

Дефекты поверхности и прочность листового стекла при циклическом и длительном статическом нагружении

Ю. М. Родичев

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Специфическая поверхностная дефектность листового стекла, приобретенная при производстве на флоат линии, оказывает большое влияние на прочность и разрушение стеклянных элементов конструкций при механическом нагружении. Основными дефектами, которые обнаруживаются обычно в фокусе разрушения испытанных стеклянных элементов, являются поверхностные микротрещины глубиной до 100 мкм. С использованием пластинчатых образцов и специального кассетного метода их испытаний исследовались прочность и разрушение листового стекла при циклическом и длительном статическом нагружении. Кассеты из нескольких образцов одинаковой толщины испытывались таким образом, чтобы каждый из них подвергался нагружению по схеме чистого изгиба с одинаковым уровнем растягивающих напряжений на испытываемой поверхности. С использованием микрофрактографического анализа выполнена оценка характерных особенностей излома, геометрических параметров и размеров источника разрушения на критической стадии нагружения образцов. При циклических испытаниях обнаружена тенденция к увеличению критического значения коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} по сравнению с таковым при длительном статическом нагружении.

Ключевые слова: листовое стекло, дефекты поверхности, циклическое и длительное статическое нагружение, прочность, вязкость разрушения.

Введение. Специфическая поверхностная дефектность листового стекла оказывает основное влияние на прочность и разрушение стеклянных элементов конструкций при механическом нагружении. Для поверхности листового стекла наряду с длинными трещинами характерны хаотически ориентированные короткие трещины (длина до 1...2 мм), которые образуют особый трещиноватый слой. Дефекты типа трещин в этом слое из-за размеров намного больше и опаснее, чем внутренние дефекты структуры стекла, и под действием внешних сил разрушение элементов всегда начинается с поверхности.

Влияние циклического изменения нагрузки на характер и условия разрушения стекла, в частности на особенности докритической стадии роста усталостных трещин, являющихся источником разрушения, изучено недостаточно. Типичные дефекты, которые обнаруживаются обычно в фокусе разрушения на зеркальной части поверхности излома стеклянных элементов, – поверхностные микротрещины глубиной до 100 мкм [1, 2]. На рис. 1 приведен вид зеркальной поверхности излома элемента из листового стекла при кратковременном статическом изгибе. Источником разрушения служат две микротрещины. Одна из них имеет полуэллиптическую форму и хорошо видна на рис. 1 слева, где стрелкой указано ее положение на докритической стадии 1 роста. На стадии 2 слияние левой и правой трещин, пересекающихся под тупым углом в точке, обозначенной стрелкой, приводит к образованию характерного выступа с контуром полуэллиптической формы большего размера. Контур этого выступа выходит на гладкую плоскость зеркальной зоны, ориентированную по нормали к наибольшему главному напряжению (к продольной оси образца при поперечном изгибе). Контур зеркальной зоны определяет форму и размеры магистральной трещины на начальной фазе ее динамического роста, соответствующей стадии 3 (рис. 1).

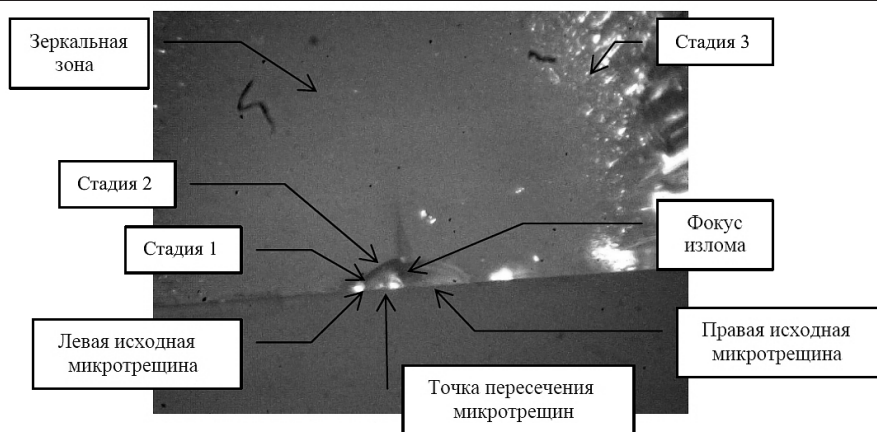


Рис. 1. Излом элемента из листового стекла при кратковременном статическом изгибе с фокусом разрушения, удаленным от края образца ($\times 145$).

Важным является то, что критические размеры, например глубина источника разрушения на докритической стадии 1 (рис. 1), его форма и ориентация относительно плоскости зеркальной зоны, определяют предельное напряжение и соответствующее критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} [2–4]. Кратковременная стадия 2 и стадия 3 динамического роста трещины в пределах зеркальной зоны (рис. 1) в принятом подходе отнесены к закритической фазе роста трещины при разрушении детали. Ранее [1, 3, 4] определено, что закономерность развития поверхностных микротрещин – источников разрушения – характерна как для кратковременного, так и длительного статического нагружения. Показана также возможность решения обратной задачи – оценки предельного уровня напряжений и несущей способности конструкций из стекла с использованием экспериментальных данных о критическом значении коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} , форме, размерах и ориентации микротрещин в фокусе разрушения для критической стадии роста трещин, полученных при различных режимах нагружения [1, 2, 4–6].

Дефекты и прочность линейно-упругих материалов. На рис. 2 приведены расчетные зависимости предельных напряжений при изгибе σ_n от глубины b одиночных поверхностных полуэллиптических трещин для элементов из линейно-упругого материала типа стекла, полученные при различных значениях коэффициента K_{Ic} в соответствии с уравнением

$$\sigma = K_{Ic} / (y\sqrt{b}), \quad (1)$$

где y – геометрический параметр, рассчитанный по уравнениям линейной механики разрушения [6] для трещины отрыва с отношением глубины к ширине $b/c = 0,5$, которое соответствует типичной для стекла форме критических микротрещин, обнаруживаемых в фокусе разрушения деталей.

Кривые 1–9 на рис. 2 построены для значений коэффициента K_{Ic} в диапазоне $0,4...3,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, кривые 1–4 соответствуют результатам экспериментов для различных видов стекол при $K_{Ic} = 0,4...0,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Кривые 5–9, полученные при $K_{Ic} = 1...3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, относятся к материалам с повышенной трещиностойкостью типа конструкционной стеклокерамики и плотной керамики [7, 8]. Предел прочности при изгибе таких материалов при глубине микротрещин 100 мкм может быть в несколько раз выше, чем стекла. Критическая глубина дефектов типа полуэллиптических микротрещин при разрушении деталей из этих материалов с пределом прочности при изгибе

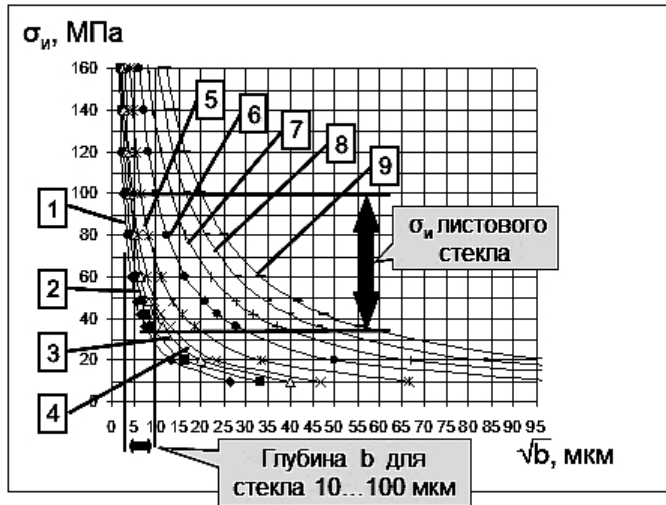


Рис. 2. Расчетные зависимости предела прочности при изгибе $\sigma_{и}$ материалов типа стекла с различным уровнем трещиностойкости от глубины b поверхностной полуэллиптической трещины с параметрами $b/c = 0,5$, $y = 1,5$: 1 – $K_{Ic} = 0,4$ МПа $\sqrt{м}$; 2 – $K_{Ic} = 0,5$ МПа $\sqrt{м}$; 3 – $K_{Ic} = 0,6$ МПа $\sqrt{м}$; 4 – $K_{Ic} = 0,7$ МПа $\sqrt{м}$; 5 – $K_{Ic} = 1,0$ МПа $\sqrt{м}$; 6 – $K_{Ic} = 1,5$ МПа $\sqrt{м}$; 7 – $K_{Ic} = 2,0$ МПа $\sqrt{м}$; 8 – $K_{Ic} = 2,5$ МПа $\sqrt{м}$; 9 – $K_{Ic} = 3,0$ МПа $\sqrt{м}$.

100 МПа увеличивается в 4 раза (до 400 мкм), а в элементах, разрушающихся при 35 МПа, глубина трещин в фокусе излома может достигать 3,6 мм, что позволяет контролировать их появление с применением неразрушающих методов дефектоскопии.

При кратковременных испытаниях листового стекла на изгиб при скорости нагружения 1...10 МПа/с значения K_{Ic} расположены в диапазоне 0,45...0,5 МПа $\sqrt{м}$, при длительных статических испытаниях в режиме постоянной нагрузки они уменьшались до 0,3...0,4 МПа $\sqrt{м}$ [3, 4]. Стрелками на рис. 2 показано снижение прочности обычного листового стекла в интервале 100...35 МПа в зависимости от критической глубины поверхностных микротрещин (от 7...12 до 58...90 мкм) на стадии I их устойчивого роста. Критической глубине микротрещин в диапазоне 10...100 мкм (горизонтальная стрелка и две вертикальные линии в нижнем левом углу диаграммы) соответствуют возможные значения предела прочности при изгибе листового стекла от 25...35 МПа при $b = 100$ мкм до 110...160 МПа при $b = 10$ мкм. Для твердых технических стекол и стеклокерамики характерными являются кривые, построенные при значениях $K_{Ic} = 0,6...0,7$ МПа $\sqrt{м}$, что указывает на возможность увеличения прочности элементов путем выбора соответствующего типа стекла с повышенным уровнем трещиностойкости.

Верхние участки кривых 1–4 (рис. 2) для различных технических стекол при значениях прочности выше 100 МПа свидетельствуют о наличии резерва для повышения прочности изделий до 100...160 МПа и выше за счет уменьшения глубины поверхностных микротрещин (например, методом чистового шлифования, полирования и глубокого травления стекла). Нижние участки этих кривых с пределом прочности при изгибе от 35 до 10 МПа указывают на предсказуемый низкий уровень прочности элементов при несоблюдении надлежащих мер по контролю дефектности и повреждаемости поверхности стекла и отсутствию на производстве современных экспериментальных средств для оценки его конструкционной прочности и контроля реального уровня несущей способности деталей.

Цель данной работы заключается в оценке особенностей проявления эффекта усталости и локализованного разрушения листового стекла при испытаниях на изгиб в условиях циклического и длительного статического нагружения. Основное внимание уделяется установлению формы и размеров критических поверхностных микротрещин на докритической стадии циклического нагружения, формированию источника разрушения на стадиях 1 или 2. Стадия 3 динамического роста трещины в пределах всей зоны зеркального излома представляет меньший интерес, хотя и имеет некоторые особенности, которые будут отмечены ниже.

Дефекты и циклическая прочность линейно-упругих хрупких материалов. Значительный разброс значений предела прочности стекла и керамики, связанный с неоднородностью формы и размеров критических поверхностных дефектов, усложняет оценку усталости при циклическом нагружении. В ранних работах, напр. [9], посвященных этой проблеме, утверждалось, что разброс размеров дефектов стекла при статическом нагружении играет большую роль, чем эффект усталости его бездефектной внутренней структуры при циклических испытаниях. Такой вывод получен по результатам испытаний стеклянных цилиндрических стержней при чистом изгибе в условиях статического нагружения с постоянной скоростью роста нагрузки до момента разрушения и при циклических испытаниях с частотой 0,17 и 167 Гц при вращении образцов с постоянной поперечной нагрузкой.

Повышение качества материалов, снижение разброса параметров дефектности и прочности, а также совершенствование методов усталостных испытаний хрупких материалов, особенно плотной конструкционной и дентальной керамики, позволяют более детально исследовать эффекты их усталости при различных видах и режимах циклического нагружения.

На рис. 3 приведены результаты оценки циклической долговечности диоксидциркониевой керамики с пределом прочности при изгибе 880 ± 35 МПа и коэффициентом $K_{Ic} = 8,15$ МПа $\sqrt{м}$ [10]. Разброс значений предела прочности составляет менее 4%. Испытания проводили при чистом изгибе в режиме циклического нагружения с частотой 25 Гц и коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,1$ при уровне напряжений 570, 610 и 650 МПа.

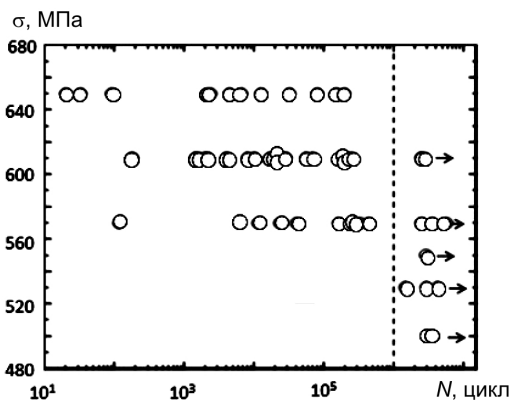


Рис. 3. Циклическая долговечность диоксидциркониевой керамики ($ZrO_2-(3\%)Y_2O_3$) при чистом изгибе [10]. (Стрелками показаны неразрушенные образцы при наработке 10^6 цикл.)

Эффект циклической усталости наблюдается при напряжениях менее 680 МПа (77% предела прочности при изгибе). Несмотря на высокую однородность материала и низкий разброс результатов кратковременных испытаний, разброс данных о циклической долговечности образцов оказался очень высоким. При напряжении 650 МПа наработка до разрушения отдельных образцов изменяется на четыре порядка. По-

этому форма кривой усталости и ее параметры остаются неопределенными. Нижняя граница напряжений, при которых происходит усталостное разрушение образцов при наработке 10^6 цикл, соответствует уровню напряжений 560 МПа.

Методика эксперимента. Объектом испытаний служили образцы листового стекла толщиной 5 мм в виде пластин размером 40×160 мм. Грани образцов после их вырезания из листа стекла обрабатывали с помощью алмазного шлифовального круга для стабилизации уровня дефектности края и учета влияния механической обработки на прочность при циклическом изгибе.

Испытания проводили на машине для усталостных испытаний Rumul Testtronic 50 kN в специализированной лаборатории механических испытаний Института проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. Машина обеспечивала циклическое нагружение по синусоидальной форме цикла с резонансной частотой, определяемой частотными характеристиками собранных в кассету образцов и системы привода. При проведении опытов резонансная частота составляла 100...200 Гц. В случае испытания одиночных образцов стекла толщиной 10 мм частота нагружения была ниже (60...63 Гц) [11].

Процедура испытаний предусматривала предварительное статическое нагружение образцов с уровнем нагрузки, несколько превышающей амплитуду необходимой циклической составляющей. Затем прикладывалась циклическая нагрузка. В результате минимальное напряжение в образце при циклировании было не меньше 5 МПа. За счет этого полностью исключалось появление зазоров между опорами и образцами, а также неконтролируемых динамических нагрузок, влияющих на задаваемый режим циклического нагружения. Максимальное напряжение задавалось в соответствии с программой испытаний. Такой способ испытания дал возможность реализовать асимметричные циклы нагружения с коэффициентом асимметрии цикла R , равным примерно 0,05.

При начальных методических экспериментах на испытательной машине ZD-4 был обоснован уровень максимальных значений циклических напряжений, который должен быть меньше ожидаемого уровня предела статической прочности при изгибе образца стекла, чтобы до его разрушения было реализовано планируемое число циклов. Для этого проводили испытания образцов на поперечный изгиб по схеме чистого изгиба. Минимальные значения прочности образцов со шлифованным краем составляют 30...40 МПа. По данным этих опытов нагрузку постепенно уменьшали для увеличения числа циклов до разрушения, сохраняя заданное соотношение уровней первоначальной статической и циклической составляющих нагрузки.

Конструкционные особенности машины для усталостных испытаний не позволяют устанавливать нагрузку меньше 250...500 Н. Поэтому невозможно проводить испытания одиночных образцов принятой формы и размеров из стекла толщиной 5 мм из-за его низкой прочности при изгибе и недостаточной точности измерения предельной нагрузки. Для обеспечения необходимой точности нагружения была предложена оригинальная схема одновременных кассетных испытаний нескольких образцов, что позволяет увеличить общее усилие при усталостных испытаниях до нужного уровня. Благодаря такому способу испытаний можно ускорить выявление наиболее дефектных образцов с меньшим уровнем прочности, сократить сроки оценки циклической долговечности более прочных образцов с большим числом циклов до разрушения и снизить трудоемкость эксперимента. Эти преимущества важны, учитывая характерный для стекла значительный разброс результатов испытаний на изгиб, а также то, что при длительных статических испытаниях долговечность отдельных образцов может отличаться на порядок и более [3, 4, 10, 11].

Схема кассетных испытаний образцов стекла на чистый изгиб показана на рис. 4. Расстояние между крайними опорами $L = 120$ мм, длина рабочего участка с зоной чистого изгиба $l = 60$ мм.

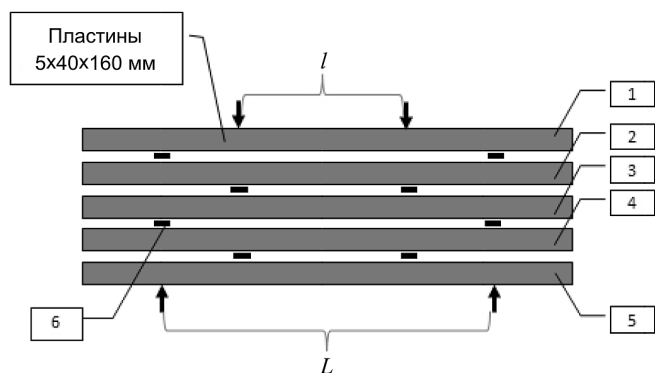


Рис. 4. Схема нагружения образцов стекла толщиной 5 мм при длительных циклических и статических кассетных испытаниях: 1–5 – образцы; 6 – промежуточные опоры.

Для выбора указанных значений параметров нагружения L и l были выполнены кратковременные испытания кассет из пяти образцов стекла в режиме статического нагружения на машине Rumul Testtronic до момента разрушения одного из них. Установлено, что благодаря высокой жесткости машины и нагружающего устройства при выбранных параметрах образцов и промежуточных опор при разрушении одного образца остальные не разрушаются. Принятые меры по защите поверхности соседних образцов от повреждения обеспечили возможность продолжения их испытаний. После замены разрушенного образца испытания продолжали при том же режиме для получения нового результата. Эксперименты подтвердили, что при данном способе кассетных испытаний ожидаемый диапазон предельных напряжений для наименее прочных образцов составляет 35...40 МПа. Это несколько меньше, чем предел прочности при испытании отдельных образцов, и является естественным следствием влияния статистической природы прочности стекла, так как при таких испытаниях разрушается слабый образец с постепенным их отбором. Поэтому чаще всего далее разрушались новые образцы и реже те, которые были установлены сначала. При этом общее число наработанных циклов в остальных образцах постоянно возрастало.

Снижение прочности элементов конструкций из стекла и керамики при длительном статическом нагружении при нормальных температурах связывают с закономерностями роста трещин по механизмам коррозии под напряжением в различных средах (stress corrosion effect), диссипации энергии и износа поверхностей трещин в их вершине. Для процессов накопления повреждений и разрушения данных классов хрупких неметаллических материалов при длительной постоянной нагрузке используют понятие “статическая” усталость (static fatigue), при циклическом нагружении – “циклическая” усталость (cyclic fatigue) [12–15].

Результаты экспериментов и их обсуждение. Поверхностные микротрещины, сосредоточенные в трещиноватом слое листового стекла, являются источниками разрушения и определяют механическое поведение элементов из стекла при кратковременном и длительном нагружении [1–4]. Для оценки формы и особенностей развития критических микротрещин источники разрушения на зеркальной поверхности излома образцов при циклических испытаниях подвергались специальному микроскопическому анализу [4, 5]. На рис. 5 показана исходная поверхностная микротрещина, которая была источником разрушения и формирования фокуса излома в образце при циклических испытаниях с частотой 212 Гц. Микротрещина состоит из двух участков, пересекающихся под небольшим углом и не совпадающих по своей ориентации с плоскостью зеркальной зоны, кромка которой простирается вниз и

вверх от указанных границ микротрещины. Направление растягивающих напряжений совпадает со стрелкой, указывающей на положение фокуса излома при виде сверху на поверхность образца.

Рис. 6 иллюстрирует вид микротрещины в фокусе разрушения образца (предел прочности 40,1 МПа) при циклическом нагружении, образованной в результате роста длинной исходной микротрещины сложной формы (рис. 5).

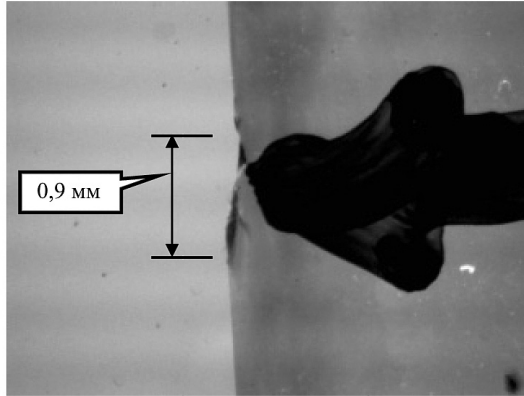


Рис. 5. Исходная микротрещина длиной 900 мкм.

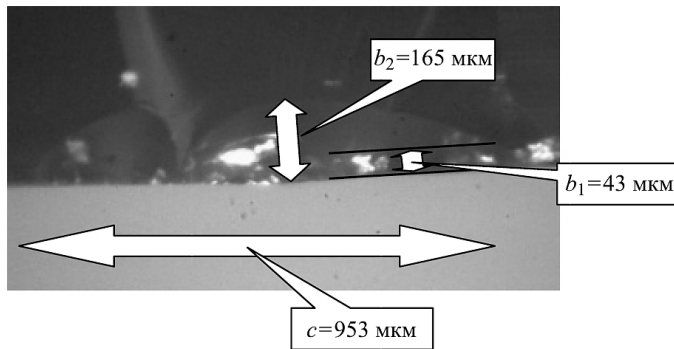


Рис. 6. Геометрия и параметры микротрещины в фокусе излома образца на стадиях 1 и 2 роста микротрещины.

При оценке параметров трещины для критической стадии 1 ее роста глубина $b_1 = 43$ мкм, длина $c = 953$ мкм. По этим данным с использованием уравнений механики разрушения [6] были определены геометрический параметр $y_1 = 1,9$ и расчетная величина критического коэффициента интенсивности напряжений $K_{Ic1} = 0,5$ МПа $\sqrt{м}$. Это значение несколько выше такового, полученного при кратковременном испытании на изгиб, и существенно больше, чем определенное при длительных статических испытаниях на изгиб [1, 3, 4]. На начальной стадии 2 закритического роста микротрещины ее глубина b_2 увеличивается до 165 мкм, а форма, включающая оба участка, становится полуэллиптической с геометрическим параметром $y_2 = 1,5$. За счет большей скорости подрастания трещины увеличивается ее сопротивление росту, на что указывает критическое значение коэффициента $K_{Ic2} = 0,77$ МПа $\sqrt{м}$, рассчитанное для стадии 2. Возможной причиной повышенных показателей сопротивления росту трещин при циклическом нагружении в рассмотренном диапазоне частот испытаний является влияние более высокой скорости нагружения по сравнению с длительными статическими испытаниями при постоянной нагрузке.

На рис. 7 приведены результаты испытаний стекла при циклическом изгибе. Линиями 1 и 2 выделена область значений предела прочности при изгибе образцов, отражающая зависимость прочности от числа циклов. При первичном анализе эту область условно связывали с данными оценки предела кратковременной прочности при изгибе кассет образцов стекла (число циклов $N_{ц} = 1$). При кратковременных кассетных испытаниях предельная нагрузка была выше в 1,5...2 раза, чем при усталостных. Увеличение энергии упругого деформирования системы нагружения и образцов приводит к практически одновременному разрушению всех образцов. Поскольку предельная нагрузка для образцов была практически одинаковой, предполагалось, что остальные образцы в кассете разрушались при более высоких напряжениях, чем в слабом образце. Для условной оценки этих напряжений в каждом из образцов с учетом перераспределения нагрузки уменьшали расчетное количество образцов до четырех. Полученные более высокие значения напряжений были включены в результаты кратковременных кассетных испытаний (рис. 7). Предел кратковременной прочности стекла толщиной 5 мм при изгибе изменяется в диапазоне 50...72 МПа и в среднем равен 63 МПа.

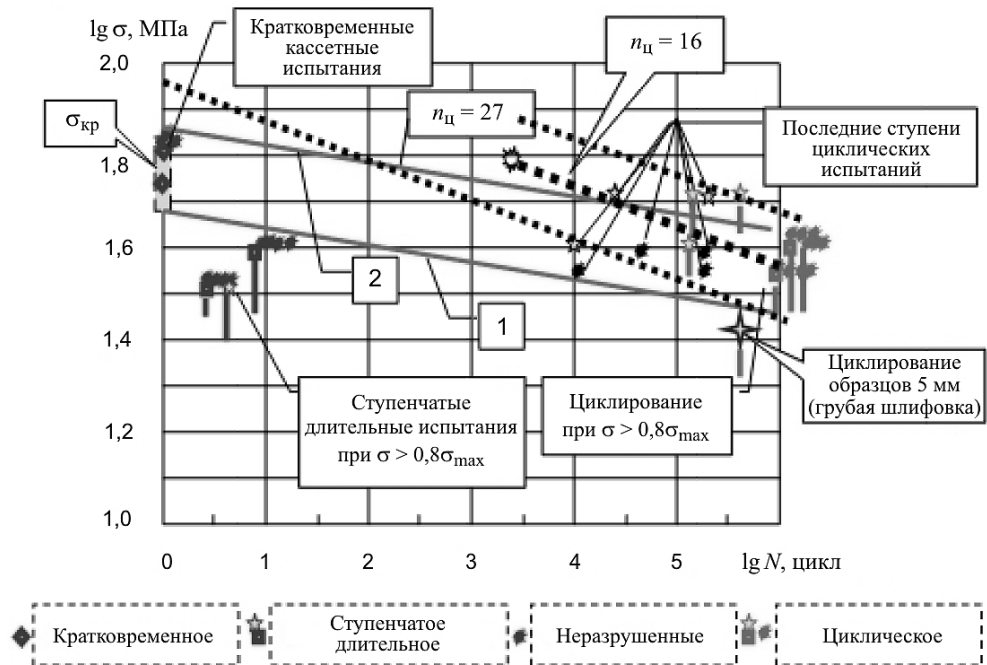


Рис. 7. Зависимость прочности при изгибе листового стекла от числа циклов при ступенчатом повышении нагрузки при циклических и ступенчатых статических испытаниях: 1, 2 – первичная оценка области результатов для листового стекла толщиной 5 мм. (Звездочками обозначены данные для стекла толщиной 10 мм (частота 60...63 Гц), пунктиром – уточненная кривая усталости для стекла толщиной 4 мм.)

Программа циклических испытаний предусматривала ступенчатое поэтапное увеличение нагрузки по достижении заданной наработки таким образом, чтобы исключить разрушение образцов при начальном нагружении и выйти на уровень нагрузки порядка 80% предельной, вызывающей разрушение наиболее слабого из испытываемых образцов. Этот уровень должен быть несколько ниже среднего, получаемого при обычных испытаниях одного образца из партии. Начальный уровень максимальных напряжений в цикле подбирали экспериментально, ориентируясь на значения предела

прочности при изгибе при однократном нагружении одиночных и собранных в кассеты образцов, а также на кривые долговечности для листового стекла при длительном статическом нагружении в режиме постоянного уровня нагрузки [3, 4]. Из всей суммарной наработки при циклических испытаниях для построения кривой усталости отобрали только число циклов на ступенях нагружения, где уровень напряжений составляет не менее 80% предельного максимального значения σ_{\max} при разрушении слабого образца. Полагали, что при меньшем уровне напряжений скорость докритического роста поверхностной трещины в фокусе излома пренебрежимо мала для рассмотренного диапазона долговечности образцов, и поэтому изменением уровня дефектности и прочности стекла при таких условиях можно пренебречь.

В качестве параметра долговечности принимали общее число циклов до разрушения при σ_{\max} , наработанное на ступенях циклического испытания, соответствующим условию

$$\sigma_{\text{ц}} > 0,8\sigma_{\max} \quad (2)$$

Для сравнения с полученными значениями долговечности на рис. 7 точками показаны данные о наработке на последних ступенях циклического нагружения образцов, которые попали в основную область экспериментальных значений, отражающих эффект циклической усталости (прямые 1 и 2). Однако их наработка в циклах оказалась примерно на порядок меньше, чем полная наработка (на рис. 7 эти результаты заметно смещены влево). Таким образом, учет наработки на предыдущих ступенях циклического нагружения позволяет существенно повысить достоверность экспериментальных кривых усталости стекла. Благодаря предложенному способу кассетных испытаний суммарное число циклов нагружения для многократно испытанных неразрушенных на предыдущих ступенях образцов постоянно возрастает. Результаты наработки (выше 10^5 цикл) для неразрушенных образцов приведены дополнительно на рис. 7. С учетом этих данных максимальное число циклов составляет $1,842 \cdot 10^6$.

Предел выносливости при изгибе листового стекла толщиной 5 мм на базе 10^6 цикл, определенный по графику на рис. 7, находится в диапазоне 28...44 МПа, среднее значение равно 36 МПа. Таким образом, при исследованном режиме циклических испытаний с коэффициентом асимметрии цикла $R \sim 0,05$ предел выносливости составляет всего 57% предела прочности стекла при изгибе. Снижение прочности за счет механизмов циклической усталости достигает 1,75 раза.

О негативном влиянии грубых технологических дефектов обработки края образцов стекла можно судить по данным испытания образцов, шлифованных крупнозернистым кругом. Эти результаты, показанные на рис. 7 стрелкой, расположены заметно ниже кривой 1, описывающей нижнюю границу результатов основной части образцов стекла толщиной 5 мм. Кроме образцов толщиной 5 мм для сравнения с кассетными испытаниями были испытаны при циклическом нагружении одиночные образцы стекла толщиной 10 мм. Более высокая нагрузка, необходимая для их разрушения, позволила провести испытания на машине Rumul Testronic. В связи с меньшей жесткостью этих образцов по сравнению с кассетными частота циклических испытаний была меньше (60...63 Гц). Результаты оценки прочности при циклических испытаниях стекла толщиной 10 мм оказались несколько выше таковых стекла толщиной 5 мм, но в целом соизмеримы с ними. Общая продолжительность циклических испытаний отдельных образцов в режиме, соответствующем условию (1), не превышает 5 ч и зависит от частоты нагружения. Для стекла толщиной 5 мм при наработке 10^6 цикл и средней частоте нагружения 100 Гц она составляет 2,8 ч. При испытании одиночных образцов стекла толщиной 10 мм с частотой 60 Гц максимальная продолжительность нагружения достигает 4,6 ч.

В результате исследования установлено, что основными особенностями механического поведения листового стекла при циклическом нагружении в условиях изгиба с частотой 60...200 Гц являются:

снижение в 1,75 раза предела выносливости на базе 10^6 цикл относительно величины предела прочности вследствие проявления механизмов усталости;

сопоставимые значения предела выносливости испытанных стекол толщиной 5 и 10 мм;

заметные изменения в процессе разрушения, связанные с различием исследуемых режимов циклического нагружения и кратковременных статических испытаний, что обнаруживается при фрактографическом анализе формы и размеров поверхностных трещин в фокусе излома на разных стадиях их роста в пределах зеркальной зоны;

существенное влияние поверхностных дефектов и технологических повреждений края на предел выносливости стекла.

Эффект циклической усталости стекла может зависеть от формы цикла, частоты и, следовательно, общей продолжительности действия нагрузки в диапазоне напряжений, в котором интенсивность роста микротрещин по механизмам коррозии под напряжением является высокой. Для оценки такого влияния и механизмов усталости на гидравлической машине ZD-4 были проведены повторно-переменные статические испытания кассет образцов стекла толщиной 4 мм в режиме ступенчатого длительного нагружения с постепенным повышением постоянной нагрузки в соответствии с условием (2). Ступени нагружения были аналогичны таковым при циклических испытаниях. На каждой ступени значение нагрузки поддерживали постоянным в течение 15 мин. При разрушении образца регистрировали максимальный уровень напряжений и суммарную длительность испытания на предыдущих ступенях. Было установлено, что в результате уменьшения нагрузки по сравнению с кратковременными испытаниями разрушение слабого образца не приводит к одновременному разрушению остальных. Поэтому для оценки реальной долговечности образцы подвергали дальнейшим испытаниям после установки нового образца. Общая длительность испытаний отдельных образцов при таком режиме нагружения не превышает 2,5 ч и сопоставима с продолжительностью циклических испытаний. Результаты ступенчатых длительных многократных испытаний с увеличенной продолжительностью пребывания кассеты образцов под постоянной нагрузкой в каждом цикле приведены на рис. 7. По уровню предельных напряжений они существенно ниже диапазона результатов при циклических испытаниях, который ограничен прямыми 1 и 2. Это указывает на то, что при исследованных режимах ступенчатого длительного повторного нагружения механизмы роста микротрещин при влиянии коррозии под напряжением реализуются более интенсивно. Причиной этого может быть увеличение продолжительности пребывания образцов стекла под напряжением в диапазоне, определенном условием (2), при проведенных ступенчатых длительных статических испытаниях по сравнению с циклическим нагружением. Для подтверждения данного предположения был проведен дополнительный сравнительный анализ результатов циклических и длительных статических испытаний.

Кривые “статической” усталости листового стекла описываются обычно уравнением типа [3, 4, 11, 15]:

$$\sigma_{\text{дл}} = \sigma_b (t_b / t_{\text{дл}})^{1/n}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{дл}}$ – предел длительной прочности при долговечности $t_{\text{дл}}$; σ_b – базовое значение предела длительной прочности при базовой долговечности t_b ; n – параметр, определяющий наклон кривой длительной прочности в логарифмических координатах. Для листового стекла базовое значение предела длительной прочности

σ_b было принято равным пределу прочности при изгибе 60 МПа при базовой долговечности $t_b = 10$ с.

Если принять подобную зависимость для оценки предела циклической усталости $\sigma_{ц}$ от числа циклов $N_{ц}$ в виде

$$\sigma_{ц} = \sigma_{bц} (N_{bц} / N_{ц})^{1/n_{ц}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{ц}$ – предел выносливости при заданной наработке $N_{ц}$; $\sigma_{bц}$ – базовое значение циклической прочности при базовой наработке $N_{bц}$; $n_{ц}$ – параметр, определяющий наклон кривой усталости в логарифмических координатах, для диапазона результатов циклических испытаний стекла толщиной 5 мм, который предварительно был ограничен прямыми 1 и 2 (рис. 7) $n_{ц} = 27$.

С целью уточнения величины $n_{ц}$ и сравнительной оценки параметров кривых усталости стекла при циклическом и статическом нагружении предложено для полученных результатов принять уровень базовой наработки $N_{bц}$ таким, чтобы длительность пребывания под нагрузкой при циклическом нагружении с выполнением условия (2) была сопоставимой с t_b при длительных статических испытаниях. Величину $N_{bц}$ определяли по соотношению

$$N_{bц} = t_b f, \quad (5)$$

где f – частота циклического нагружения.

При кассетных испытаниях образцов стекла толщиной 5 мм частота в среднем составляет около 100 Гц, при длительных статических испытаниях – $t_b = 10$ с. Тогда из (5) получим $N_{bц} = 10^3$ цикл. В уравнении (4) для результатов циклических испытаний листового стекла толщиной 5 мм может быть принято уточненное значение параметра $n_{ц} = 16$.

Полученные оценки параметров кривых усталости стекла могут зависеть от условий циклических испытаний, вида напряженного состояния и отличаться от характеристик усталости других типов линейно-упругих хрупких материалов, например прочной керамики, о чем свидетельствуют результаты работы [16]. На рис. 8 представлены кривые высокочастотной усталости (20 кГц) керамики (диоксид циркония 99%) с модулем упругости 160 ГПа, плотностью 5,2 г/см³ и размерами зерен 30...50 мкм при комбинированном нагружении (циклическое нагружение на кручение со сжатием) трубчатых образцов. Отмечалось, что при таком высокочастотном нагружении эффект разогрева рабочей части образцов отсутствует. Поэтому было высказано предположение о возможности сокращения продолжительности и уменьшения трудоемкости испытаний для определения предела выносливости при наработке 10^9 цикл для такого типа керамики за счет использования высокочастотных машин (одно испытание менее суток) вместо низкочастотных установок. Анализ приведенных кривых высокочастотной усталости показывает, что предел выносливости этой керамики при наработке 10^9 цикл равен 55 МПа и увеличивается до 62 МПа (примерно на 13%) в случае комбинированного нагружения (на рис. 8 кривая 2). В соответствии с уравнением (4) были получены расчетные значения параметра $n_{ц} = 19$ (кривая 1) и 27 (кривая 2). При испытании на кручение, как и при испытании на изгиб, разрушение хрупких материалов определяется уровнем наибольшего главного напряжения. Возможно, по этой причине величины $n_{ц}$ для кривой усталости 1 (рис. 8) для плотной керамики и полученной кривой усталости для листового стекла оказались сопоставимыми, несмотря на существенное различие между аморфной и поликристаллической структурой материалов, видом образцов и условиями испытаний. При кручении со сжатием увеличение $n_{ц}$ до 27 привело к повышению долговечности при циклическом нагружении данной керамики на два порядка при уровне

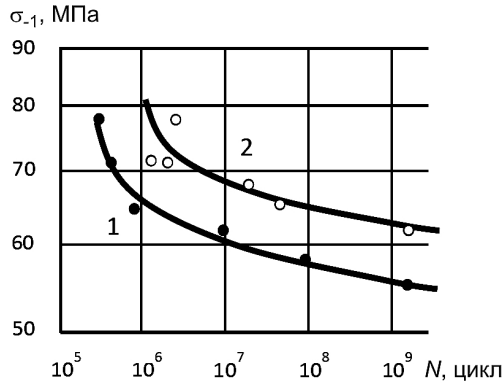


Рис. 8. Кривые усталости диоксидциркониевой керамики при комбинированном циклическом нагружении кручением со сжатием [16]: 1 – кручение; 2 – кручение с предварительным статическим сжатием до 25 МПа. Коэффициент асимметрии цикла $R = -1$.

напряжений 65 МПа. Это позволяет предположить, что на параметр $n_{ц}$ для стекла такое же заметное влияние может оказывать вид сложного напряженного состояния.

Рассмотрим вид кривой усталости при изгибе листового стекла, построенной в зависимости от суммарной продолжительности циклического нагружения по режимам, соответствующим условию (2). Суммарная долговечность $t_{ц}$ (в секундах) при циклическом нагружении оценивается из соотношения $t_{ц} = N_{ц}/f$. На рис. 9 все данные, полученные при разных режимах циклического и повторного статического нагружения, нанесены на кривую статической усталости листового стекла толщиной 4 мм в зависимости от длительности нагружения. При построении кривой статической усталости стекла были приняты базовое значение предела длительной прочности $\sigma_b = 60$ МПа и базовая долговечность $t_b = 10$ с. Видно, что все данные фактически совпадают с полученной ранее кривой длительной прочности листового стекла толщиной 4 мм при статическом нагружении с постоянным уровнем нагрузки, где $n = 16$ [3, 4]. Построенная обобщенная кривая усталости стекла для рассмотренных видов и режимов статического и циклического нагружения при изгибе подтверждает преимущественное влияние уровня исходной дефектности, длительности пребывания под нагрузкой, соответствующей условию (2), и механизмов “коррозии под напряжением” на скорость докритического роста поверхностных микротрещин в стекле, его предел выносливости и долговечность.

С учетом результатов исследования для оценки предела выносливости $\sigma_{ц}$ при циклическом нагружении с наработкой по времени $t_{ц}$ может быть использована эмпирическая зависимость

$$\sigma_{ц} = \sigma_b (t_b/t_{ц})^{1/n}, \quad (6)$$

где $t_{ц} = N_{ц}/f_{ц}$ – время суммарной наработки, оцениваемое по предложенной методике; параметры n , σ_b и t_b могут быть, до получения статистически более обоснованных результатов, приняты равными таковым для кривой длительной прочности при статическом нагружении с постоянным уровнем нагрузки.

В результате анализа уравнений (4) и (6) установлена зависимость параметров кривых циклической усталости $t_{ц}$ и t_b от частоты циклического нагружения в виде

$$t_{ц} = N_{ц}/f_{ц} \quad (7)$$

и

$$t_b = N_{bц}/f. \quad (8)$$

С учетом этого для ориентировочной оценки показателей циклической прочности листового стекла толщиной 4 мм с рассмотренным уровнем поверхностной дефектности можно исходить из результатов, представленных на рис. 9. При этом в качестве базовых параметров используем базовое значение циклической прочности $\sigma_{bc} = 60$ МПа при базовой долговечности $t_b = 10$ с. Для определения базового числа циклов N_{bc} был проведен эксперимент по оценке частоты колебаний при циклических кассетных испытаниях образцов стекла толщиной 4 мм. В результате установлено, что $f = 212$ Гц и $N_{bc} = 2,12 \cdot 10^3$ цикл. Построенная с учетом этого на рис. 7 область расчетных данных усталостных испытаний (показана пунктиром) характеризуется параметром $n = 16$. Расчетное среднее значение предела выносливости на базе 10^6 цикл составляет 40 МПа. Это на 10% выше, чем для экспериментальных результатов при циклических испытаниях стекла толщиной 5 мм, и подтверждает приемлемость такого подхода к оценке усталостной прочности стекла.

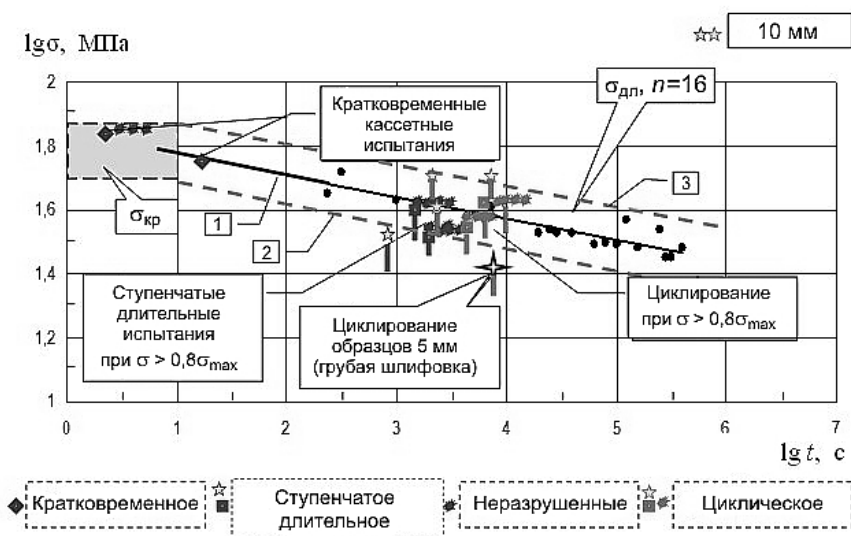


Рис. 9. Временная зависимость длительной прочности при изгибе листового стекла при ступенчатом статическом, низкочастотном циклическом нагружении и постоянной статической нагрузке: 1, 2, 3 – средние значения, нижняя и верхняя границы результатов испытаний длительной прочности стекла толщиной 4 мм соответственно (параметр $n = 16$); $\sigma_{кр}$ – область значений кратковременной прочности.

Уровень циклической прочности стекла при изгибе значительно зависит от характера и степени дефектности поверхности элементов. На рис. 7 и 9 показаны результаты кассетных испытаний образцов (5 мм) с грубо шлифованным краем, которые расположены заметно ниже основной области значений для образцов из этого стекла с оптимизированной технологией формирования края деталей.

Выводы

1. Разработана методика циклических испытаний прочности и трещиностойкости листового стекла при поперечном изгибе, что позволяет определить предел выносливости образцов листового стекла толщиной 5 мм в диапазоне частот 100...200 Гц при наработке 10^6 цикл и параметры кривой усталости.

2. Показано, что по уровню поверхностной дефектности стекла можно определить его прочность при изгибе и долговечность при циклическом нагружении, а рост поверхностных микротрещин в стекле обусловлен влиянием механизмов циклической усталости, которые требуют более глубокого изучения.

3. Процессы накопления повреждений как при циклическом, повторном статическом, так и при длительном статическом нагружении с постоянной нагрузкой определяются механизмами докритического роста микротрещин в условиях “коррозии под напряжением”, которые сосредоточены преимущественно в поверхностном слое стекла и наиболее интенсивно проявляются при уровне напряжений, превышающих 80% предела прочности при изгибе.

Резюме

Специфічна поверхнева дефектність листового скла, набута при виробництві на флоат лінії, чинить основний вплив на міцність і руйнування скляних елементів конструкцій при механічному навантаженні. Головними дефектами, які виявляються зазвичай у фокусі руйнування випробуваних скляних елементів, є поверхневі микротріщини глибиною до 100 мкм. Із використанням пластинчастих зразків і спеціального касетного методу їх випробувань досліджувались міцність та руйнування листового скла за довготривалого циклічного і статичного навантаження. Касети, що склалися з кількох зразків однакової товщини, випробовували таким чином, щоб кожний з них зазнавав навантаження за схемою чистого згину з однаковим рівнем розтяжних напружень на досліджуваній поверхні. Із використанням мікрофрактографічного аналізу оцінено характерні особливості злому, геометричні параметри та розміри джерела руйнування на критичній стадії навантаження зразків. При циклічних випробуваннях встановлено тенденцію до підвищення критичного значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Ic} відносно такого при довготривалому статичному навантаженні.

1. Rodichev Yu. M., Maslov V. P., Netychuk A. V., et al. Bending strength and fracture of glass materials under the different loading conditions // Proc. of Int. Conf. “Glass Performance Days 2007”. – Tampere, 2007. – P. 615–618.
2. Rodichev Yu. and Veer F. Fracture resistance, surface defects and structural strength of glass // Proc. of Int. Conf. Challenge Glass 2 – Architectural and Structural Applications of Glass. – 2010. – TU Delft. – P. 363–373.
3. Maslov V. P., Rodichev Yu. M., and Yevplov Yu. N. Durability of float glass and ceramics with zero thermal expansion coefficient // Proc. of Int. Conf. “Glass Performance Days 2005”. – Tampere, 2005. – P. 337–339.
4. Rodichev Yu. Assessment and management of strength and durability of composite glass elements // Proc. of Int. Conf. Challenge Glass 2 – Architectural and Structural Applications of Glass. – 2010. – TU Delft. – P. 351–362.
5. Родичев Ю. М. Влияние технологии и масштабного эффекта на прочность при изгибе элементов из термоупрочненного флоат стекла // Светопрозрачные конструкции. – 2008. – № 3 (59). – С. 43–51.
6. Черепанов Г. П. Механика разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
7. Энциклопедия неорганических материалов. – Киев: Наук. думка, 1977. – Т. 2. – 813 с.
8. Прочность неметаллических материалов / Г. А. Гогоци, Ю. М. Родичев (Разд. 9) // Прочность материалов и конструкций / Под ред. В. Т. Трощенко. – Киев: Академперіодика, 2005. – С. 929–992.
9. Gurney C. and Pearson S. Fatigue of mineral glass under static and cyclic loading // Proc. Royal Soc. London A. – 1948. – 192. – P. 537–544.
10. Souza R. C., Santos C., Barboza M. J. R., et al. Fatigue behavior of 3%Y₂O₃-doped ZrO₂ ceramics // J. Mater. Res. Technol. – 2014. – 3, No. 1. – P. 48–54.

11. Родичев Ю. М., Цыбанев Г. В., Бодунов В. Е., Кураш Ю. П. Дефектность и локализованное разрушение стекла при статическом и циклическом изгибе // Праці міжнар. наук.-техн. конф. "Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування". – Тернопіль: Терн. держ. техн. ун-т ім. І. Пулюя, 2009. – С. 108–112.
12. Wiederhorn S. M. and Bolz L. H. Stress corrosion and static fatigue of glass // J. Amer. Ceram. Soc. – 1970. – **53**, No. 10. – P. 543–548.
13. Kruzic J. J., McNaney J. M., Cannon R. M., and Ritchie R. O. Effects of plastic constraint on the cyclic and static fatigue behavior of metal/ceramic layered structures // Mech. Mater. – 2004. – **36**. – P. 57–72.
14. Geraghty R. D., Hay J. C., and White K. W. Fatigue degradation of the crack wake zone in monolithic alumina // Acta Mater. – 1999. – **47**. – P. 1345–1353.
15. Veer F. and Rodichev Yu. Corrosion effects on soda lime glass // Proc. of Int. Conf. Challenge Glass 2 – Architectural and Structural Applications of Glass. – 2010. – TU Delft. – P. 385–393.
16. Mayer H. R., Tschegg E. K., and Stanzl-Thschegg S. E. High-cycle torsion fatigue of ceramic materials under combined loading conditions (cyclic torsion and static compression) // Multiaxial Fatigue and Design (ESIS 21) / A. Pineau, G. Cailletaud, and T. C. Lindley (Eds.). – Wiley, 1996. – P. 411–421.

Поступила 30. 12. 2014