

Новоселов Алексей Николаевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО
РАЗРУШЕНИЯ И ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ
ГРАДИЕНТНОГО КРИТЕРИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ**

Направление 01.06.01 «Математика и механика»

Направленность 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

(технические науки)

Текст научного доклада

Новосибирск, 2018

В последнее время в разных сферах жизни большую популярность получили твёрдые прозрачные материалы, такие как стекло, различные алюмосиликаты и прозрачная керамика. Их используют в качестве экранов мобильных телефонов, линз оптических приборов, в строительстве современных небоскрёбов. В связи с этим становится актуальным вопрос о прочности данного класса материалов при контактном взаимодействии. В этой работе рассматривается вдавливание стальных шариков различного диаметра в стеклянные образцы. В окрестности области контакта материал находится в условиях неоднородного напряженного состояния, поэтому для моделирования разрушения материала применялись нелокальные критерии предельного состояния.

Согласно решению задачи Герца о вдавливании шара в упругое полупространство максимальное растягивающее напряжение достигается на поверхности полупространства на границе круговой области контакта и действует на площадке, перпендикулярной радиусу из точки начального контакта, то есть является радиальным напряжением. Следовательно, по локальному критерию максимальных напряжений разрушение должно начинаться на границе области контакта. Однако А.С. Аргоном с соавторами было экспериментально установлено, что при вдавливании шаров в стеклянные образцы радиус возникающей на поверхности образцов кольцеобразной трещины больше радиуса области контакта.

Это обстоятельство служит мотивацией экспериментального исследования хрупкого разрушения в окрестности области контакта и моделирования этого разрушения с помощью нелокальных критериев разрушения, учитывающих неоднородность поля контактных напряжений. Для применения этих критериев необходимо знать поле напряжений не только на поверхности, но и внутри полупространства. Распределение напряжений для задачи Герца о вдавливании шара в упругое полупространство было получено М.Т. Губером.

Для определения усилия, при котором образуется трещина, использовался метод видеофиксации. Испытания проводились на машине Zwick/Roell Z100 в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева. Установка для проведения испытаний представлена на рисунке 2. USB - микроскоп устанавливался под стальную защиту. Объектив микроскопа направлен в центр сквозного отверстия $\varnothing 10$ мм в крышке защиты. Сверху на эту крышку толщиной 10 мм помещается стеклянный образец, в который вдавливается стальной шар. Микроскоп передает изображение на компьютер в режиме реального времени, а установленное программное обеспечение позволяет вести видеосъёмку, а также делать фотографии. Оператор на мониторе компьютера замечает образование трещины, останавливает перемещение траверсы испытательной машины и фиксирует предельное усилие трещинообразования.

В качестве стеклянных образцов использовались прямоугольные параллелепипеды, имеющие высоту 10 мм и стороны по 20 мм. Образцы были изготовлены методом гидроабразивной резки из листового натрий-кальций-силикатного стекла марки М1 ГОСТ Р 54170-2010.

В первой серии экспериментов инденторами являлись шары диаметрами 3,14 мм, 5,5 мм, 10 мм и 12 мм из подшипниковой стали ШХ 15. Шар определенного диаметра вдавливался в 10 образцов. Всего было проведено 40 экспериментов. Вдавливание стальных шаров происходило со скоростью 3 мм/час. Образование кольцеобразных трещин показано на рисунке 3.

Радиус кольцеобразных трещин r_c определялся с помощью измерительного микроскопа. Радиус области контакта a вычислялся по формуле 1, полученной Герцем, где R – радиус шара; P – усилие, при котором образовалась трещина; E^* – эффективный модуль упругости при контакте стального шара со стеклянным образцом, который вычисляется по известным значениям модуля упругости и коэффициента Пуассона стали и стекла.

На рисунке 4 показаны результаты экспериментов. Видно, что величина усилия, при котором происходит образование трещин, имеет большой экспериментальный разброс даже при одном и том же диаметре шара. Значения отношения радиуса кольцеобразной трещины к радиусу области контакта показывают, что радиус трещины практически всегда больше радиуса области контакта. В среднем по 40 экспериментам радиус кольцеобразной трещины больше радиуса области контакта на 30 %.

Чтобы уменьшить повреждения поверхности образцов, которые могли возникнуть при гидроабразивной резке, образцы для второй серии экспериментов нарезались алмазным диском. Затем производился отжиг стеклянных образцов при температуре 520°C в течение 12 часов. Отжиг был проведен для снижения остаточных напряжений в образцах. Скорость вдавливания шаров была уменьшена до 1 мм/час. Результаты экспериментов представлены на рисунке 5. Видно, что от большого экспериментального разброса по величине усилия при образовании трещин избавиться не удалось. Однако отношение радиуса кольцеобразной трещины к радиусу области контакта стало более стабильным и в среднем составило 1.3.

Предельное растягивающее напряжение стекла определялось при трёхточечном симметричном изгибе балок (рисунок 6). Были испытаны 4 стеклянные балки, полученные гидроабразивной резкой, размерами 120x12x10 мм при скорости перемещения пуансона 50 мм/час. Также были испытаны 4 балки размерами 100x10x10 мм, вырезанные алмазным диском и отожженные при 520 °С в течение 12 часов. При этом скорость перемещения пуансона была снижена и составила 1 мм/час. Расстояние между опорами при трёхточечном изгибе было на 20 мм меньше длины балок. Максимальное растягивающее напряжение достигалось на гладкой стороне балки.

Таким образом, были получены следующие предельные растягивающие напряжения: для стекла после гидроабразивной резки $\sigma_p = 57.76$ МПа, для стекла после алмазной резки и отжига $\sigma_p = 41.85$ МПа.

Для определения критического коэффициента интенсивности напряжений стекла применялся четырёхточечный изгиб балок с надрезом (рисунок 7). Надрезы выполнялись алмазным диском толщиной 1 мм в среднем сечении балок размерами 100x10x10 мм. На 3 балках, изготовленных методом гидроабразивной резки, с надрезом длиной 2.5 мм испытания проводились при скорости перемещения нагружающего устройства 3 мм/час. Еще 4 балки, вырезанные алмазным диском и отожженные при 520 °С в течение 12 часов, с надрезом длиной 2 мм испытывались при скорости перемещения нагружающего устройства 1 мм/час. Надрез выполнялся на гладкой стороне балки и при испытаниях находился снизу посередине между нижними опорами балки, расположенными на расстоянии 80 мм. Сверху балка нагружалась двумя симметричными пуансонами, расстояние между которыми составляло 30 мм. Критический коэффициент интенсивности напряжений вычислялся по формуле 4.

Таким образом, были получены следующие критические коэффициенты интенсивности напряжений: для стекла после гидроабразивной резки $K_{Ic} = 1.152 \text{ МПа м}^{1/2}$, для стекла после алмазной резки и отжига $K_{Ic} = 1.271 \text{ МПа м}^{1/2}$.

Чтобы аналитически получить максимальные растягивающие напряжения в любой точке полупространства рассмотрим решение, полученное Губером. Максимальные растягивающие напряжения в любой точке полупространства определяются по формуле 6.

Для каждого диаметра шарика в первой серии экспериментов на рисунке 8 построены зависимости растягивающего радиального напряжения на поверхности полупространства от радиуса. Значения координат жирных точек на графике равны значениям максимальных растягивающих напряжений для стекла первой серии и радиусам кольцеобразных трещин соответственно для каждого из диаметров шариков.

На рисунке 9 показаны растягивающие напряжения на поверхности полупространства для каждого диаметра шарика второй серии экспериментов. Значения координат жирных точек на графике равны значениям максимальных растягивающих напряжений для отожжённого стекла и радиусам кольцеобразных трещин соответственно для каждого из диаметров шариков.

Рассмотрим применение нелокальных критериев разрушения для оценки максимальных растягивающих напряжений. Согласно интегральному критерию разрушения с пределом прочности материала σ_b сравнивается не максимальное положительное значение первого главного напряжения σ_1 , а среднее нормальное напряжение, полученное из формулы 7, на площадке размером L_1 , включающей бесконечно малую площадку σ_1 в рассматриваемой точке тела $x=0$. Напряжение вдоль другой стороны площадки предполагается постоянным. Размер площадки осреднения L_1 находится из уравнения 8.

Для первой серии экспериментов этот параметр равен 0.253 мм. По данному критерию построим зависимость максимальных растягивающих напряжений по поверхности полупространства. Из графика можно найти максимум полученной функции, проекция которого на ось абсцисс будет соответствовать значению радиуса кольцеобразной трещины. Полученные значения занесены в таблицу. Значения координат жирных точек на графике равны значениям максимальных растягивающих напряжений для стекла первой серии и радиусам кольцеобразных трещин соответственно для каждого из диаметров шариков.

Для второй серии экспериментов параметр L_1 равен 0.587 мм. По данному критерию также построим зависимость максимальных растягивающих напряжений по поверхности полупространства, рисунок 9. Из графика можно найти максимум полученной функции, проекция которого на ось абсцисс будет соответствовать значению радиуса кольцеобразной трещины. Полученные значения занесены в таблицу. Значения координат жирных точек на графике равны значениям максимальных растягивающих напряжений для отожжённого стекла и радиусам кольцеобразных трещин соответственно для каждого из диаметров шариков.

В критерии Нуизмера с пределом прочности материала сравнивается не максимальное напряжение в рассматриваемой точке тела, а напряжения в некоторой точке, удалённой от рассматриваемой на расстоянии $L_1/4$, уравнение 9.

Аналогично с предыдущим критерием, построим зависимость максимальных растягивающих напряжений по поверхности полупространства, из графика находим максимум

полученной функции, проекция которого на ось абсцисс будет соответствовать значению радиуса кольцеобразной трещины. График зависимости максимальных растягивающих напряжений для первой серии показан на рисунке 10. Полученные значения занесены в таблицу. Значения координат жирных точек на графике равны значениям максимальных растягивающих напряжений для стекла первой серии и радиусам кольцеобразных трещин соответственно для каждого из диаметров шариков.

График зависимости максимальных растягивающих напряжений для второй серии показан на рисунке 11. Полученные значения занесены в таблицу. Значения координат жирных точек на графике равны значениям максимальных растягивающих напряжений для отожжённого стекла и радиусам кольцеобразных трещин соответственно для каждого из диаметров шариков.

В градиентном критерии для определения начала разрушения с пределом прочности материала σ_e , сравнивается не максимальное, а эффективное напряжение σ_e . Эффективное напряжение пропорционально первому главному напряжению σ_1 , в рассматриваемой точке тела, принятому в качестве эквивалентного. Локальная неравномерность распределения напряжений характеризуется относительным градиентом g_1 , положительного нормального напряжения σ_r , действующего на плоскости, включающей площадку первого главного напряжения в рассматриваемой точке тела, где плоскость и площадка имеют общую нормаль r . Относительный градиент находится с использованием решения соответствующей задачи теории упругости. β – неотрицательный безразмерный параметр, который можно рассматривать как параметр аппроксимации. Будем считать, что разрушение в окрестности рассматриваемой точки начинается при достижении эффективным напряжением σ_e предела прочности материала $\sigma_e = \sigma_e$ и первоначально распространяется по площадке действия напряжения σ_1 . Эффективное напряжение по градиентному критерию разыскивается на поверхности полупространства при $z = 0$. Итоговое соотношение для определения эффективного радиального напряжения записано в уравнении 10.

Аналогично с предыдущими критериями, построим зависимость эффективного напряжения по поверхности полупространства от радиуса, из графика находим максимум полученной функции, проекция которого на ось абсцисс будет соответствовать значению радиуса кольцеобразной трещины. Графики зависимости эффективного напряжения для первой серии показан на рисунке 12. Полученные значения занесены в таблицу. Значения координат жирных точек на графике равны значениям максимальных растягивающих напряжений для стекла первой серии и радиусам кольцеобразных трещин соответственно для каждого из диаметров шариков.

График зависимости эффективного напряжения по поверхности полупространства для второй серии показан на рисунке 12. Полученные значения занесены в таблицу. Значения координат жирных точек на графике равны значениям максимальных растягивающих напряжений для отожжённого стекла и радиусам кольцеобразных трещин соответственно для каждого из диаметров шариков.

Анализируя полученные оценки по каждому из нелокальных критериев можно сказать, что оценка максимальных растягивающих напряжений по градиентному критерию наиболее близка к полученному экспериментально максимальному растягивающему напряжению для стекла.

Заключение. В данной выпускной научно-квалификационной работе исследовано разрушение двух типов стекла при контактном взаимодействии. Проведены две серии экспериментов по вдавливанию стальных шаров различного диаметра в стеклянные образцы в виде прямоугольного параллелепипеда. В первой серии испытано 40 образцов: по 10 для каждого диаметра шара. Для уменьшения остаточных напряжений образцы второй серии подвергались отжигу при температуре 520°C в течение 12 часов. Во второй серии испытано 36 образцов: по 12 для каждого диаметра шара.

Экспериментально определены предельные усилия при образовании кольцеобразных трещин в окрестности области контакта и радиусы этих трещин. Почти во всех испытаниях кольцеобразные трещины возникали за пределами области контакта. Так как диаметр области контакта был много меньше размеров образцов, то стеклянные образцы рассматривались как упругое полупространство. Для определения поля контактных напряжений в зоне разрушения использовалось решение Губера задачи Герца о вдавливании шара в упругое полупространство.

Для моделирования контактного разрушения применялись локальный критерий максимальных напряжений и нелокальные критерии разрушения, а именно критерий средних напряжений, критерий Нуизмера и градиентный критерий. Для вычисления параметров, входящих в нелокальные критерии разрушения, экспериментально определены предельное растягивающее напряжение и критический коэффициент интенсивности напряжений стекла. Указанные характеристики стекла получены из экспериментов, проведенных на балках без надреза и с надрезом.

Показано, что из примененных критериев разрушения наиболее близкие к экспериментальным данным оценки радиуса кольцеобразной трещины дает градиентный критерий. Оценки предельного растягивающего напряжения по этому критерию, превышают значения, полученные при изгибе балок, что можно объяснить масштабным фактором.

Новоселов А.Н.

