

УДК 539.3

РАЗРУШЕНИЕ СФЕРОПЛАСТОВЫХ ОБРАЗЦОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

Е. В. Карпов

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Приведены результаты экспериментальных исследований концентрации напряжений в цилиндрических образцах из сферопластов (композитов, в которых связующим является эпоксидно-диановая смола, наполнителем — стеклянные микросферы) с некоторыми видами концентраторов и разрушения этих образцов при осевом сжатии. Проведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния однородных образцов с концентраторами в статической линейно-упругой постановке, а также моделирование эффектов, обнаруженных при разрушении образцов.

Описание образцов, материалов и условий проведения экспериментов. Исследовались образцы из сферопластов ЭДС-7 и ЭДС-5А — композитов, состоящих из эпоксидно-диановой смолы (в составе ЭДС-5А присутствует также пластификатор) и наполнителя в виде стеклянных микросфер (микробаллонов) [1–3]. Большинство микросфер имеют диаметр от 10 до 40 мкм, толщина стенок микросфер 1–2 мкм. Цифра в названии сферопласта означает плотность материала. Так, плотность образцов из ЭДС-7 равна примерно $0,7 \text{ г/см}^3$. Модуль Юнга, полученный в экспериментах на сжатие цилиндров и брусков без концентраторов, для ЭДС-7 равен 2800 МПа, для ЭДС-5А — 1600 МПа, коэффициент Пуассона ν , полученный в тех же экспериментах, для обоих материалов равен 0,3.

Образцы представляли собой круговые цилиндры длиной 167 мм и диаметром 45 мм с поперечными цилиндрическими отверстиями радиусом 5 и 8 мм (рис. 1). Испытывались также брусок длиной 167 мм, имеющий квадратное сечение с длиной стороны 45 мм, цилиндрический образец с отверстием радиусом 5 мм, подкрепленным жесткой вкладкой, и цилиндрические образцы различных размеров без отверстий. Все образцы нагружались приложенной на торцах сжимающей силой, направленной вдоль оси Z (рис. 1). До зарождения трещины (момент зарождения определялся по характерному треску) в статическом режиме осуществлялось нагружение путем равных последовательных догружений и производились замеры деформаций ε_{ZZ} с помощью фольговых тензорезисторов, расположенных на продольной оси a и поперечной дуге b (рис. 1) на различных расстояниях от отверстия (результаты замеров представлены ниже). Затем образцы одноосным сжатием доводились до разрушения.

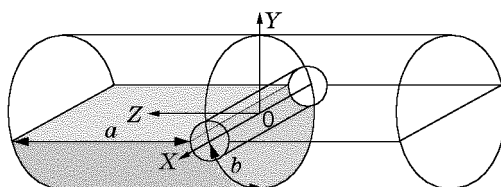


Рис. 1

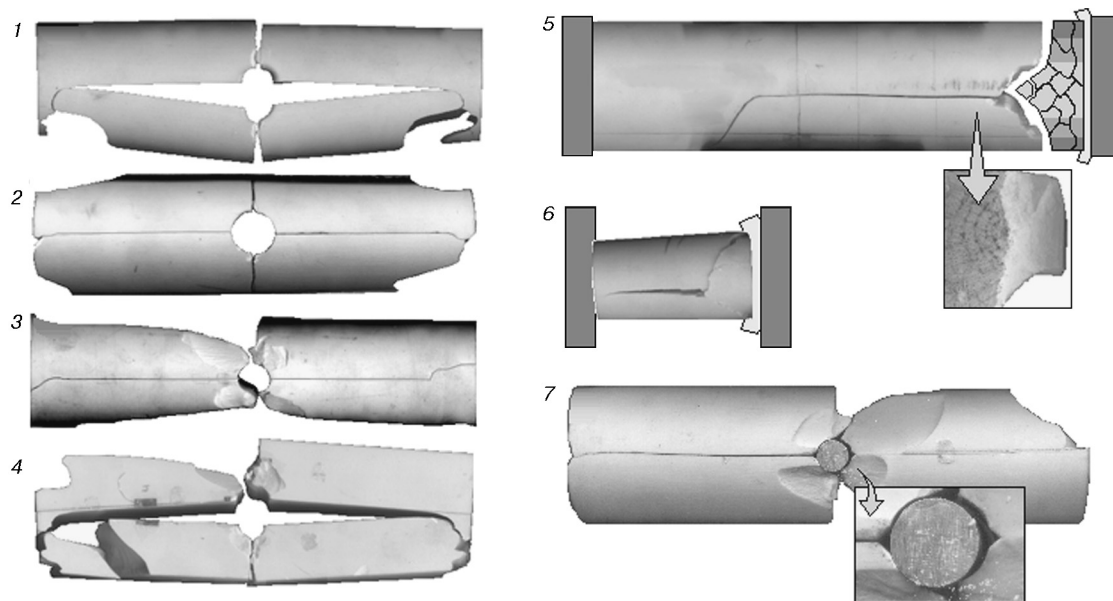


Рис. 2

Эксперименты на разрушение. Проведена серия экспериментов по разрушению сферопластовых цилиндров с некоторыми видами концентраторов. Фотографии разрушенных образцов представлены на рис. 2. Образцы 1 и 2 выполнены из ЭДС-5А, радиусы отверстий равны 5 и 8 мм соответственно. Образец 3 выполнен из ЭДС-7, радиус отверстия 5 мм. Образец 4, выполненный из ЭДС-5А, имел квадратное сечение и отверстие радиусом 5 мм. Образцы 5 и 6, выполненные из ЭДС-5А, отверстий не имели. Образец 7 выполнен из ЭДС-5А, отверстие радиусом 5 мм было подкреплено жестким вкладышем.

Все образцы разрушились с образованием трещины, лежащей в плоскости диаметрального сечения XZ . Берега трещины имели вид ровных плоских поверхностей. В образцах 1–4 после того, как трещина распространялась по всему образцу, происходил поперечный разлом образовавшихся половин образца около отверстия с отколом достаточно больших кусков материала вблизи концентратора (образцы 3, 4) или торцов (образцы 1, 2). В образце 7 вместо поперечного разлома половин происходил скол под углом, близким к 45° .

В тех случаях, когда отверстие не было подкреплено жестким вкладышем, причиной продольного разрыва образца являлась концентрация растягивающих напряжений σ_{yy} в плоскости XZ вблизи отверстия. Здесь разрушение проходило скачкообразно. Для образцов из ЭДС-5А наблюдалось раскрытие трещины (до 5 мм в широком конце) со скачкообразным продвижением к торцам. После образования раскрытой трещины изменения нагрузки при дальнейшем сжатии не происходило вплоть до полного разрушения. В образцах из ЭДС-7 трещина оставалась закрытой до момента полного разрушения при возрастающей нагрузке.

В образцах 5, 6 на левом торце имелся прямой контакт с наковальной пресса, на правом торце использовалась фторопластовая прокладка, помещенная между образцом и наковальной. В этих образцах у торца со фторопластовой прокладкой образовывалась разрушенная клиновидная область, после чего происходил раскол остальной части образцов по плоскости симметрии (для образца 5 клиновидная часть изображена схематически, поскольку в результате разрушения она распалась на большое количество мелких осколков). После образования клиновидной области растягивающие напряжения σ_{yy} концентрировались в

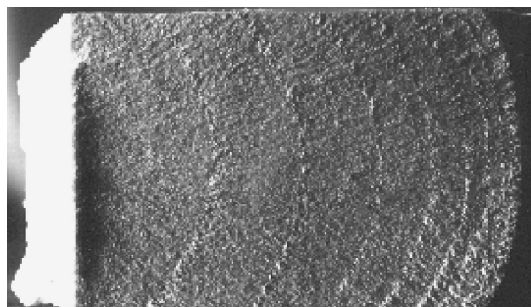


Рис. 3

угле вогнутой передней кромки клина, показанной на фрагменте фотографии поверхности разрыва на рис. 2 рядом с разрушенным концом образца 5.

В случае выреза, подкрепленного вкладышем, разрушение происходило в два этапа. Вначале под действием сжимающих напряжений σ_{ZZ} произошло локальное разрушение микросфер и спрессовывание пористого материала в зонах концентрации. Материал, оставаясь упругим на сжатие, перестал сопротивляться разрыву, что привело к образованию двух дополнительных концентраторов. На рис. 2 (увеличенный фрагмент образца 7) они имеют вид треугольных отверстий по бокам вкладыша. Эти концентраторы вызвали резкий скачок растягивающих напряжений σ_{YY} в плоскости XZ вблизи выреза, что привело к быстрому разрушению по плоскости XZ .

В образцах 1, 3–6 на поверхностях разрыва образовался характерный рельеф (рис. 3), состоящий из области, выпуклой в сторону торца и примыкающей к краю концентратора (на рис. 3 черная область у левого края поверхности разрыва), и выгнутых узких рельефных полос одинаковой кривизны, сгущающихся по мере приближения к торцу. Рельеф симметричен относительно концентратора (для образцов с отверстием). Для идентичных образцов рельефы на поверхности разрыва при наложении совпадают с точностью до ширины выгнутых полос. Для образцов одинаковой геометрии, но выполненных из разных материалов, единственное различие рельефов состоит в разных расстояниях от первой выгнутой полосы до концентратора. Наличие описанного рельефа характерно для образцов как круглого, так и квадратного сечений. Для различной геометрии (разных типов концентратора или разной площади срединного поперечного сечения) имеются различия в кривизне рельефных полос, их густоте, характерных размерах рельефа и удаленности первой полосы от концентратора.

Рельеф на поверхности разрушения не наблюдался в случае быстрого разрушения, вызванного резким скачком растягивающих напряжений (подкрепленный вырез), и в случае большего радиуса выреза (8 мм), когда первичная трещина сразу прошла почти через весь образец и остановилась на расстоянии примерно 10 мм от торцов.

При помощи растрового электронного микроскопа LEO-420 получены фотографии структуры материала на различных участках гладкой поверхности разрыва между рельефными полосами, на самих полосах и в рельефной зоне, примыкающей к концентратору. Микроскопическое исследование показало, что кроме четко выраженного рельефа выгнутые полосы и выпуклая зона, примыкающая к краю концентратора, имеют еще одно отличие от остальной поверхности. На выгнутых полосах и в выпуклой зоне разрушены микросферы, в то время как на остальной части поверхности они целы.

Целостность микросфер на поверхности разрушения свидетельствует о том, что разрушение происходило путем нормального отрыва, поскольку разрушение сдвигом должно было срезать сферы.

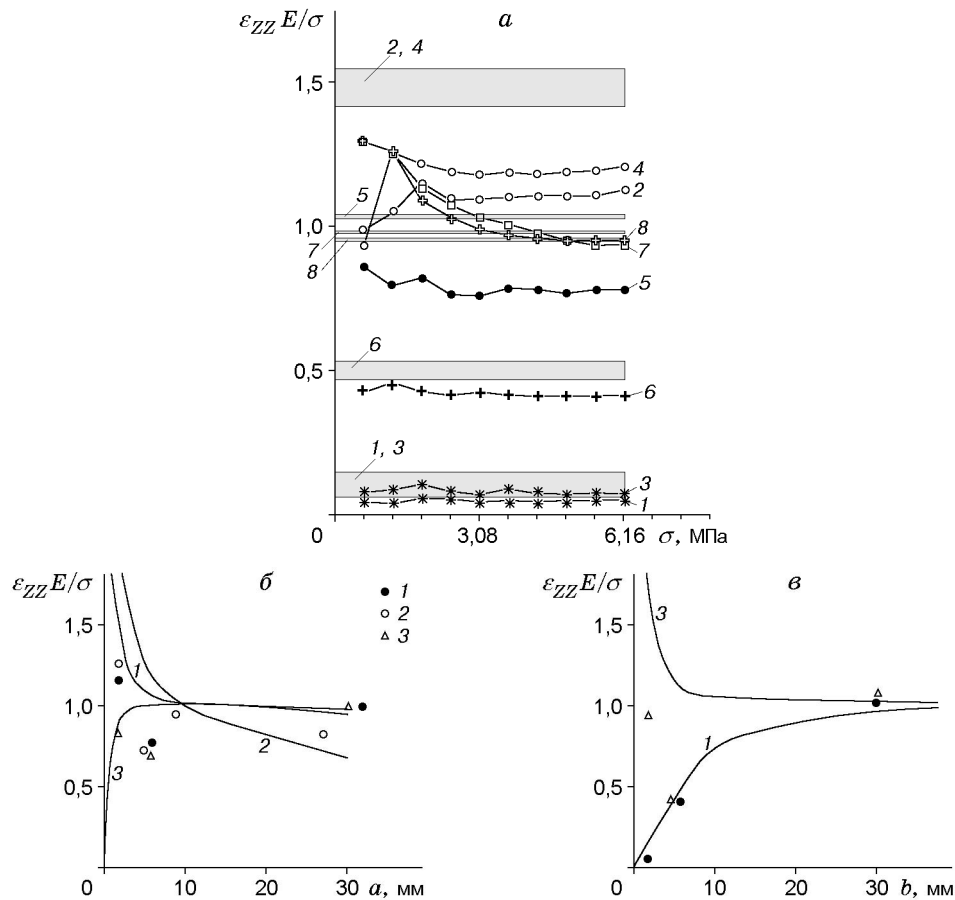


Рис. 4

Сравнение численных результатов с экспериментальными данными. Проведены численные эксперименты по моделированию напряженно-деформированного состояния в исследуемых образцах.

Решались задачи об одноосном сжатии в статической линейно-упругой постановке с использованием метода конечных элементов. Для построения моделей использовались трехмерные изопараметрические восьмиузловые конечные элементы. Материал рассматривался как однородный. Расчеты выполнены в Центре компьютерных технологий в механике (Институт механики Московского государственного университета) с помощью конечно-элементного пакета ANSYS.

На рис. 4 приведено сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов. На рис. 4,а показаны зависимости безразмерного коэффициента $\epsilon_{zz} E/\sigma$ от приложенного напряжения σ (E — модуль Юнга сферопласта, ϵ_{zz} — деформация, замеряемая датчиком). Коэффициент $\epsilon_{zz} E/\sigma$ представляет собой отношение деформации ϵ_{zz} к деформации, соответствующей напряжению σ в упругом бездефектном сферопласте с модулем Юнга E . В том случае, когда $\epsilon_{zz} E/\sigma > 1$, эта величина называется коэффициентом концентрации напряжения σ_{zz} . На рис. 4,а приведены данные для образца из ЭДС-7 с радиусом выреза 5 мм (для остальных образцов они аналогичны). Здесь представлены совокупности экспериментальных точек для каждого из датчиков, имевшихся на образце, и значения коэффициента $\epsilon_{zz} E/\sigma$ для расчетных значений ϵ_{zz} в местах наклейки датчиков. Расчетные значения коэффициента $\epsilon_{zz} E/\sigma$ не зависят от величины приложенной нагрузки. Эти значения находятся внутри горизонтальных полос различной ширины, верхние и нижние

границы которых соответствуют наибольшим и наименьшим значениям $\varepsilon_{ZZ}E/\sigma$ в пределах площади, занимаемой датчиком. Расчетные значения и совокупности экспериментальных точек соответствуют номерам датчиков. Датчики 1, 3 расположены на продольной оси a (см. рис. 1) на расстоянии 2 мм от края отверстия (симметрично относительно центра отверстия), датчики 6, 7 — на продольной оси a на расстоянии 6 и 30 мм от края отверстия соответственно. Датчики 2, 4 расположены на поперечной дуге b на расстоянии 2 мм от края отверстия (симметрично относительно центра отверстия), датчики 5, 8 — на поперечной дуге b на расстоянии 6 и 32 мм от края отверстия соответственно.

На рис. 4, *a* видно, что в начале нагружения в местах расположения почти всех датчиков (в менее плотном материале ЭДС-5А в местах расположения всех датчиков) наблюдаются большие скачки деформаций, при дальнейшем нагружении коэффициент $\varepsilon_{ZZ}E/\sigma$ практически перестает зависеть от приложенного напряжения, т. е. происходит линейно-упругое деформирование. Начальные скачки, скорее всего, являются следствием начальной стабилизации образца, которая, как правило, наблюдается в экспериментах на первом этапе нагружения. Поэтому при получении среднего экспериментального коэффициента для сравнения с расчетным учитывается только этап стабильного деформирования.

Сравнение с результатами расчетов показывает следующее. Экспериментальные значения деформаций для датчиков, расположенных в зонах, где $\varepsilon_{ZZ}E/\sigma < 1$, достаточно близки к рассчитанным по конечно-элементной модели. В то же время датчики, находящиеся в расчетной зоне концентрации напряжений, фиксируют деформации значительно меньше расчетных. Это уменьшение деформаций хорошо видно на графиках, представленных на рис. 4, *b, в*. Здесь показана зависимость коэффициента $\varepsilon_{ZZ}E/\sigma$ от координат по поперечной дуге b и продольной оси a , которые отсчитываются от края отверстия. Точки 1 соответствуют образцу с отверстием радиусом 5 мм, 2 — образцу с отверстием радиусом 8 мм, 3 — образцу с отверстием радиусом 5 мм, укрепленным жесткой вкладкой. Кривые 1–3 представляют собой расчетные зависимости для соответствующих образцов. На рис. 4, *b, в* видно, что в зонах концентрации наблюдается сильное уменьшение деформаций относительно расчетных значений, более того, вместо их монотонного убывания по мере удаления от отверстия имеется резкое уменьшение деформации вблизи края концентратора с последующим увеличением до значений, средних по образцу. Для образца с жесткой вкладкой этот эффект наблюдается вблизи отверстия как на продольной оси, где происходит концентрация напряжений, так и на поперечной дуге, где напряжения меньше приложенного на торцах.

Причина уменьшения деформаций в зонах концентрации напряжений может заключаться в следующем. Вблизи поверхности образца, образовавшейся в результате сверления отверстия, появляется тонкий цилиндрический слой материала с разрушенными микросферами. В зонах наибольшей концентрации сжимающих напряжений может происходить локальное спрессовывание сферопласта, ослабленного разрушением части микросфер. Схлопывание сферических пустот делает материал более жестким, что должно приводить к уменьшению деформаций вблизи зоны локального разрушения. Возможно и дальнейшее продвижение зоны локального разрушения в глубь материала. В образцах из ЭДС-5А о таком продвижении, возможно, свидетельствует отсутствие для некоторых датчиков, находящихся в зонах концентрации, горизонтального участка на графиках экспериментальной зависимости коэффициента $\varepsilon_{ZZ}E/\sigma$ от торцевого напряжения.

Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния с локальным увеличением модуля Юнга в области наибольшей концентрации сжимающих напряжений. Результаты расчета не противоречат результатам экспериментов, в которых наблюдалось возникновение зон уменьшенных деформаций. На рис. 5 приведены поля сжимающих деформаций ε_{ZZ} для различных значений модуля Юнга в зоне концентрации. Светлые тона соответствуют меньшим деформациям, темные — большим.

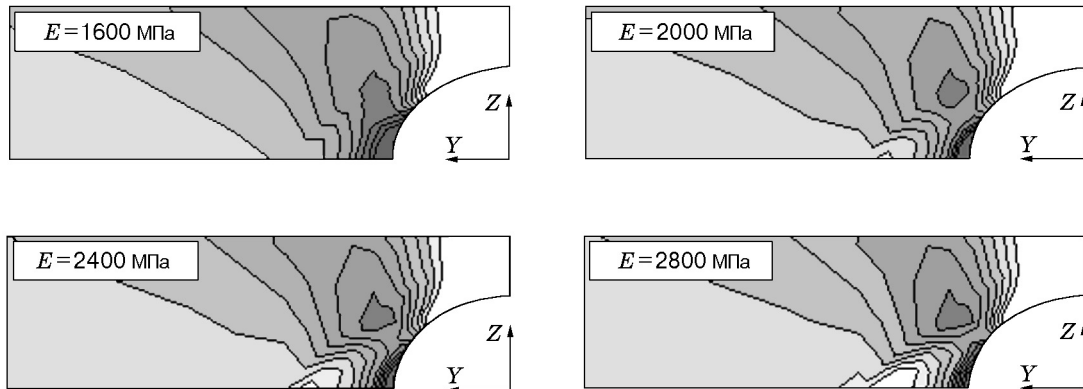


Рис. 5

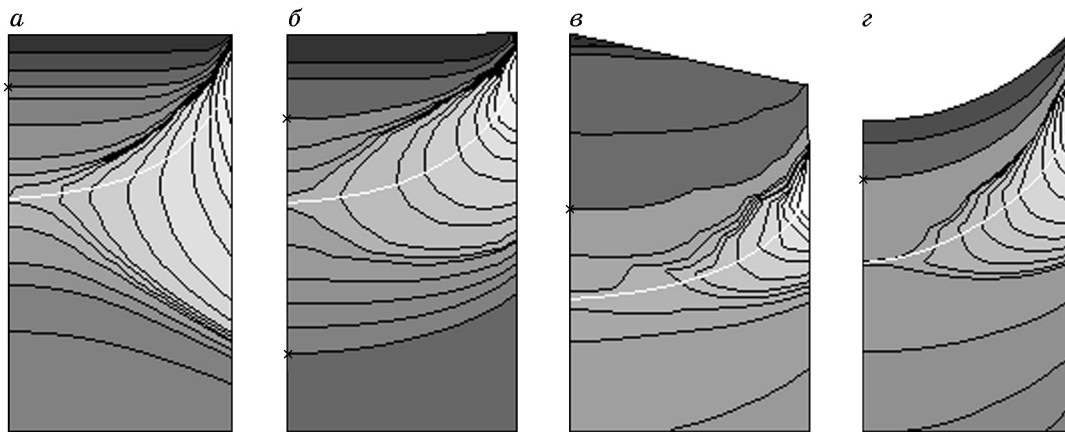


Рис. 6

При приложенных на торцах напряжениях, близких к критическим, приводящим к зарождению трещины в плоскости XZ , в зонах концентрации наблюдается процесс, аналогичный тому, который, возможно, приводит к возникновению описанных областей уменьшенных деформаций. Происходит самопроизвольный рост деформации без повышения приложенного напряжения. Затем вновь появляется линейная зависимость деформации от приложенного напряжения, причем жесткость материала увеличивается по сравнению с первоначальной.

На рис. 6 представлены поля напряжений $\sigma_{\gamma\gamma}$ в плоскости разрыва XZ . На рис. 6, *а, б* приведены результаты расчета для цилиндра и бруска с поперечным отверстием соответственно, на рис. 6, *в* — результаты расчета для случая, когда вблизи одного торца имеется разрушенная клиновидная часть. Воздействие этой части заменено действием сжимающих напряжений, нормальных к поверхностям, по которым клиновидная часть отделена от остального образца. На рис. 6, *г* приведены результаты расчета для цилиндра, когда кроме поперечного отверстия имеется трещина в плоскости XZ , идущая от края отверстия и имеющая переднюю кромку, совпадающую с первой выгнутой рельефной полосой для образцов из ЭДС-7 (см. рис. 3). На рис. 6, *а–г* сверху расположен край концентратора, справа — линия пересечения поверхности разрыва с поверхностью образца, слева — ось симметрии Z . Торцы, в направлении которого в экспериментах распространялась трещина, расположены за пределами рис. 6 (внизу). Ось Y перпендикулярна плоскости рисунка. В случае, представленном на рис. 6, имеются как растягивающие напряжения, так и сжимающие. Крестиками показана граница между ними (изолиния нулевых напряжений).

Наиболее светлые тона соответствуют наибольшим сжимающим напряжениям, наиболее темные — наибольшим растягивающим. Значения напряжений, соответствующие изолиниям, не приведены, поскольку экспериментально определить напряжения внутри целого образца не представляется возможным.

Сравнение расчетных полей напряжений σ_{yy} в плоскости разрыва с результатами разрушения образцов показало следующее. Для всех рассмотренных типов концентраторов, непосредственно приводящих к образованию трещины в плоскости XZ (вырез без вкладыша, вырез и трещина с выгнутой кромкой, образец с разрушенной клиновидной частью), наблюдается один и тот же тип распределения напряжений (рис. 6). Вблизи концентратора имеется выпуклая в сторону торца зона растягивающих напряжений. Перед этой зоной образуются зоны сжимающих напряжений. Точки, в которых изолинии сжимающих напряжений имеют наименьшую кривизну, располагаются вдоль некоторой кривой (белая линия на рис. 6). Вдоль этой кривой сжимающие напряжения распределены так, что у краев они максимальны, а при приближении к оси симметрии уменьшаются, сохраняя ненулевые значения. Формы этих кривых и формы выгнутых рельефных полос (см. рис. 3) одинаковы, что справедливо для всех рассмотренных типов геометрии образцов. Кроме того, рельефные полосы на поверхности разрыва по форме и размерам совпадают с зоной концентрации опасных растягивающих напряжений, полученной в расчетах, в случае, когда концентратор включает трещину с выгнутой передней кромкой. Это позволяет предположить, что именно наличие описанных зон сжатия является причиной торможения и остановок трещины, а выгнутые рельефные полосы представляют собой передние кромки трещины в моменты остановок. Зоной первичного зарождения трещины у края выреза является рельефная выпуклая зона, примыкающая к вырезу и также совпадающая по размерам и форме с зоной опасной концентрации.

Модель зарождения трещины на уровне структуры сферопласта. Экспериментально показано, что выпуклая в сторону торца зона, примыкающая к концентратору, и выгнутые полосы отличаются от общей поверхности разрыва наличием выраженного рельефа и разрушенных микросфер. Расчеты по модели для однородного материала показывают, что в плоскости XZ только растягивающие напряжения σ_{yy} достигают опасных значений, поэтому только они могут являться причиной разрушения микросфер и появления рельефа.

Отличие рельефных зон от остальной поверхности можно объяснить, если с макроscopicкого уровня перейти на уровень структуры сферопласта. Возможно, образованию макроscopicкой трещины предшествует возникновение множества микротрещин в матрице между сферическими включениями, из которых затем формируется магистральная трещина. Поскольку структура сферопласта неупорядочена, на этом этапе возможно распространение микротрещин в разных направлениях. Это должно вызывать беспорядочное перераспределение очагов концентрации растягивающих напряжений σ_{yy} , что может приводить к перекашиванию и разрушению микросфер, а также к образованию в дальнейшем рельефа на макроscopicкой поверхности разрыва. Такой процесс может происходить в рельефной зоне, примыкающей к краю цилиндрического концентратора, где происходит зарождение трещины в плоскости XZ . Этот же процесс имеет место в выгнутых рельефных полосах, где магистральная трещина переходит от неподвижного состояния к дальнейшему распространению.

Для выяснения механизма зарождения трещины на уровне структуры сферопласта построена конечно-элементная модель. Область образца, напряженно-деформированное состояние которой моделировалось, показана на рис. 7. Это плоская пластинка, принадлежащая сечению образца плоскостью, параллельной YZ . Одна сторона пластинки принадлежит краю отверстия. На рис. 8 представлена конечно-элементная модель этой пластинки

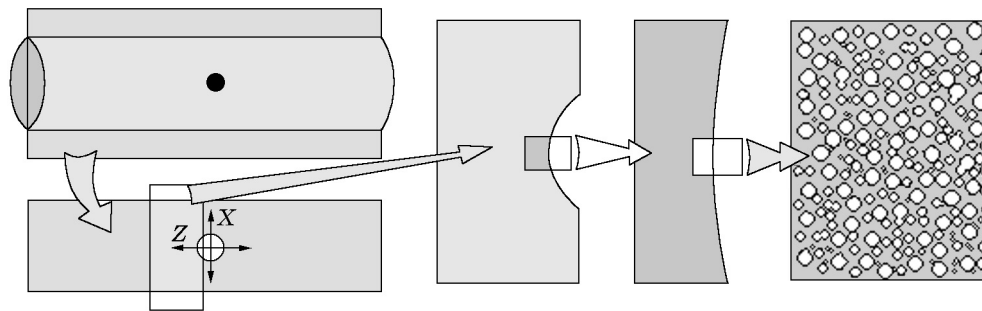


Рис. 7

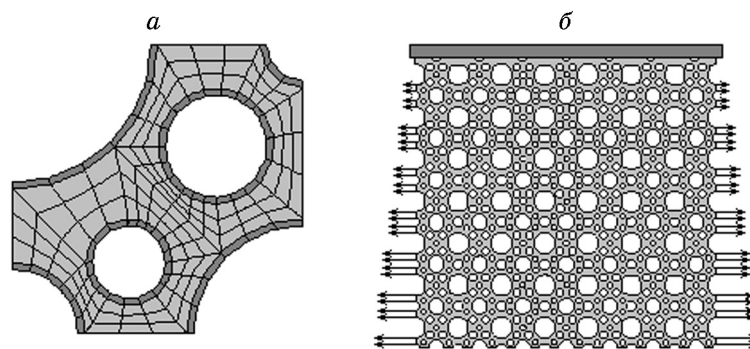


Рис. 8

(сторона, принадлежащая краю концентратора, обращена вниз), составленная из фрагментов, показанных на рис. 8, *а* (элементы темного цвета — стекло, из которого состоят кольца, являющиеся сечением микросфер, более светлые элементы — эпоксидная смола). Граничные условия схематически представлены на рис. 8, *б*: сверху пластина жестко закреплена, по бокам приложены растягивающие напряжения, уменьшающиеся при удалении от свободного нижнего края. Разрушение моделировалось удалением совокупностей конечных элементов, в которых отмечались опасные значения растягивающих напряжений. Деформированное стеклянное кольцо считалось разрушенным, если на одном из его участков радиус кривизны становился много меньше среднего. Результат моделирования представлен на рис. 9, на котором показаны различные стадии разрушения. Темные зоны, отмеченные стрелками, соответствуют повышенным разрывающим напряжениям.

На основе численного моделирования можно получить следующую картину зарождения трещины в структуре сферопласта. До начала разрушения по всей свободной границе распределены одинаковые очаги опасных напряжений (рис. 9, *а*), поэтому первичный разрыв может появиться в любом ее месте, где окажется какой-либо микродефект. Следовательно, и в соседних плоскостях разрыв может произойти в разных местах, что, возможно, является одной из причин возникновения рельефа. Когда появляется первичный разрыв, перед ним возникает фронт одинаковых очагов повышенных напряжений, более высоких, чем были на свободной границе до возникновения разрыва (рис. 9, *б*). Так как максимальные напряжения в этих очагах одинаковы, начинается растрескивание материала перед первичным разрывом, что приводит к искажению и разрушению стеклянных колец (рис. 9, *в*). По мере расширения зоны растрескивания (рис. 9, *г-е*) и ее продвижения в глубь материала напряжения в очагах фронта растут. Ближе к середине фронта они растут быстрее, чем на краях. Когда различие достигает некоторого предела, после которого разрушению в крайних очагах предшествует разрушение в очагах, расположенных вблизи центра, фронт, как и зона растрескивания, начинает сужаться. В результате перед тре-

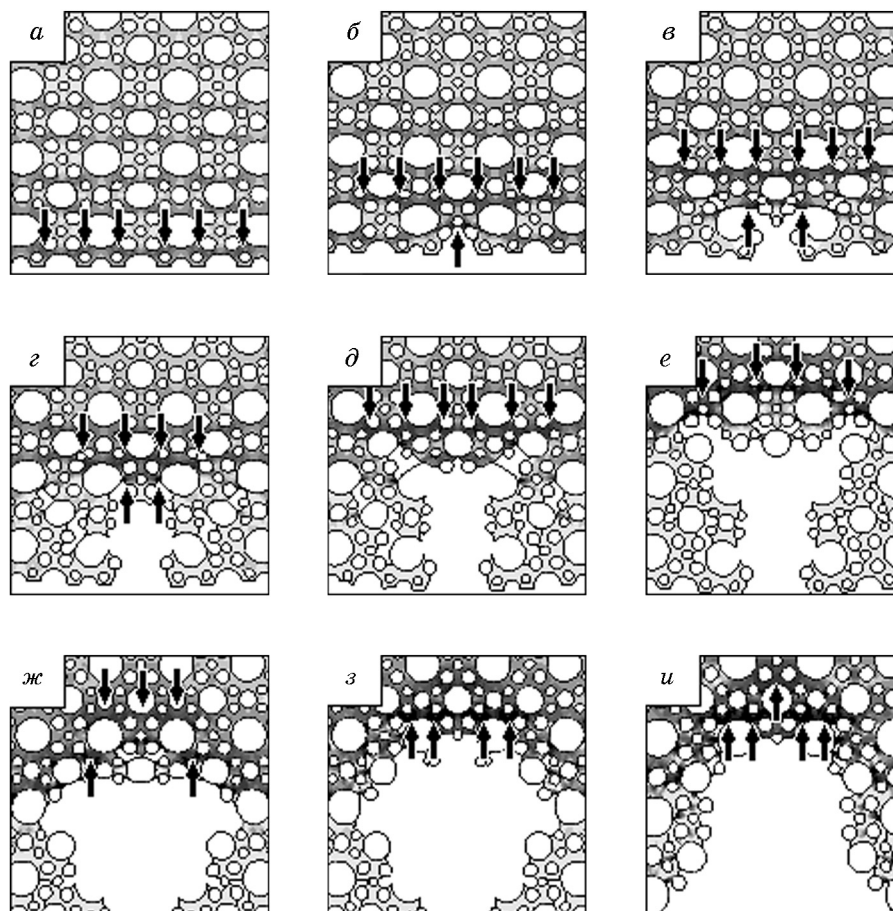


Рис. 9

щиной образуется клин из очагов высоких разрывающих напряжений (рис. 9, ж–и). После образования клина беспорядочное растрескивание прекращается, поскольку напряжения в клине преобладают над всеми окрестными напряжениями. Таким образом, возникает магистральная трещина, которая распространяется с образованием двух поверхностей без значительного рельефа и разрушения колец. Выкрашивание материала в зоне растрескивания, размеры которой даже в симметричной модели существенно больше среднего диаметра микросфер, приводит к образованию рельефа, что подтверждает сделанные выше предположения о природе рельефа, наблюдаемого на поверхностях разрушения.

Когда магистральная трещина формируется не у края выреза, а внутри выгнутой полосы, свободная граница значительно меньше, но и в этом случае перед первичным разрывом образуется фронт из очагов одинаковых опасных напряжений, что приводит к беспорядочному растрескиванию, которое является причиной разрушения микросфер и образования рельефа.

Заключение. Проведена серия экспериментов по разрушению одноосным сжатием цилиндрических сферопластовых образцов кругового сечения и бруска квадратного сечения с некоторыми видами концентраторов напряжений. Обнаружены эффекты, связанные с особенностями пористо-армированной структуры сферопласта, возникающие как на стадии общего упругого деформирования (локальное разрушение структуры вблизи концентратора), так и на стадии разрушения образцов (образование гладких поверхностей нормального разрыва с выпуклой в сторону торца рельефной зоной, примыкающей к краю концентратора, и рядом выгнутых рельефных полос, сгущающихся по мере приближения

к торцам образцов). На основе экспериментальных данных, микроскопического исследования структуры и проведенных численных экспериментов предложена гипотеза зарождения и развития трещины в сферопластовом цилиндрическом образце с концентратором.

Автор выражает благодарность М. П. Бондарь, А. Г. Демешкину, Я. Л. Лукьянову и П. А. Моссаковскому.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берлин А. А., Шутов Ф. А. Упрочненные газонаполненные пластмассы. М.: Химия, 1980.
2. Кржечковский П. Г. Об определении упругих и прочностных характеристик композитного материала на основе полых сферических включений // Пробл. прочности. 1979. № 3. С. 37–40.
3. Кржечковский П. Г. К механике разрушения сферопластиков // Пробл. прочности. 1982. № 11. С. 110–115.

*Поступила в редакцию 28/XII 2001 г.,
в окончательном варианте — 4/III 2002 г.*
