Разрушение материала при динамических нагрузках

**Введение**

Под разрушением понимают процесс зарождения и развития в металле трещин, приводящих к разделению его на части.

Разрушение происходит в результате или развития нескольких трещин, или слияния рядом расположенных трещин в одну магистральную трещину, по которой идет полное разрушение.

В инженерной практике часто встречаются случаи, когда нагрузка достаточно быстро изменяет свое направление или величину, т.е. зависят от времени. Такое нагружение называется динамическими вызывает значительные силы инерции в сооружении, которые приводят к появлению дополнительных (к статическим) напряжений и деформаций.

Известны случаи, когда инженерные конструкции, рассчитанные с большим запасом прочности на статическую нагрузку, разрушались под действием сравнительно небольших динамических сил. В связи с этим экспериментально и теоретически исследовано разрушение композиционного материала сферопластика с матрицей из полиэфирной смолы и наполнителя из стеклянных микросфер при статическом и динамическом нагружении. Ударное воздействие создавалось магнитным импульсным полем. Проведен анализ характера разрушения и его связи с параметрами воздействия и структурой материала. Предложен метод тестирования динамических свойств материала, основанный на концентрации инкубационного времени.

**1. Виды разрушений**

Разрушение - разделение тела на части при приложении механических нагрузок, иногда в сочетании с термическим, коррозионным и другими воздействиями. У большей части материалов разрушение развивается одновременно с упругой и пластической деформацией, и строгое разграничение этих процессов затруднительно.

Разрушение различают:

- начальное (образование и развитие трещин);

полное (разделение тела на две или больше частей);

хрупкое (без значительной пластической деформации);

пластичное или вязкое;

усталостное, длительное, замедленное и т.п.

Хрупкое и пластическое разрушение материалов

Разрушение металла в зависимости от степени развития пластических деформаций может быть хрупким или пластичным (вязким).

Под хрупким разрушением твердых тел понимают наступающее при соответствующих условиях необратимое нарушение сплошности вследствие распространения в теле макроскопических трещин, приводящего к тому, что тело распадается на части, причем образовавшиеся после разрушения части можно сложить так, чтобы составленное из них тело совпадало с исходным.

Хрупкое разрушение происходит путем отрыва (среза) (рисунок 1, схема а), получающегося тогда, когда расстояние между двумя смежными элементами тела, расположенными по направлению силового воздействия, увеличится в результате этого воздействия настолько, что силы сцепления между этими элементами окажутся погашенными; разрушению от отрыва соответствует вторая теория прочности (теория наибольших удлинений).

Благодаря отсутствию заметных остаточных деформаций, которые обусловлены свойствами пластичности или вязкости, телa, разрушившиеся путем хрупкого разрушения, в принципе, можно склеивать. Примером хрупкого может служить треснувшее или разбитое стекло. Многие металлические конструкции при возникновении и распространении в них макротрещин разрушаются по хрупкому типу, однако на берегах трещин - в приповерхностном слое малой толщины возникают пластические деформации (т.н. квазихрупкое разрушение).

Существующие теории хрупкого и квазихрупкого разрушения основаны на результатах классической теории упругости с малыми деформациями. При рассмотрении вопроса о распространении трещин, приводящих к хрупкому разрушению, обычно не затрагивается проблема начального возникновения трещин; зарождение трещин тесно связано с дислокациями, которые имеются внутри тела.

При теоретическом анализе проблемы прочности и распространения сильных разрывов перемещений в твердых деформируемых телах за основу берут универсальное уравнение термодинамики, выражающее закон сохранения энергии для тела конечных размеров. В общем случае это уравнение имеет вид:

dE + dU = dA(e) + dQ(e) + dQ, (1)

где Е - кинетическая энергия тела; U - полная внутренняя энергия.

В правой части (1) - общий приток энергии извне за счет работы объемных и поверхностных макроскопических сил dA(e), общий внешний приток тепла dQ(e) и внешний макроскопический приток энергии dQ за счет особых микроскопических механизмов: химического воздействия на поверхности тела, электромагнитного взаимодействия и т.д.

Пластичное разрушение происходит от сдвига (рисунок 1, схема в), получающегося тогда, когда будет превзойдено сопротивление взаимному сдвигу двух смежных элементов тела; разрушению от сдвига соответствует третья (теория наибольших касательных напряжений) или четвертая (энергетическая) теория прочности.

Один и тот же материал может разрушаться и хрупко и пластично в зависимости от условий, в которых протекает разрушение. Сталь и алюминий при обычной температуре, при правильной форме деталей (стержней) и в простых случаях действия сил (растяжение, сжатие, кручение или изгиб) оказывают меньшее сопротивление сдвигу, чем отрыву, и разрушаются пластично. Однако при пониженных температурах, при предварительной вытяжке или неправильной форме деталей, затрудняющих деформацию сдвига (при явлении концентрации напряжений), при более сложных напряженных состояниях, а также в результате других причин сопротивление сдвигу (пластическим деформациям) может оказаться повышенным и превзойти сопротивление отрыву, вследствие чего материал разрушится хрупко.

Разрушение от сдвига сопровождается большими деформациями, происходит в течение длительного времени и поэтому менее опасно; разрушение от отрыва сопровождается малыми деформациями, происходит внезапно и поэтому более опасно. Четкое разграничение двух возможных видов разрушения материала - хрупкого и пластичного - принадлежит советским ученым Н.Н. Давиденкову, Я.Б. Фридману, Г.В. Ужику и др.

Отличительная особенность хрупкого разрушения, характерного для бетона, керамики, стекла, природных камней и других строительных материалов, - это отсутствие заметной пластической деформации. При этом возникающие механические напряжения не успевают релаксировать и трещины, образующиеся в плоскости перпендикулярной действию напряжений, быстро развиваются.



Рисунок 1 - Виды разрушения: а - отрыв; б - срез; в-схема смещения атомных слоев при сдвиге

Хрупкому разрушению способствуют циклические нагрузки (вибрирование, частые удары и др.), при которых развивается усталость материалов, связанная с накоплением повреждений, возникновением микро-, а затем и макротрещин. Повышению хрупкости материалов способствуют также понижение температуры, увеличение скорости деформирования, наличие поверхностно-активной среды.

Усталостное разрушение материалов

Усталостью материалов (в частности металлов) называют явление разрушения в результате постепенного накопления в них повреждений, приводящих к возникновению усталостной трещины при многократном повторении нагружений.

Усталостное разрушение наблюдается при наличии одной из следующих двух особенностей приложения нагрузки:

) многократного приложения нагрузки одного знака, например, периодически изменяющейся от нуля до максимума (рис. 2, а);

) многократного повторения нагрузки, периодически изменяющейся не только по величине, но и по знаку (знакопеременной нагрузки), когда на выносливость материала одновременно оказывают влияние и повторность и переменность нагружения. При этом различают изменение нагрузки по симметричному циклу и изменение нагрузки несимметричное.

Динамические нагрузки

Динамическая нагрузка - нагрузка, характеризующаяся быстрым изменением во времени её значения, направления или точки приложения и вызывающая в элементах конструкции значительные силы инерции. Динамическое нагружение возникает при приложении быстро возрастающих усилий или в случае ускоренного движения исследуемого тела. Во всех этих случаях необходимо учитывать силы инерции и возникающее движение масс системы. Динамические нагрузки действуют непродолжительное время. Их возникновение связано в большинстве случаев с наличием значительных ускорений и сил инерции. Динамические нагрузки испытывают детали машин ударного действия, таких, как прессы, молоты и т.д. Детали кривошипно-шатунных механизмов также испытывают во время работы значительные динамические нагрузки от изменения величины и направления скоростей, то есть наличия ускорений.

Типы динамических нагрузок:

- равномерно изменяющаяся: направление и величина постоянно изменяются;



- Пульсирующая: направление и величина меняются нерегулярно;



- Ударная: направление или величина меняются эпизодически.



Хотя удар и относится к динамическим видам нагружения, в ряде случаев при расчете на удар силами инерции пренебрегают.

Разрушение материала при динамических нагрузках

Воздействие импульсного нагружения на гетерогенную газонаполненную среду исследовано недостаточно, хотя ударное сжатие пористых веществ широко используется в физике ударных волн. Интерес к таким материалам связан с необходимостью описания их поведения в мишенях инерциального термоядерного синтеза, в плавучих средствах глубоководных аппаратов и, кроме того, с потребностью создания новых материалов для демпфирования импульсных нагрузок. Большой практический интерес представляет материал, содержащий стеклянные или углеродные микросферы, внедренные в матрицу связующего - сферопластик. Такие материалы обладают хорошими конструкционными и диэлектрическими свойствами, оказываются достаточно прочными по отношению к ударным нагрузкам и имеют незначительный вес. Так, в работе измерена динамическая прочность материала, содержащего 42% стеклянных микросфер по объему или 27.7% по весу, с эпоксидным связующим, которая составила 0.24 ГПa. В результате армирования вязкоупругих связующих стеклянными микросферами значительно уменьшается плотность получаемого таким образом нового материала, а также улучшаются его демпфирующие свойства. Введение микросфер - удобный способ конструирования гетерогенных материалов с заданными свойствами.

В данной работе выполнено экспериментальное изучение деформационных и прочностных свойств, в частности статической и динамической трещиностойкости, нового материала - сферопластика с матрицей из полиэфирной смолы и армирующего наполнителя из стеклянных микросфер. Материал содержит 41% по объему стеклянных микросфер. Микроструктурный анализ композита выявил размеры сфер. В разных образцах размер сфер менялся в интервале от 6-60 до 12-60 μm со средним значением от 21 до 31 μm. Характеристика наполнителя приведена в табл. 1. По результатам взвешиваний определена удельная плотность сферопластика *р* = (0.79 ± 0.01) • 103 кг/м3.

Для оценки динамической трещиностойкости материала использовался новый метод тестирования, основанный на понятии инкубационного времени. Согласно этому подходу, основной параметр, ответственный за критические характеристики динамического разрушения, - инкубационное время материала т. Оно определяется индивидуально для каждого материала и может быть получено из опытов на образцах с макротрещинами. Образцы имели форму пластин размером 120 х120 х 9-16 мм с серединным краевым сквозным пазом шириной 2.2 мм и длиной 60 мм, а также симметричным по отношению к его берегам надрезом в вершине паза глубиной 1.5 мм и шириной 0.18 мм. Схема нагружения и вид образца приведены на рисунке 3. При протекании тока по шинам нагрузочного устройства на них действует магнитное давление, передаваемое на берега паза. Это давление равномерно распределено по длине образца и однозначно связано с протекаемым током. Импульс тока создается с помощью магнито- импульсной установки ξ= 2 и измеряется поясом Роговского на осциллографе TDS-754C. Форма и длительность импульса давления определяется параметрами установки, а на амплитуду влияют и параметры нагрузочного устройства. Давление определяется по формуле p(t) = Psin2(π∙t/ T), гдеT - длительность импульса. Амплитуда импульсаP для случая плоских шин ширинойbопределяется соотношениемP = (µ0/2) (1/b)2*,* где I - амплитуда тока, µ = 4 π • 10-7 H/м. Магнитоимпульсная установка позволяет генерировать в нагрузке импульс тока до 1 MA микросекундной длительности и формировать управляемые импульсные нагрузки с амплитудами порядка 1 ГПa и длительностями порядка > 1µs.

деформационный сферопластик динамический нагрузка



Принципиальная схема установки и схема нагружения образца. *От*, *L0* - накопительная емкость и собственная индуктивность генератора импульсных токов; *Q* - высоковольтный коммутатор; *Rv* - нелинейное сопротивление; *1* - исследуемый образец. Размеры приведены в mm.

Эксперименты проводились при двух длительностях импульса нагружения: 2.76 и 4.40 *л*s. На рисунке 4 приведены экспериментальные данные по зависимости длины проросшей в образце трещины от амплитуды воздействующего импульса. Пороговая амплитуда определялась путем экстраполяции длины проросшей трещины к нулю и составила для указанных выше длительностей 1.68 ± 0.5 и 11.2 ± 0.4MПa соответственно.



Экспериментальные данные по разрушению образцов из сферопластика одиночными импульсами длительностью 4.40 *(1)* и 2.76 *µ*s (2).

Результаты и их обсуждение

Согласно примененному подходу, две материальные константы *KIc* и *τ* описывают статическую и динамическую трещиностойкость материала на данном масштабном уровне. Критические параметры внешней нагрузки, а также скоростные зависимости вязкости разрушения для данной конструкции, нагруженной симметрично относительно линии трещины, могут быть найдены при помощи критерия инкубационного времени

KI(t') dt ≤τ∙KIc, (1)

где *KI(t)* - коэффициент интенсивности напряжений как функция времени,τ - инкубационное время.

Коэффициент интенсивности напряжений определялся при помощи расчета. Для этого была рассмотрена задача о полубесконечной трещине, берега которой нагружались импульсами давления заданной формы. В случае приложения к берегам разреза единичного мгновенного импульса коэффициент интенсивностиKI δ(t) *=a* /2/,где *a = 4*с2. При воздействии импульса произвольной формы значение коэффициента интенсивности напряжений определяется при помощи свертки по времени приложенной нагрузки с величиной KI δ(t).Таким образом, величина коэффициента интенсивности в эксперименте определяется из соотношения

 (2)

Это выражение будет определять значение коэффициента интенсивности до тех пор, пока применима задача о полубесконечной трещине, т.е. пока отраженные от границ волны не достигнут кончика разреза. Для использованных при испытаниях моделей следует ограничиться рассмотрением времен *t <* 27.3*л*s, т.е. временем пробега берега разреза продольной волной. Значение коэффициента интенсивности напряжений при рассмотренных в эксперименте продолжительностях показано на рисунке 5. Величина *KI(t)* растет, достигает максимума и затем медленно убывает. Коэффициент интенсивности напряжений достигает максимума в момент времени несколько больший, чем у приложенной нагрузки (равный *T /* 2).

Для определения инкубационного времени используются полученные из эксперимента параметры - пороговая амплитуда импульса *P* и его продолжительность T. Эти величины позволяют определить при помощи (2) значение коэффициента интенсивности в пороговом импульсе. Рассматривается пороговый импульс, т.е. такой разрушающий импульс, уменьшение амплитуды которого уже не приводит к разрушению. Следовательно, максимальное значение интеграла в (1) даст в точности правую часть неравенства. Из этого равенства и определяется инкубационное время *τ*. Найденное таким способом для исследованного типа сферопластика инкубационное время τ составило 3.93±0.25 *лs* при нагрузке продолжительностью *T* = 2.76 *л*s и 3.94 ± 0.3 *л*s для импульса длительностью *T = 4.*40 *л* s. Таким образом, инкубационное время *τ =* 3.93 *л*s.

Зависимость амплитуды порогового импульса от продолжительности воздействия приведена на рисунке 5. Кружки - эксперимент, сплошная кривая - величина пороговой амплитуды, вычисленная при помощи критерия инкубационного времени.



Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от времени. Сплошная линия - длительность воздействия 4.40лs, штриховая-2.76 лs



Зависимость от продолжительности воздействия. Кружки - динамическая вязкость разрушения на длительностях, реализованных в эксперименте

Пороговая амплитуда, определенная при помощи критерия критического коэффициента интенсивности *(KI(t) < KIc*), имеет более низкие значения (штриховая кривая на рис. 6). При длительности импульса *T = 2.*76 лs разрушающая амплитуда, определенная при помощи классического критерия критического коэффициента интенсивности, составляет 64% от наблюдаемой в эксперименте, а при продолжительности воздействия *T = 4.*40 л s - 76%. Динамическую вязкость разрушения, т.е. значение коэффициента интенсивности в момент разрушения *(KId = KI*(t), где *t*\* - момент начала разрушения) можно определить вычислением при помощи критерия (1). При этом из (1) находится момент начала разрушения *t*\*, а затем из (2) находится значение коэффициента интенсивности в этот момент. Величина динамической вязкости разрушения в экспериментах при разрушении пороговыми импульсами составила *KId =* 0.61 *KIc* при продолжительности воздействия *T =* 2.76 πs и *KId =* 0.67*KIc* для импульса длительностью *T = 4.*40 /π s. Момент разрушения *t*\* при этом составил 5.4 и 6.1πs соответственно. Разрушение в обоих случаях происходило с задержкой, т.е. через некоторое время после достижения коэффициентом интенсивности напряжений своего максимального значения.

Таблица 2 - Влияние размера наполнителя на длину итоговой трещины

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Образец | Длина трещины, mm | | Размер наполнителя, / m |
|  | Первая | Вторая |  |
| 1 | 24 | 27 | 48.5 |
| 3 | 9.6 | 11.9 | 35.1 |
| 4 | 7 | 11 | 21.1 |
| 6 | 9 | 11.2 | 30.5 |

Особенности деформации и последующего разрушения разнообразных гетерогенных материалов определяются общей причиной: на границах и в стыках между гомогенными структурными элементами деформируемого материала возникают источники упругих напряжений. Их возникновение обусловлено сплошным сопряжением элементов с различными свойствами. В поле приложенных макронапряжений такие элементы испытывают различные деформации и могут при этом сохранять сложное сопряжение, лишь накапливая избыточные над средними упругие деформации.

Разрушение сферопластика происходило в основном между стеклянными микросферами. Трещина распространялась по связующему, огибая сферы. Лишь в отдельных случаях она пересекала сферу.

От надреза в образцах, как правило, распространяется по две трещины, расходящиеся в среднем под некоторым углом (8-12°). На расстоянии 2 или 4 mm от начала разрушения в разных образцах трещина может скачкообразно изменять направление своего движения, отклоняясь от предыдущего на угол 8-10°, затем примерно на том же расстоянии она опять может вернуться к прежнему направлению движения. Расстояния, на которые проскакивают трещины, меняются от 7 до 27 mm в зависимости от интенсивности удара. Результаты фрактографического исследования сведены в табл. 2. Как видно из данных этой таблицы, чем меньше радиус сфер, тем меньше итоговая длина трещины. Это можно объяснить увеличением количества барьеров на пути распространения трещины.

Сравнение характере разрушения статически и динамически нагруженного материала выявило существенно большее количество разрушенных микросфер на поверхности статически деформированного материала, чем при импульсном нагружении.

**Заключение**

Под разрушением понимают процесс зарождения и развития в металле трещин, приводящих к разделению его на части. Разрушение может быть хрупким и вязким.

Динамическое нагружение возникает при приложении быстро возрастающих усилий или в случае ускоренного движения исследуемого тела.

Для оценки динамических прочностных свойств сферопластика применен новый метод тестирования, основанный на концепции инкубационного времени.

Полученные значения пороговых амплитуд заметно отличаются от значений, прогнозируемых по классическому критерию критического коэффициента интенсивности, а значения динамической вязкости разрушения оказываются существенно меньше, чем *KIc.*

Показано, что разрушение в случае пороговых импульсов реализуется в кончике трещины на стадии уменьшения коэффициента интенсивности напряжения.