

УДК 539.4;519.221

Ю. Родичев¹, канд. техн. наук; Е. Сорока¹, докт. техн. наук;
А. Шабетя²; В. Хворостяний¹; Н. Трегубов³

¹Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины

²УНК Институт прикладного системного анализа, НТУУ «КПИ»

³КНПП «Кварцит»

ОЦЕНКА ЛОКАЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ПО ПАРАМЕТРАМ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Резюме. Проведен статистический анализ результатов испытаний листового стекла и алюмокерамики при царапании со скалыванием индентором Роквелла. Определены параметры распределения Вейбулла для экспериментальных результатов. Получены статистически обоснованные значения параметра повреждаемости при вероятности разрушения от 0,01 до 0,99, что позволило уточнить характеристики локальной прочности стекла и керамики и повысить достоверность прогноза работоспособности материала при заданной вероятности разрушения ответственных изделий. Показана неприемлемость линейной аппроксимации зависимости разрушающей нагрузки P от расстояния разрушения L при локальном нагружении хрупких материалов. Для листового стекла в области малых нагрузок обнаружена аномально высокая повреждаемость, характеризующаяся возможными размерами скола до 0,520 мм, что в три раза превышает предельные размеры сколов для керамики Al_2O_3 -I. Результаты могут быть использованы при выборе и оптимизации технологии изготовления оптического стекла, дентокерамики и режущего керамического инструмента.

Ключевые слова: стекло, керамика, локальная прочность, повреждаемость, скалывание, статистический анализ, распределение Вейбулла.

Y. Rodichev, E. Soroka, A. Shabetia, V. Khvorostianiy

ESTIMATION OF LOCAL STRENGTH AND DAMAGEABILITY OF BRITTLE MATERIALS ON EXPERIMENTAL DATA DISTRIBUTION OF STATISTICAL PARAMETERS

Summary. Local strength and the edge damageability of amorphous and crystalline brittle materials are estimated by the methods of statistical analysis. The Weibull distribution is used to analyze experimental data of scratching with edge chipping for the samples of float glass and dense ceramics Al_2O_3 -I. The shape and the scale parameters of the Weibull distribution for the experimental results on the edge destruction, depending on the distance from the edge are determined. A fundamental difference in the mechanical behavior of amorphous and crystalline brittle materials under the local loading is detected. Statistically valid values of damageability parameter L for the fracture probability in the interval 0.01...0.99 are obtained. This allowed specifying the characteristics of the local strength of glass and ceramics, and improving the reliability of the forecast performance of the material at a given probability of failure. It is obtained, that dense ceramic is characterized by non-linear S-shaped form of the plot of the fracture load P versus fracture distance L . In the range of high loads of glass, a similar to ceramic S-shaped dependence $P = f(L)$ is observed. Abnormally high damageability for float glass in the range of small loads characterized by chipping to the possible size of 0.520 mm, which is three times the size for chipping of ceramic Al_2O_3 -I, is detected. It is shown that the estimation error in the parameter of fracture resistance to chipping F_{RS} at the failure probability of 1% as an average value of the ratio P/L was 64% and 391% for ceramics and glass, respectively, compared with the predicted resistance to chipping, defined on the basis of a probabilistic approach. This proves the unacceptability of the linear approximation of the dependence $P = f(L)$, which has been adopted in literature, especially for critical parts made of the brittle materials. The results are the basis for a focused selection of brittle materials, depending on their function. The results can be used for selecting and optimizing the manufacturing technology of optical glass, dental ceramics and ceramic cutting tool.

Key words: glass, ceramics, local strength, edge damageability, chipping, statistical analysis, Weibull distribution.

Вступлення. Значительный разброс экспериментальных результатов, получаемых при оценке эксплуатационных характеристик хрупких материалов различных классов, не позволяет достоверно оценить и прогнозировать закономерности их механического поведения без использования методов статистического анализа. Специфика применения таких материалов состоит в том, что их функциональные характеристики зависят от параметров локальной прочности. Особо значительное рассеяние результатов наблюдается при оценке локального сопротивления разрушению стекол и керамик в условиях нагружения края инденторами различных типов [1]. Однако до настоящего времени оценка и прогноз механического поведения при индентировании края различными способами (скальванием и царапанием до скальвания) выполняется на основе критериев, не отражающих особенности параметров распределения экспериментальных значений [2].

Целью данной работы есть анализ закономерностей статистического распределения сопротивления при локальном нагружении аморфных и кристаллических хрупких материалов, повышение достоверности прогноза работоспособности материала при заданной вероятности разрушения и создание основ для целенаправленного выбора хрупких материалов.

Проведена статистическая обработка и анализ экспериментальных результатов (таблицы 1, 2) при испытаниях в условиях царапания со сколом краевой зоны образцов из листового стекла и плотной керамики Al_2O_3 -1 размером 4×3×25 мм, полученных в работах [3, 4]. Испытания проводились с использованием индентора Роквелла.

Таблица 1

Результаты испытаний при царапании со сколом листового стекла

| $P = 11,62Н$ | | $P = 16,22Н$ | | $P = 21,43Н$ | | $P = 26,33Н$ | | $P = 31,24Н$ | | $P = 36,14Н$ | |
|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| $L, мм$ | $P/L, Н/мм$ | $L, мм$ | $P/L, Н/мм$ | $L, мм$ | $P/L, Н/мм$ | $L, мм$ | $P/L, Н/мм$ | $L, мм$ | $P/L, Н/мм$ | $L, мм$ | $P/L, Н/мм$ |
| 0,084 | 138,3 | 0,093 | 177,6 | 0,121 | 177,1 | 0,168 | 156,7 | 0,220 | 142,0 | 0,260 | 139,0 |
| 0,086 | 135,1 | 0,094 | 175,7 | 0,151 | 141,9 | 0,174 | 151,3 | 0,225 | 138,8 | 0,280 | 129,1 |
| 0,087 | 133,6 | 0,113 | 146,2 | 0,152 | 141,0 | 0,175 | 150,5 | 0,240 | 130,2 | 0,280 | 129,1 |
| 0,090 | 129,1 | 0,119 | 138,8 | 0,163 | 131,5 | 0,186 | 141,6 | 0,280 | 111,6 | 0,293 | 123,3 |
| 0,129 | 90,1 | 0,119 | 138,8 | 0,165 | 129,9 | 0,195 | 135,0 | 0,290 | 107,7 | 0,293 | 123,3 |
| 0,133 | 87,4 | 0,122 | 135,4 | 0,170 | 126,1 | 0,196 | 134,3 | 0,291 | 107,4 | 0,300 | 120,5 |
| 0,152 | 76,4 | 0,130 | 127,1 | 0,177 | 121,1 | 0,196 | 134,3 | 0,294 | 106,3 | 0,300 | 120,5 |
| 0,159 | 73,1 | 0,145 | 113,9 | 0,189 | 113,4 | 0,201 | 131,0 | 0,295 | 105,9 | 0,302 | 119,7 |
| 0,167 | 69,6 | 0,151 | 109,4 | 0,190 | 112,8 | 0,215 | 122,5 | 0,300 | 104,1 | 0,311 | 116,2 |
| 0,170 | 68,4 | 0,152 | 108,7 | 0,191 | 112,2 | 0,218 | 120,8 | 0,300 | 104,1 | 0,311 | 116,2 |
| 0,172 | 67,6 | 0,174 | 94,9 | 0,197 | 108,8 | 0,220 | 119,7 | 0,306 | 102,1 | 0,319 | 113,3 |
| 0,172 | 67,6 | 0,181 | 91,3 | 0,200 | 107,2 | 0,226 | 116,5 | 0,307 | 101,8 | 0,320 | 112,9 |
| 0,177 | 65,6 | 0,184 | 89,8 | 0,203 | 105,6 | 0,245 | 107,5 | 0,310 | 100,8 | 0,320 | 112,9 |
| 0,180 | 64,6 | 0,192 | 86,0 | 0,213 | 100,6 | 0,247 | 106,6 | 0,322 | 97,0 | 0,329 | 109,8 |
| 0,184 | 63,2 | 0,208 | 79,4 | 0,214 | 100,1 | 0,249 | 105,7 | 0,325 | 96,1 | 0,329 | 109,8 |
| 0,186 | 62,5 | 0,232 | 71,2 | 0,214 | 100,1 | 0,258 | 102,1 | 0,330 | 94,7 | 0,336 | 107,6 |
| 0,195 | 59,6 | 0,240 | 68,8 | 0,225 | 95,2 | 0,275 | 95,7 | 0,357 | 87,5 | 0,337 | 107,6 |
| 0,216 | 53,8 | 0,252 | 65,6 | 0,242 | 88,6 | 0,281 | 93,7 | 0,360 | 86,8 | 0,359 | 100,7 |
| 0,218 | 53,3 | 0,274 | 60,3 | 0,262 | 81,8 | 0,298 | 88,4 | 0,360 | 86,8 | 0,360 | 100,4 |

В таблицах 1 и 2 представлены значения расстояния разрушения L , определяемые как расстояние от кромки образца до крайней точки шрама скола на плоскости нагружения (рис. 1) и параметра P/L , где P – постоянное усилие на инденторе, которое изменяли ступенчато в диапазоне 10...50 Н. Скорость перемещения индентора при царапании была постоянна и составляла 5 мм/мин.

В работе было уделено внимание анализу степени повреждения края при скальвании. В качестве параметра повреждаемости материала было принято L . На рис. 1 показаны микротрещина 1, образовавшаяся под индентором на поверхности линейного отпечатка 2, направление перемещения индентора относительно края образца (вертикальная фигурная стрелка), характер повреждения поверхности под индентором в виде канавки шириной w_s и разрушения в виде скола края хрупкого материала, а также способ измерения параметра L при постоянной нагрузке P .

Таблица 2

Результаты испытаний при царапании со сколом керамики Al_2O_3-1

| $P = 20Н$ | | $P = 30Н$ | | $P = 40Н$ | | $P = 50 Н$ | |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|------------|--------------|
| L , мм | P/L , Н/мм | L , мм | P/L , Н/мм | L , мм | P/L , Н/мм | L , мм | P/L , Н/мм |
| 0,075 | 267 | 0,120 | 250 | 0,125 | 320 | 0,165 | 303 |
| 0,085 | 235 | 0,120 | 250 | 0,130 | 308 | 0,165 | 303 |
| 0,090 | 222 | 0,125 | 240 | 0,155 | 258 | 0,195 | 256 |
| 0,090 | 222 | 0,135 | 222 | 0,160 | 250 | 0,200 | 250 |
| 0,090 | 222 | 0,135 | 222 | 0,160 | 250 | 0,200 | 250 |
| 0,090 | 222 | 0,135 | 222 | 0,160 | 250 | 0,205 | 244 |
| 0,092 | 217 | 0,140 | 214 | 0,170 | 235 | 0,210 | 238 |
| 0,095 | 211 | 0,140 | 214 | 0,170 | 235 | 0,220 | 227 |
| 0,100 | 200 | 0,140 | 214 | 0,175 | 229 | 0,220 | 227 |
| 0,105 | 190 | 0,145 | 207 | 0,175 | 229 | 0,220 | 227 |
| 0,105 | 190 | 0,150 | 200 | 0,180 | 222 | 0,225 | 222 |
| 0,105 | 190 | 0,150 | 200 | 0,180 | 222 | 0,225 | 222 |
| 0,110 | 182 | 0,160 | 188 | 0,180 | 222 | 0,230 | 217 |
| 0,110 | 182 | 0,160 | 188 | 0,180 | 222 | 0,240 | 208 |
| 0,120 | 167 | 0,165 | 182 | 0,190 | 211 | 0,260 | 192 |

В связи с подобием формы большей части сколов параметр повреждаемости L непосредственно связан с габаритами осколка и его объемом. Чем больше L , тем значительнее степень повреждения края изделия. Такие повреждения края снижают прочность изделий при эксплуатационных нагрузках. Поэтому края ответственных изделий подвергают механической обработке, формированию фаски или округления кромки для удаления краевых дефектов. Чем больше размеры сколов, тем больше глубина обработки и трудоемкости изготовления изделий из стекла и керамики. Размеры сколов являются критичными при работе лезвийного инструмента и стоматологических протезов.

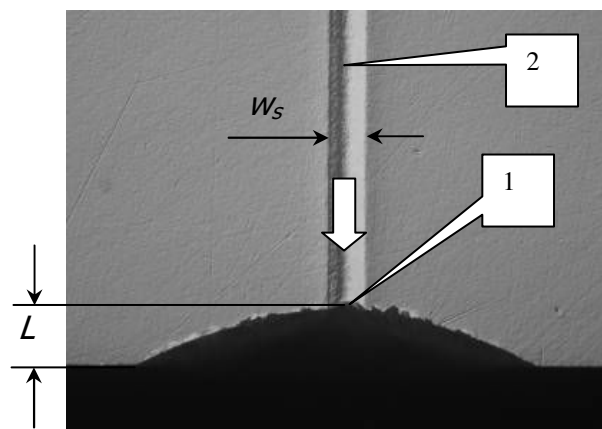


Рисунок 1. Характер повреждения поверхности и разрушения края образца при царапании до скальвания индентором Роквелла с постоянной нагрузкой

Figure 1. Character of surface damage and destruction of the sample edge in scratching up chipping by Rockwell indenter with a constant load

Параметром повреждения материала при царапании была ширина w_s линейного отпечатка с нарушенной трещиноватой поверхностью в зоне контакта с индентором (рис. 1). В качестве критерия сопротивления разрушению скалыванию края F_{RS} при царапании индентором Роквелла используют усредненный параметр, определяемый из уравнения [1]

$$F_{RS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{L_i}, \quad (1)$$

где n , P_i и L_i – общее количество образцов, испытанных при разных значениях постоянной нагрузки на индентор P_i , i -тые значения размера скола L . При этом предполагается, что зависимость $P = f(L)$ является линейной.

На рис. 2 представлены экспериментальные диаграммы локального разрушения края при царапании для линейно-упругой керамики Al_2O_3-1 , Si_3N_4-1 , листового и кварцевого стекла, аппроксимированные линейной зависимостью $P_i = f(L_i)$ без статистического анализа данных [1, 3, 4, 9].

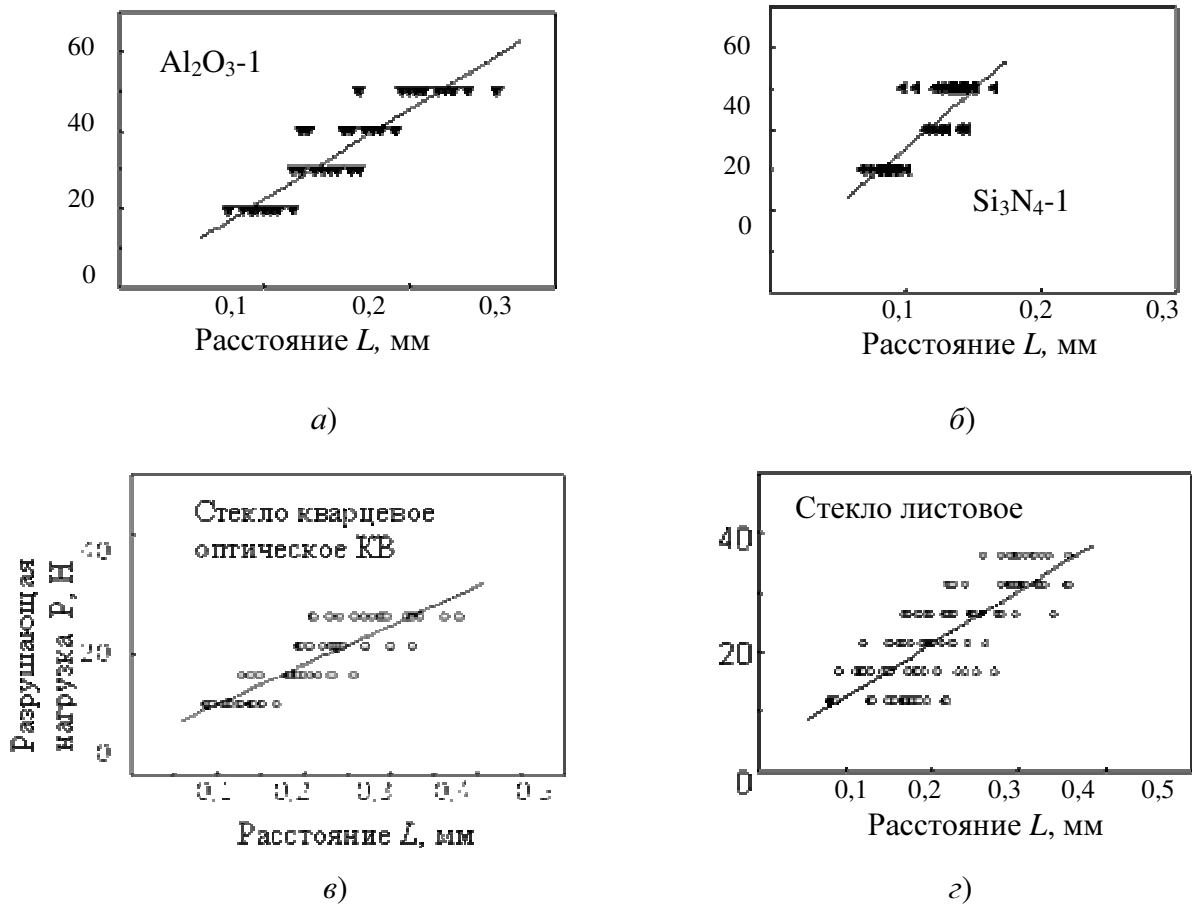


Рисунок 2. Диаграммы разрушения стекол и керамик без статистической обработки

Figure 2. Diagrams of the fracture of glasses and ceramics without statistical processing

Анализ этих диаграмм показывает, что отношение P_i / L_i , которое служит текущим значением параметра сопротивления при скалывании, не является постоянным при изменении нагрузки и характеризуется значительным разбросом данных. Графическая линейная аппроксимация таких неоднородных результатов без достоверного статистического анализа является спорной для керамики Si_3N_4-1 , листового и

кварцевого стекла (рис. 2б – з). Как видно из таблицы 1, для образцов листового стекла при нагрузке 11,62 Н параметр P_i/L_i находится в диапазоне значений 53,3...138,3 Н/мм, при 16,22 Н в диапазоне 60,3...177,6 Н/мм и несколько стабилизируется при нагрузке 36,14 Н, диапазон значений 100,4...103,9 Н/мм. Разброс данных относительно среднего значения достигает $\pm 50\%$. Результаты испытаний керамики Al_2O_3-1 характеризуются значительно меньшим разбросом – около 15...20%. При нагрузке 30 Н диапазон значений P_i/L_i был 182...250 Н/мм и 192...303 Н/мм при $P_i = 50$ Н.

Исследование закономерностей изменения степени поврежденности края при скалывании в известных работах применительно к оценке конструкционных свойств хрупких материалов не производилось [1, 3, 4, 9, 10]. При определении твердости и сопротивления скалыванию при царапании дентальной керамики в различных условиях для оценки влияния среды на механическое поведение различных материалов использовали средние значения полученных параметров [10].

Такой подход к оценке сопротивления разрушению и степени повреждаемости хрупкого материала при локальном нагружении края не отражает реальных параметров распределения экспериментальных значений. Оценка конструкционной прочности хрупких материалов типа стекла по среднему значению является грубой, и результаты не применяются для прогнозирования работоспособности ответственных несущих конструкций при локальном нагружении края [5 – 7]. Вместе с тем, проблема их проектирования, например, в строительстве и авиационном остеклении решается на основе детального анализа гарантированного уровня параметров сопротивления при низкой вероятности разрушения F в диапазоне 0,01...0,0001. Статистический анализ результатов испытаний ведут на основе статистического распределения Вейбулла [6 – 8].

С учетом сказанного для обоих исследованных материалов по данным таблиц 1 и 2 с помощью MATLAB 2011b были построены экспериментальные кривые распределения Вейбулла для параметров $1/L$ и P/L при различных P (рис. 3 – 6).

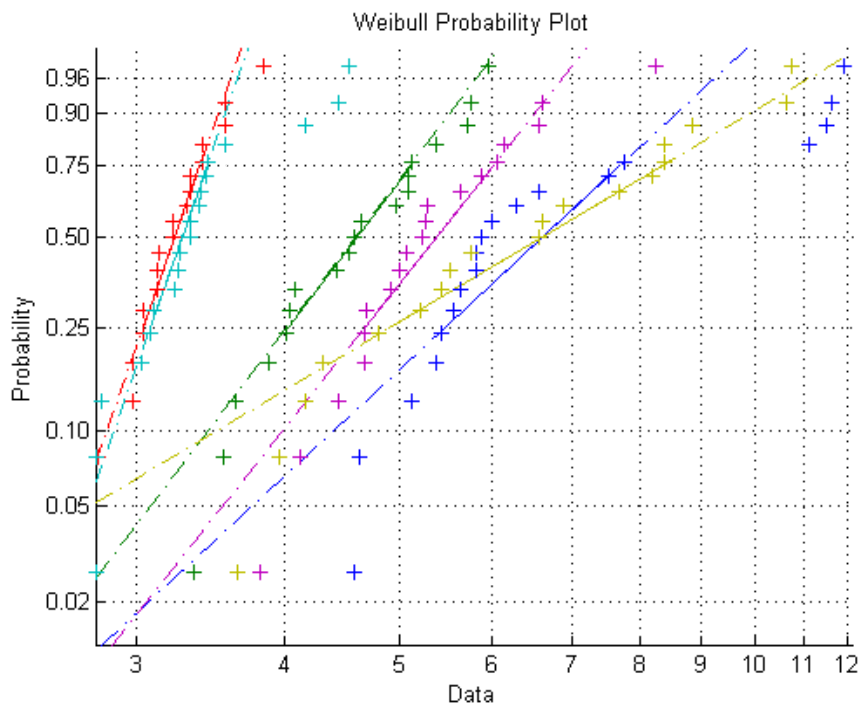


Рисунок 3. Экспериментальные зависимости распределения Вейбулла для параметра $1/L$ при царапании со сколом листового стекла:
1 - $P = 11,62$ Н; 2 - $P = 16,22$ Н; 3 - $P = 21,43$ Н; 4 - $P = 26,33$ Н; 5 - $P = 31,24$ Н; 6 - $P = 36,14$ Н

Figure 3. The experimental dependences of the Weibull distribution for the parameter $1/L$ for the tests in scratching up chipping of float glass:

1 - $P = 11.62$ N; 2 - $P = 16.22$ N; 3 - $P = 21.43$ N; 4 - $P = 26.33$ N; 5 - $P = 31.24$ N; 6 - $P = 36.14$ N

Параметр $1/L$ был выбран как более удобный при аналитическом рассмотрении особенностей повреждаемости края в случае образования вероятных крупных сколов и достоверном определении параметров распределения и размеров повреждений при ограниченных объемах испытаний при выборе материала и проектировании ответственных конструкций с высокими требованиями по надежности.

Анализ результатов, представленных на рис. 3, свидетельствует о более значительном рассеянии величины $1/L$ при низких нагрузках на индентор (прямые 1, 2), последующее возрастание нагрузки сопровождается меньшим разбросом (прямые 3, 4), для нагрузки свыше 30 Н разброс еще больше уменьшается, а прямые 5, 6 для $P = 31,24$ Н и $P = 36,14$ Н практически совпадают. Такой результат, очевидно, можно связать со спецификой стекла как материала, в котором имеется поверхностный трещиноватый слой.

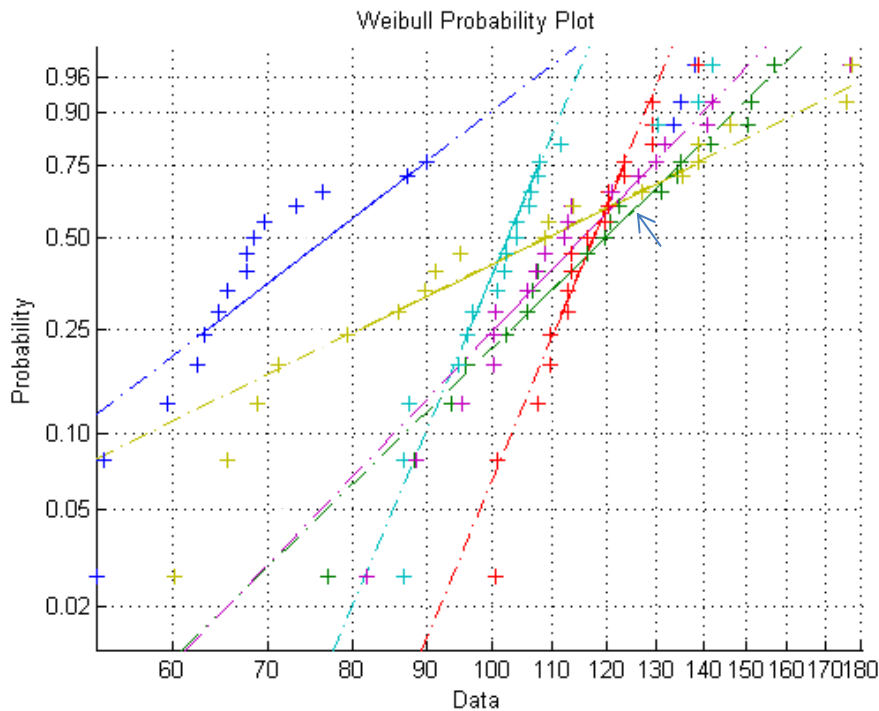


Рисунок 4. Экспериментальные зависимости распределения Вейбулла для параметра P/L при испытаниях в условиях царапания со сколом листового стекла:

1 - $P = 11,62$ Н; 2 - $P = 16,22$ Н; 3 - $P = 21,43$ Н; 4 - $P = 26,33$ Н; 5 - $P = 31,24$ Н; 6 - $P = 36,14$ Н

Figure 4. The experimental dependences of the Weibull distribution for the parameter P/L for the tests in scratching up chipping of float glass:

1 - $P = 11.62$ N; 2 - $P = 16.22$ N; 3 - $P = 21.43$ N; 4 - $P = 26.33$ N; 5 - $P = 31.24$ N; 6 - $P = 36.14$ N

Результаты, представленные на рисунках 5, 6, позволяют видеть, что разброс величины $1/L$ для нижнего интервала нагрузок значительно ниже, чем для стекла и стабилен в диапазоне $P = 30...50$ Н. Аппроксимационные прямые распределения Вейбулла для параметра P/L при $P = 40$ Н и $P = 50$ Н совпадают.

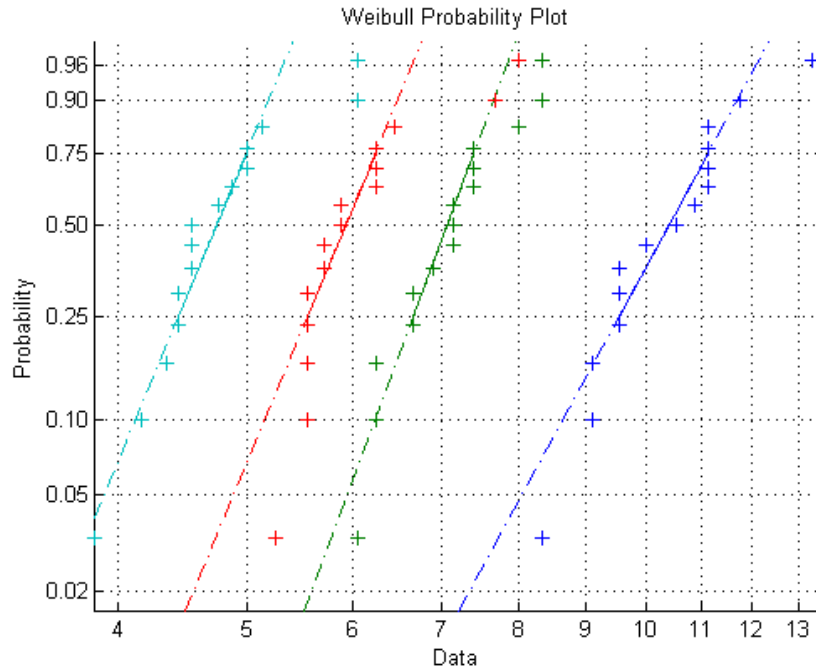


Рисунок 5. Экспериментальные зависимости распределения Вейбулла для параметра $1/L$ при при испытаниях в условиях царапания со сколом керамики Al_2O_3-1 :
1 - $P = 20$ Н; 2 - $P = 30$ Н; 3 - $P = 40$ Н; 4 - $P = 50$ Н

Figure 5. The experimental dependences of the Weibull distribution for the parameter $1/L$ for the tests in scratching up chipping of Al_2O_3-1 :
1 - $P = 20$ N; 2 - $P = 30$ N; 3 - $P = 40$ N; 4 - $P = 50$ N

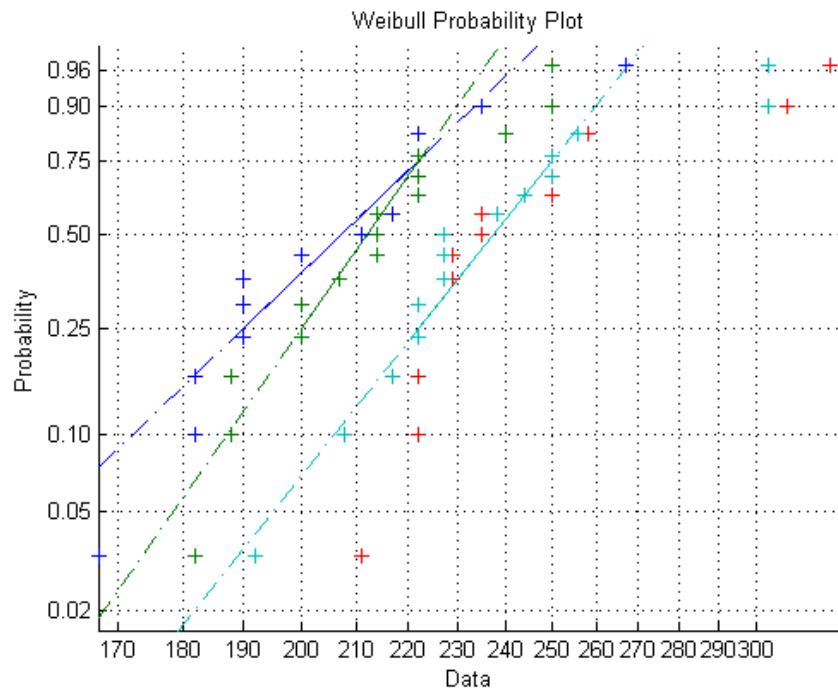


Рисунок 6. Экспериментальные зависимости распределения Вейбулла для параметра P/L при при испытаниях в условиях царапания со сколом керамики Al_2O_3-1 :
1 - $P = 20$ Н; 2 - $P = 30$ Н; 3 - $P = 40$ Н; 4 - $P = 50$ Н

Figure 6. The experimental dependences of the Weibull distribution for the parameter P/L for the tests in scratching up chipping of Al_2O_3-1 :
1 - $P = 20$ N; 2 - $P = 30$ N; 3 - $P = 40$ N; 4 - $P = 50$ N

В системе координат yOz для распределения Вейбулла справедливо уравнение [8]

$$z = \alpha y - \beta, \tag{2}$$

где $z = \ln(-\ln(1 - F(x)))$, $F(x)$ – функция распределения Вейбулла; $y = \ln x$, x – некоторое значение, принимаемое случайной величиной X (величина $1/L$); α – параметр формы; $\beta = \alpha \ln \lambda$, λ – параметр масштаба. Произведя оценку коэффициентов уравнения по методу наименьших квадратов, определили параметры α , β и λ для распределения величины $1/L$.

Уравнение (2) позволяет оценить параметр L , характеризующий степень повреждения края в результате скола при вероятности 0,01 и 0,99 и 0,5. Результаты определения α , β и λ для двух исследуемых материалов при различной нагрузке на индентор, а также значения L при вероятности F 0,01 и 0,99 и 0,5 представлены в таблицах 3, 4. Полученные таким образом значения для параметра повреждаемости дают возможность не только более точно оценить локальную прочность различных материалов, но и сделать достоверный прогноз характеристик повреждаемости края при заданном уровне вероятности.

Таблица 3

Параметры α , β и λ для распределения величины $1/L$ и значение L при вероятности разрушения 0,01; 0,5 и 0,99, полученные при статистическом анализе результатов испытаний в условиях царапания со сколом листового стекла

| Р,Н | α | β | λ | L,мм | | |
|-------|----------|---------|-----------|-----------|------------|------------|
| | | | | $F = 0,5$ | $F = 0,01$ | $F = 0,99$ |
| 11,62 | 3.1876 | 6.6101 | 7,9541 | 0,141 | 0,531 | 0,069 |
| 16,52 | 3.4433 | 6.8787 | 7,3721 | 0,151 | 0,515 | 0,077 |
| 21,43 | 6.0380 | 10.6160 | 5,802 | 0,183 | 0,369 | 0,125 |
| 26,33 | 6.6848 | 10.6895 | 4,9485 | 0,213 | 0,402 | 0,151 |
| 31,24 | 7.4768 | 9.5966 | 3,6093 | 0,291 | 0,512 | 0, 214 |
| 36,14 | 8.4923 | 10.4486 | 3,4225 | 0,305 | 0,502 | 0,233 |

Таблица 4

Параметры α , β и λ для распределения величины $1/L$ и значение L при вероятности разрушения 0,01; 0,5 и 0,99, полученные при статистическом анализе результатов испытаний в условиях царапания со сколом плотной керамики Al_2O_3-2

| Р,Н | α | β | λ | L, мм | | |
|-----|----------|---------|-----------|-----------|------------|------------|
| | | | | $F = 0,5$ | $F = 0,01$ | $F = 0,99$ |
| 20 | 9.0544 | 21.6792 | 10.9608 | 0,095 | 0,152 | 0,074 |
| 30 | 11.1680 | 22.4395 | 7.4579 | 0,130 | 0,202 | 0,113 |
| 40 | 8.0806 | 15.0988 | 6.4787 | 0,161 | 0,273 | 0,121 |
| 50 | 8.5597 | 13.8740 | 5.0574 | 0,206 | 0,338 | 0,158 |

На основе представленных в таблицах 3 – 4 результатов построены функции распределения Вейбулла (рис. 7) параметра $1/L$ для исследуемых материалов.

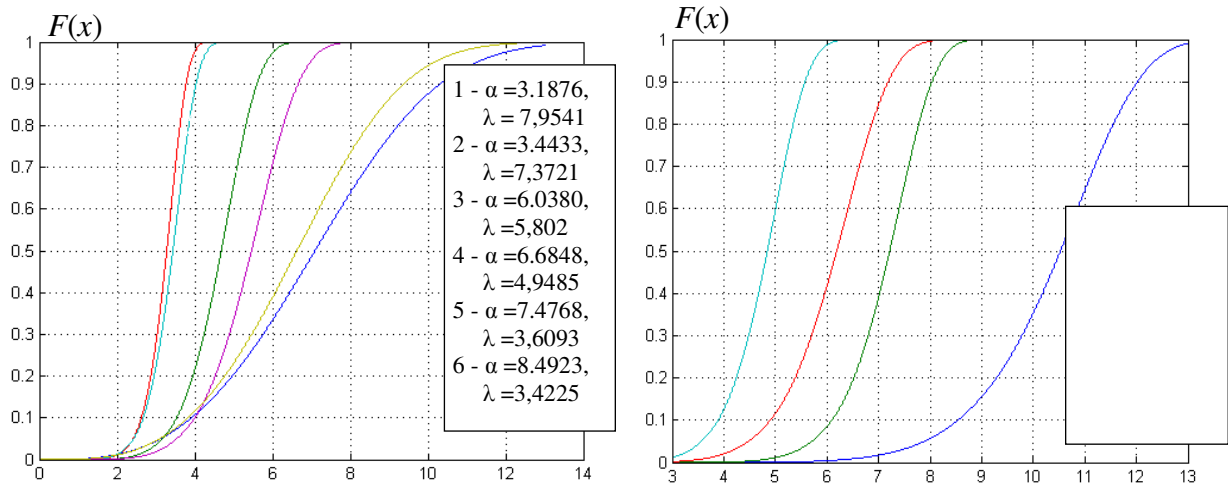


Рисунок 7. Функции распределения Вейбулла для параметров формы α и параметров масштаба λ , определенных на основе линейной аппроксимации экспериментальных зависимостей распределения Вейбулла для $1/L$ для: а) стекла; б) керамики

Figure 7. Weibull distribution functions for the shape parameter α and the scale parameter λ , defined on the basis of the linear approximation of the experimental Weibull plots for $1/L$ for: a) glass, b) ceramics

На основе полученных результатов для стекла построена зависимость значений параметров формы – α и масштаба – λ распределения Вейбулла от значения параметра L , определенного при вероятности 0,5 - $L_{0,5}$, которая представлена на рис. 8.

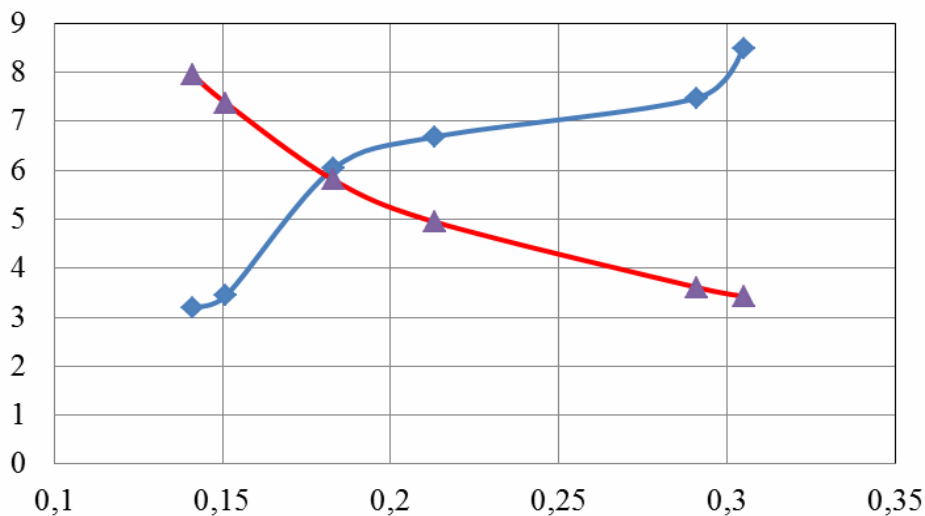


Рисунок 8. Зависимость расчетных значений параметров α и λ распределения Вейбулла для $1/L$ от $L_{0,5}$

Figure 8. Parameters α and λ of the Weibull distribution for $1/L$ as a function of $L_{0,5}$

Экспериментальные кривые для параметров этого распределения убедительно показывают изменчивость формы кривых при удалении места приложения разрушающей локальной нагрузки от края изделия из хрупких аморфных и кристаллических материалов.

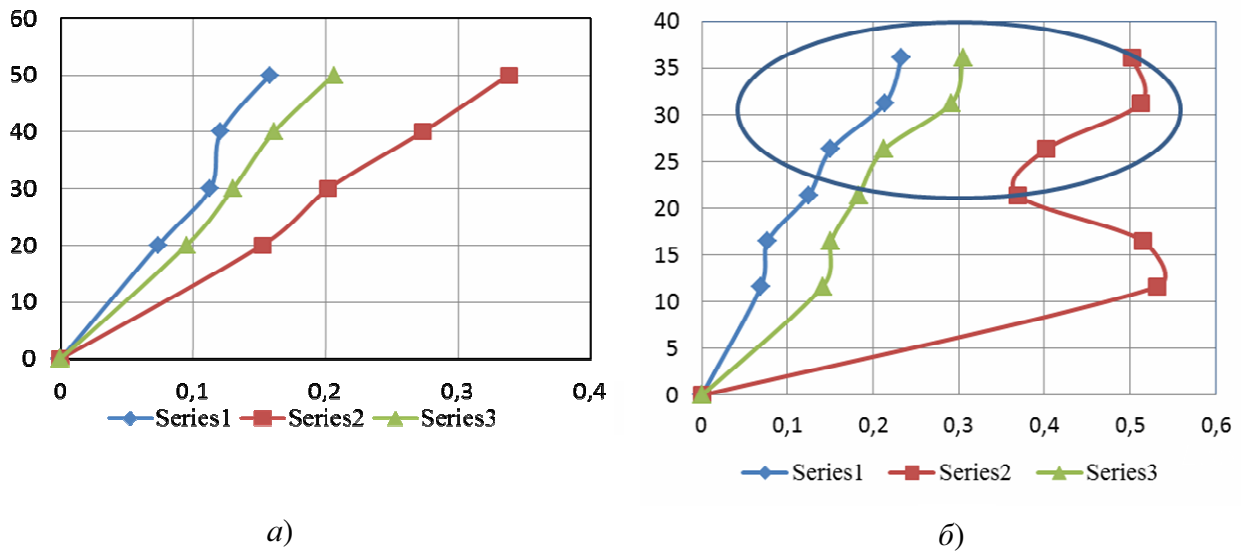


Рисунок 9. Зависимости разрушающей нагрузки от расстояния L , построенные по результатам статистической обработки результатов испытаний керамики Al_2O_3-1 (а); для листового стекла (б): 1 – для верхних значений при вероятности разрушения 0,99; 2 – для минимальных значений при вероятности 0,01; 3 – при вероятности 0,5

Figure 9. Fracture load as a function of L on the results of statistical treatment of test data for ceramics Al_2O_3-1 (a); for float glass (b): 1 – for the maximum values at a probability of 0,01; 2 – for the lower values at a probability of 0.01; 3 – for a probability of 0.5

Анализ результатов показал, что сопротивление стекла при краевом локальном нагружении существенно ниже, чем плотной керамики. Графики, приведенные на рис. 9, показывают, что эта закономерность сохраняется при любой заданной вероятности разрушения и при различных значениях параметра L . Например, при расстоянии L до края 0,15 мм нижние, средние и максимальные значения разрушающей нагрузки P для стекла были соответственно 3 Н, 15 Н и 27 Н, что существенно меньше, чем у керамики 20 Н, 37 Н и 49 Н. Соотношение значений разрушающей нагрузки для керамики и стекла существенно выше для нижних значений (вероятность 0,01) – 6,7. Это преимущество керамики уменьшается по мере увеличения допускаемой вероятности разрушения. При вероятности 0,5 оно составляет 2,27 и при вероятности разрушения 0,99 – уменьшается до 1,8. Установленная закономерность важна для изделий с высокими требованиями по надежности, например, для лезвийного инструмента, для которого сопротивление скалыванию режущей кромки и прилегающих наиболее нагруженных локальными нагрузками узких участков является критичным при оценке работоспособности.

Плотная керамика характеризуется нелинейной S -образной формой зависимости $P = f(L)$. Линейная аппроксимация, принятая в литературе, приводит к значительной погрешности не только при оценке локальной прочности, но и при прогнозировании повреждаемости изделий. Наибольший размер скола возрастает с ростом нагрузки и при $P=50$ Н, вероятности 0,01 параметр $L_{0,01}$ составляет 0,338 мм.

Сравнение результатов статистической обработки для стекла и керамики при нагрузке 36 Н показало, что минимальная глубина скалывания в стекле почти в 2 раза больше, чем в керамике, и составляет 0,233 мм по сравнению с 0,120 мм для керамики. Это преимущество керамики сохраняется и при сравнении максимально возможных размеров скола при данной нагрузке – 0,502 мм для стекла и 0,25 мм для керамики.

Следует отметить, что в интервале высоких нагрузок для стекла (рис. 7 – выделенная область) наблюдается аналогичная керамике S-образная форма зависимости $P = f(L)$. Статистический анализ позволил выявить неисследованную ранее особенность поведения стекла как аморфного поверхностно-дефектного материала с низким сопротивлением хрупкому разрушению при малых нагрузках (10...15 Н). В этом диапазоне отмечаются аномально высокие значения размеров сколов (0,515...0,530 мм) по сравнению с керамическими материалами (0,12...0,15 мм).

Сравнение результатов статистического анализа и полученных уточненных диаграмм разрушения для различной вероятности разрушения (рис. 9а, б) с диаграммами, полученными при графической линейной аппроксимации для стекла и керамики (рис. 2а, з), показывает неприемлемость средних оценок при прогнозировании конструкционной прочности ответственных изделий с высокими требованиями по надежности (таблица 5). Для керамики максимальная величина сколов, оцениваемая по параметру повреждаемости L , при вероятности разрушения 1% составляет 0,35 мм, что на 35% больше максимального экспериментального результата $L = 260$ мм при нагрузке 50 Н. При этом вероятный гарантированный уровень сопротивления скалыванию F_{RS} не превышает 143 Н/мм. Это в 1,65 раза меньше $F_{RS} = 234 \pm 23$ Н/мм, определенного аппроксимацией по формуле (1) [3, 4].

Таблица 5

Сравнение результатов статистического анализа и традиционных оценок сопротивления скалыванию края при царапании

| Материал | F_{RS} , Н/мм по формуле (1) | $F_{RS 0,01}$, Н/мм при вероятности разрушения 1% | Погрешность прогноза по формуле (1), % |
|----------------------|--------------------------------|--|--|
| Керамика Al_2O_3-1 | 234±23 | 143 | + 64 |
| Листовое стекло | 108±27 | 22 | + 391 |

Еще более значительна погрешность оценки сопротивления скалыванию F_{RS} для листового стекла, обусловленная высокой неоднородностью результатов испытаний на скалывание края при царапании и сильным влиянием качества обработки поверхности на прочность и разрушение поверхностно дефектных упругих материалов данного класса. Усредненная оценка дает результат 108 ± 27 Н/мм, что почти в 4 раза больше, чем вероятная статистическая оценка нижнего уровня $F_{RS 0,01} = 22$ Н/мм.

Выводы. Анализ закономерностей статистического распределения Вейбулла сопротивления разрушению стекла и керамики показал принципиальные различия их механического поведения при локальном нагружении. Они отражают особенности внутренней структуры, а также влияние характера и уровня дефектности поверхности аморфных и кристаллических хрупких материалов.

Определены параметры распределения Вейбулла для экспериментальных результатов краевого разрушения при царапании стекла и плотной керамики в зависимости от расстояния до края. Получено, что для стекла и керамики параметр масштаба монотонно уменьшается по мере увеличения расстояния локальной нагрузки до края. Параметр формы для керамики изменяется в более узком диапазоне, чем для стекла.

Получены статистически обоснованные значения параметра повреждаемости при вероятности разрушения от 0,01 до 0,99, что позволило уточнить характеристики локальной прочности стекла и керамики и повысить достоверность прогноза

работоспособности материала при заданной вероятности разрушения ответственных изделий.

Показана неприемлемость линейной аппроксимации зависимости $P=f(L)$ при локальном нагружении хрупких материалов. Для листового стекла в области малых нагрузок обнаружена аномально высокая повреждаемость, характеризующаяся возможными размерами скола до 0,520 мм, что в три раза превышает предельные размеры сколов для керамики Al_2O_3-1 .

Полученные результаты являются основой для целенаправленного выбора хрупких материалов в зависимости от их функционального назначения.

Результаты могут быть использованы при выборе и оптимизации технологии изготовления оптического стекла, дентальной окерамики и режущего керамического инструмента.

Conclusions. Statistical analysis of regularities of the Weibull distribution of fracture resistance of glass and ceramics shows a fundamental difference in the mechanical behavior of glass and ceramics under the local loading. These differences are caused by the features of the internal structure as well as the nature and level of surface defects of amorphous and crystalline brittle materials.

The parameters of the Weibull distribution for the experimental results on the edge destruction of scratched glass and dense ceramics, depending on the distance from the edge are determined. It was found that for glass and ceramics scale parameter decreases monotonically with increasing distance to the edge of the local load. The shape parameter for ceramics varies over a narrower range than glass.

Statistically valid values for the probability of damage to the destruction for the interval 0.01...0.99 are obtained. It allowed specifying the characteristics of the local strength of glass and ceramics, and improving the reliability of the forecast performance of the material at a given probability of failure.

The unacceptability of the linear approximation of the dependence $P = f(L)$ at the local loading of brittle materials is shown. Abnormally high damageability for float glass in the range of small loads characterized by chipping to the possible size of 0.520 mm, which is three times the size for chipping of ceramic Al_2O_3-1 , is detected.

The results are the basis for a focused selection of brittle materials, depending on their function.

The results can be used for selecting and optimizing the manufacturing technology of optical glass, and ceramics dental ceramic cutting tool.

Список использованной литературы

1. Gogotsi, G.A. Criteria of ceramics fracture (edge chipping and fracture toughness tests / G.A. Gogotsi // *Ceram. Int.* – 2012. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.10.017>
2. Гогоци, Г.А. Трещиностойкость технического и оптического стекла: скалывание кромок образцов [Текст] / Г.А. Гогоци // *Проблемы прочности.* – 2010. – №3. – С. 57 – 65.
3. Хворостяный, В.В. Определение сопротивлению разрушения стекла при царапании поверхности образца вплоть до скалывания его кромки (метод S+EF) [Текст] / В.В. Хворостяный // *Межд. научн.-техн. конф. «Прочность материалов и элементов конструкций»: тезисы докладов (2010, Киев).* – 2010. – С. 175 – 176.
4. Хворостяный, В.В. Сопротивление разрушению керамики при царапании поверхности образца до скалывания его кромки: S+EF. Основная зависимость [Текст] / В.В. Хворостяный // *VII конференция молодых ученых и специалистов 27 – 31 мая 2013г.: тезисы докладов: Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.*
5. Veer, F. Glass failure, science fiction, science fact and hypothesis / F. Veer, Yu. Rodichev // *Proceedings of International Conference “Glass Performance Days 2009”.* – Tampere, 2009. – P. 819 – 823.
6. Rodichev, Yu. Fracture resistance, surface defects and structural strength of glass / Yu. Rodichev, F. Veer // *Challenging Glass 3 – Conference on Architectural and Structural Applications of Glass Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology (Delft, Netherland, June 2010).* – IOS Press, 2010. – P. 363 – 373.

7. Rodichev, Yu. Assessment and Management of Strength and Durability of Composite Glass Elements / Yu. Rodichev // Challenging Glass 3 – Conference on Architectural and Structural Applications of Glass Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology (Delft, Netherland, June 2010). – IOS Press, 2010. –P. 351 – 362.
8. Dobson, B. The Weibull analysis handbook / B. Dobson. – ASQ Quality Press, 2006. – 167 p.
9. Разрушение стекла при краевом скалывании [Текст] / Г.А. Гогоци, В.И. Галенко, С.П. Мудрик и др. // Проблемы прочности. – 2007. – №6. – С. 103 – 112.
10. Scratch hardness and chipping of dental ceramics under different environments / L.A. Flanders, J.B. Quinn, O.C. Wilson et al. // Dental materials. – 2003, № 19. – P. 716 – 724.

Получено 22.08.2013