{ МПа}$ - предел прочности для данного образца;

Y - геометрический параметр, величина которого для длинной поверхностной трещины составляет 1.8; $b = 30\mu\text{м}$.

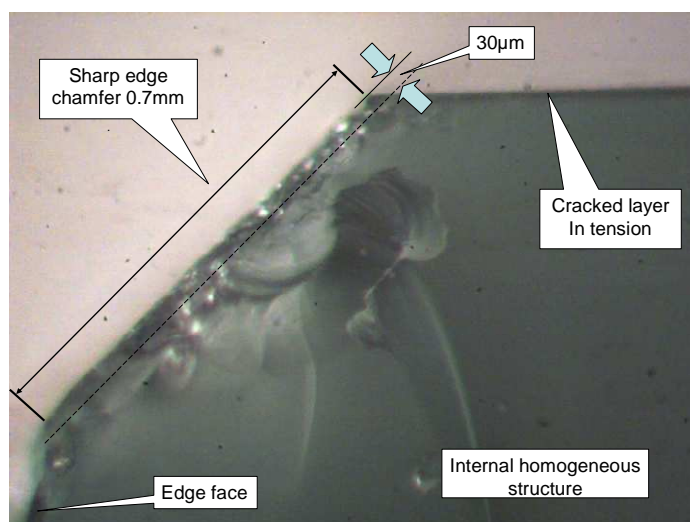


Рис.4: Источник разрушения на шлифованной фаске в виде микротрещины

Приведенные результаты оценки дефектности поверхности в результате механической обработки показывает прямую корреляцию геометрических параметров микротрещины с уровнем прочности обработанного стеклоэлемента. Таким образом, установленный стати-

стический разброс результатов испытаний при оценке прочности стекла является результатом неоднородности формы и размеров поверхностных дефектов в виде микротрещин, сформированных при шлифовании фаски.

Для повышения достоверности полученных результатов и уточнения характера экспериментальной кривой статистического распределения величины предела прочности стекла были проведены дополнительные испытания тридцати образцов по той же схеме и режимам нагружения. Эти образцы обрабатывались шлифованием фаски на кромках поврежденных в процессе резки со стороны трещиноватого слоя. Результаты испытаний объединены в общую выборку (50 образцов) и представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты статистического анализа данных испытаний
общей выборки образцов со шлифованной кромкой.**

№/№	σ_u МПа	Lg σ_u	F	Y(F)	№/№	σ_u МПа	Lg σ_u	F	Y(F)
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	36,0	1,55	0,01	-4,6	26	53,3	1,73	0,51	-0,34
2	40,4	1,61	0,03	-3,49	27	54,0	1,732	0,53	-0,28
3	41,0	1,613	0,05	-2,97	28	54,0	1,732	0,55	-0,23
4	41,0	1,613	0,07	-2,62	29	54,6	1,74	0,57	-0,17
5	43,0	1,63	0,09	-2,36	30	54,6	1,74	0,59	-0,115
6	45,0	1,65	0,11	-2,15	31	56,0	1,748	0,61	-0,06
7	45,6	1,66	0,13	-1,97	32	56,0	1,748	0,63	-0,006
8	47,0	1,67	0,15	-1,82	33	56,0	1,748	0,65	0,05
9	48,0	1,68	0,17	-1,68	34	56,0	1,748	0,67	0,103
10	48,0	1,68	0,19	-1,56	35	57,0	1,756	0,69	0,16
11	48,0	1,68	0,21	-1,45	36	57,0	1,756	0,71	0,213
12	48,0	1,68	0,23	-1,34	37	57,0	1,756	0,73	0,27
13	48,0*	1,68	0,25	-1,25	38	57,6	1,76	0,75	0,33
14	48,5	1,685	0,27	-1,16	39	57,6	1,76	0,77	0,39
15	49,0	1,69	0,29	-1,07	40	58,0	1,763	0,79	0,445
16	50,0	1,70	0,31	-0,99	41	58,9	1,77	0,81	0,51
17	50,0	1,70	0,33	-0,92	42	58,9**	1,77	0,83	0,57
18	50,7*	1,71	0,35	-0,84	43	59,0	1,77	0,85	0,64
19	51,0	1,71	0,37	-0,77	44	59,0	1,77	0,87	0,713
20	51,6	1,713	0,39	-0,70	45	59,0	1,77	0,89	0,80
21	51,6	1,713	0,41	-0,64	46	60,0	1,78	0,91	0,88
22	51,6	1,713	0,43	-0,58	47	60,0	1,78	0,93	0,98
23	52,5	1,72	0,45	-0,51	48	60,0	1,78	0,95	1,10
24	52,6	1,721	0,47	-0,45	49	60,6	1,78	0,97	1,25
25	53,0	1,724	0,49	-0,40	50	63,0	1,80	0,99	1,53
$\bar{\sigma} = 52,6$ МПа, $\sigma_{max} = 63,0$ МПа, $\sigma_{min} = 36,0$ МПа									
Среднее стандартное отклонение $S = 6,0$ МПа, Коэффициент вариации $v = 11,4\%$									

На рис.5 представлена экспериментальная кривая распределения по Вейбуллу значений предела прочности образцов при чистом изгибе.

Эти результаты убедительно показывают возможность управления характером статистического распределения характеристик прочности стекла за счет выбора технологических параметров обработки поверхности элементов конструкций из стекла, позволяющих обеспечить надлежащий характер и уровень дефектности поверхности.

Сравнение данных, представленных на рис.3 и рис.5 показывают применимость моноимодального распределения Вейбулла для оценки прочности стекла, обработанного по технологии, обеспечивающей однородность технологических дефектов поверхности.

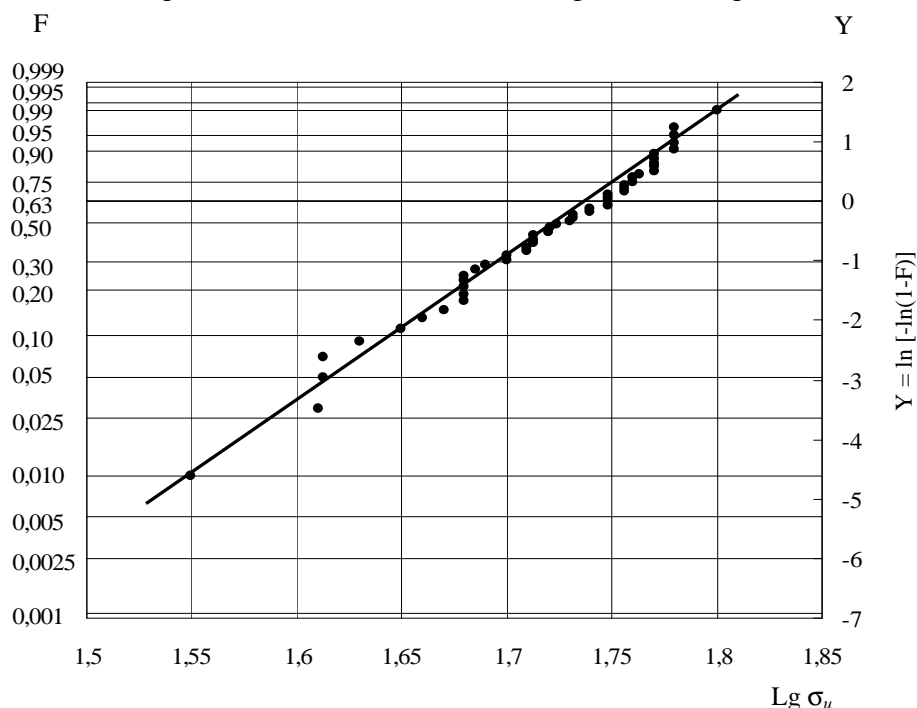


Рис.5. Распределение по Вейбуллу величины предела прочности при испытании на изгиб объединенной выборки образцов (50штук) флоат стекла

Выводы. Результаты проведенных исследований и их анализ позволили сделать следующие выводы:

Широко применяемое на практике при оценке конструкционной прочности транспортного остекления, мономодальное распределение по Вейбуллу применимо только при статистическом анализе экспериментальных данных, полученных для стекла с однородными технологическими дефектами.

Мономодальное распределение по Вейбуллу в случаях, когда обработка элемента из стекла осуществлялась без надлежащего контроля дефектов на каждом технологическом этапе, неприменимо, а оценка прочности и несущей способности элементов из стекла затруднена в силу неопределенности.

Технология производства ответственных элементов из стекла требует:

входного контроля стекла с использованием методов механических испытаний и предложенной методики фрактографического анализа для оценки уровня и характера начальной дефектности, в том числе грубых дефектов и параметров нарушенного трещиноватого слоя;

контроля на каждом этапе обработки с целью выявления наиболее крупных технологических дефектов и коррекции последующих технологических операций для устранения этих дефектов;

внедрения в производство методов контроля прочности и дефектности стеклоизделий и оптимизации всей цепочки технологического процесса изготовления архитектурного стекла и элементов остекления для транспортного машиностроения по критериям прочности и трещиностойкости

ЛИТЕРАТУРА

1. The features of fracture and engineering strength of glass materials with surface, internal and mixed modes of critical defects / Rodichev Yu., Tregubov N., Veer F., Maslov V.// Glass Performance Days-2011 Proc.- Tampere, Finland, 2011. – P.525-528.

2. Corrosion effects on soda lime glass /Veer F., Rodichev Yu.// Proc. of Challenge glass 2.- 2010.-TU Delft, Netherlands, 2010. – P.385-393.
3. Influence of surface and internal defects on the fracture and engineering strength of glassmaterials/Rodichev Yu, Tregubov N., Veer F., Maslov V.// Proc. of Int. conf. “In-service damage of materials, its diagnostics and prediction”.-2011, Ternopil, Ukraine, 2011. – P.114-123.
4. The structural strength of glass; hidden damage/ Veer F.A., Rodichev Yu. M.// Проблемы прочности .– 2011.– № 3. – С. 93-109.

Родічев Ю.М., Шабетя А.А., Горалік Є.Т.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНОГО СКЛІННЯ ЗА КРИТЕРІЯМИ МІЦНОСТІ І ТРИЩИННОСТІЙКОСТІ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ СТАТИСТИЧНОГО РОЗПОДІЛУ РЕЗУЛЬТАТІВ МЕХАНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЛИСТОВОГО СКЛА

У статті показано, що технологічні поверхневі дефекти, сформовані при обробці скла, являються причиною мультимодального характеру кривих розподілу міцності по Вейбуллу. З урахуванням впливу механічної обробки на дефектність поверхні скла вивчено статистичний розподіл значень границі міцності при згині. Були вивчені форма і розміри критичних мікротріщин – джерел руйнування. Показано, що статистичні характеристики конструкційної міцності скла можуть бути оптимізовані за рахунок контролю поверхневих дефектів та умов їх формування при виробництві несучих конструкцій на основі результатів міцності.

Ключові слова: скло, поверхневі дефекти, статистичний розподіл, міцність.

Rodichev Y.M., Shabetia A.A., Goralic E.T.

UPGRADING OF TRANSPORT GLAZING ELEMENTS MACHINING ACCORDING TO STRENGTH AND CRACK RESISTANCE CRITERIA ON THE BASIS OF STATISTICAL DISTRIBUTION OF MECHANICAL TESTS OF FLAT GLASS

It was shown in the paper that surface technological defects formed under glass processing are the cause of the multi-linear nature of the Weibull plots for strength data. The results of an experimental study of statistical distribution of bending strength values were obtained in view of the effect of mechanical treatment on glass surface defectiveness and strength. The shapes and sizes of fracture sources - critical micro-cracks and damages were investigated. It was shown that the statistical behavior of structural glass strength may be controlled by monitoring critical surface defects, conditions of their formation in production of load carrying glass structures basing on experimental strength data.

Keywords: glass, surface defects, statistical distribution, strength.

УДК 531.53: 517.938

Лупіна Т.О.

ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛОЖЕННЯ РІВНОВАГИ ПЕРЕВЕРНУТОГО ПОДВІЙНОГО МАЯТНИКА З В'ЯЗКО-ПРУЖНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

В даній роботі розглянуто перевернутий подвійний маятник з в'язко-пружними шарнірами, верхній кінець якого закріплено в'язко-пружно. Наведена оцінка впливу в'язкого