

УДК 539.3

ОБ ИЗЛОМЕ ТРАЕКТОРИЙ ТРЕЩИН ПРИ ОБОБЩЕННОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

А. Г. Демешкин, В. М. Корнев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mail: kornev@hydro.nsc.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований трехточечного несимметричного изгиба балок, изготовленных из материалов с существенно различающимися структурными, прочностными и деформационными характеристиками. Выявлено влияние разрушений разного типа на формирование отростков трещиноподобных дефектов в условиях обобщенного напряженного состояния. Для оргстекла и мелкозернистого бетона, имеющих квазихрупкий и хрупкий типы разрушения соответственно, получены предельные кривые прочности типа кривых Кулона — Мора. Для указанных материалов описаны зависимости углов излома траекторий трещин от напряженного состояния при трехточечном изгибе.

Ключевые слова: хрупкое и вязкое разрушения, ветвление и излом трещин, критический коэффициент интенсивности напряжений.

Введение. Количество работ, посвященных исследованию влияния характеристик материала на формирование отростков трещин и их ветвление, незначительно (см., например, [1–3]). При этом под характеристиками материала, как правило, понимаются как исходная (до начала стадии неупругого деформирования), так и преобразованная (по окончании стадии неупругого деформирования) структура материала.

1. О ветвлении трещин в реальных материалах. Для получения предварительных оценок роста и ветвления трещиноподобных дефектов в реальных материалах в условиях обобщенного напряженного состояния проведены эксперименты по трехточечному несимметричному изгибу балок, изготовленных из материалов, существенно различающихся по структурным, прочностным и деформационным характеристикам: сферопласта, оргстекла, алюминиевого сплава Д16Т, стали Ст. 3. В балках выполнялся пропил, имитирующий трещину, шириной 1,5 мм и глубиной l (в миллиметрах). Схема нагружения образцов, когда сосредоточенная сила P приложена в центре, а сжимающие напряжения $\sigma < 0$ — по торцам образцов, приведена на рис. 1. При этом длина образцов между опорами $L = 100$ мм, длина краевой трещины-пропила для балок из сферопласта, оргстекла, алюминиевого сплава Д16Т $l = 7,5$ мм, для стальных образцов $l = 6,8$ мм, расстояние от точки приложения сосредоточенной силы до трещины $s = 30$ мм, высота образцов из сферопласта, оргстекла и алюминиевого сплава Д16Т $b = 20$ мм, высота образцов из стали $b = 17$ мм, толщина всех образцов $t \approx 10$ мм, α — угол излома траектории трещины. В табл. 1 приведены жесткостные, прочностные и деформационные характеристики сферопласта, оргстекла, алюминиевого сплава Д16Т, стали Ст. 3, полученные авторами данной работы в предварительных экспериментах, причем характеристики для алюминиевого сплава Д16Т и стали Ст. 3 согласуются со справочными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 07-01-00163) и в рамках Интеграционной программы Президиума РАН (проект № 11.16).

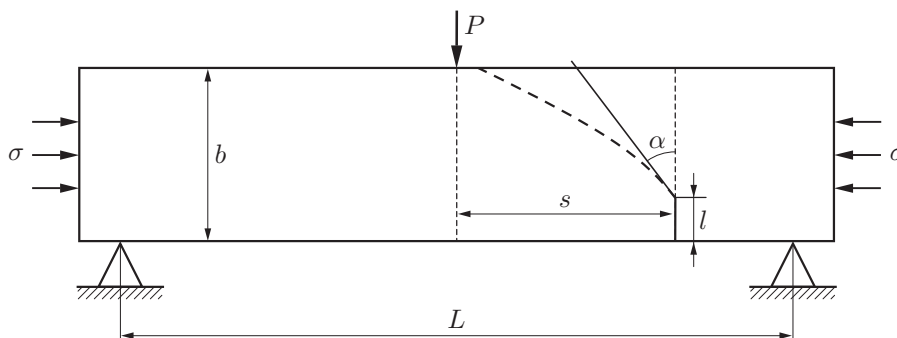


Рис. 1. Схема нагружения образцов:

сплошная линия — касательная, штриховая — траектория трещины

Таблица 1

Характеристики материалов, из которых выполнены образцы

Материал	E , МПа	σ_{02} , МПа	σ^* , МПа	ν	ε^* , %
Сферопласт	2400	18 ÷ 20	18 ÷ 20	0,32	0,8 ÷ 1,0
Оргстекло	3000	20 ÷ 25	40 ÷ 45	0,35	2,5 ÷ 3,0
Сплав Д16Т	$7 \cdot 10^4$	400 ÷ 450	610	0,34	10 ÷ 12
Сталь Ст. 3	$20 \cdot 10^4$	220	400 ÷ 450	0,28	≈ 25

Примечание. Для характеристик материала приняты следующие обозначения: E — модуль Юнга, σ_{02} — предел упругости, σ^* — предельные напряжения при разрыве, ν — коэффициент Пуассона, ε^* — предельное относительное удлинение, при котором происходит разрыв.

Сферопласт является типичным хрупким материалом, оргстекло — квазихрупкий материал, алюминиевый сплав Д16Т занимает промежуточное положение между квазихрупким и квазивязким материалами, сталь Ст. 3 — квазивязкий материал, модифицированная сталь Ст. 3, судя по характеру разрушения, квазихрупкий материал (для выбранной схемы разрушения).

Эксперименты по трехточечному изгибу проводились на образцах, изготовленных из указанных материалов и из модифицированной стали Ст. 3. Образец из модифицированной стали Ст. 3 изготавливался следующим образом: большой образец из стали Ст. 3 в состоянии поставки, без каких-либо повреждений, подвергался растяжению, при этом деформация достигала 22 %; затем из этого образца изготавливалась балка, ось которой совпадала с направлением растяжения; в балке выполнялся пропил, имитирующий трещину.

На рис. 2 приведены фотографии пяти образцов ($j = 1, 2, \dots, 5$), разрушенных по предложенной схеме нагружения (см. рис. 1). Видно, что после испытания образцы из сферопласта и оргстекла распались на фрагменты, а образцы из алюминия Д16Т, стали Ст. 3 и модифицированной стали Ст. 3 сохранили относительную целостность. Трещиноподобные дефекты в образцах из указанных материалов развиваются путем распространения трещин — отростков от этих дефектов — при несимметричном трехточечном изгибе, причем распространение отростков существенно зависит от характеристик материала. При неупругом деформировании квазивязкий материал сталь Ст. 3 после модификации становится квазихрупким материалом, т. е. после существенного неупругого деформирования сталь Ст. 3 охрупчивается [4]. Следует отметить, что характер разрушения образцов из разных материалов различается:

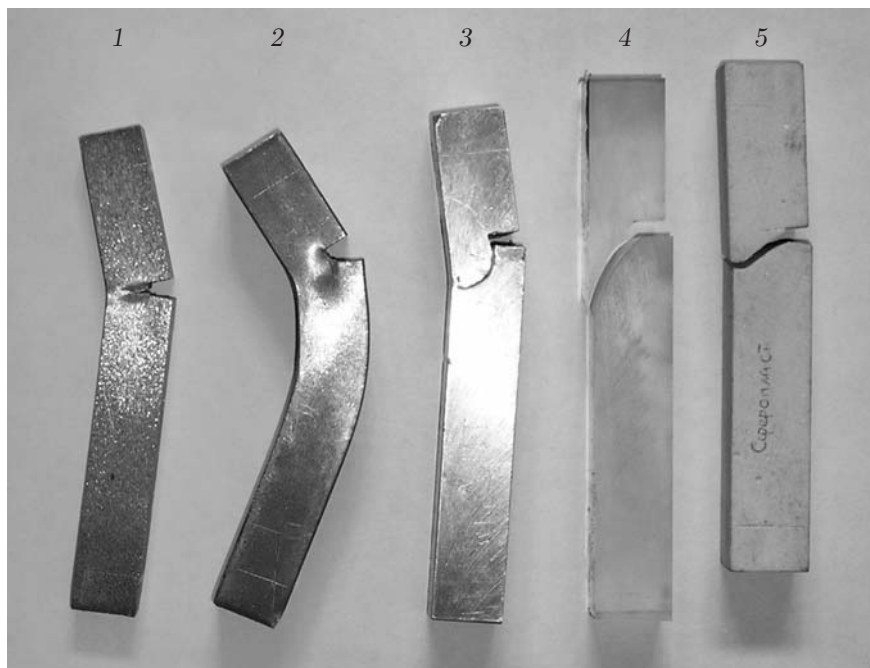


Рис. 2. Фотографии пяти разрушенных образцов:

1 — из модифицированной стали Ст. 3; 2 — из стали Ст. 3; 3 — из алюминиевого сплава Д16Т; 4 — из оргстекла; 5 — из сферопласта

1) образец из оргстекла разрушается квазихрупко, образец из алюминиевого сплава Д16Т имеет промежуточный между квазихрупким и квазивязким тип разрушения, при этом кривизны \varkappa_j ($j = 4, 3$) отрошков трещиноподобных дефектов имеют разные знаки: если $\varkappa_4 < 0$, то $\varkappa_3 > 0$;

2) образец из стали Ст. 3 разрушается квазивязко, образец из модифицированной стали Ст. 3 имеет квазихрупкое разрушение: если для стали Ст. 3 кривизна отростка трещиноподобного дефекта отлична от нуля ($\varkappa_2 \neq 0$), то для модифицированной стали Ст. 3 кривизна отростка трещиноподобного дефекта близка к нулевой ($\varkappa_1 \approx 0$), причем величина угла между отросками на образцах из этих сталей близка к $\pi/2$;

3) образцы 3–5, имеющие хрупкий, квазихрупкий и промежуточный между квазихрупким и квазивязким типы разрушения, отличаются от образцов 1, 2 тем, что на двух последних образцах в зоне предразрушения появляется существенная утяжка, хотя образцы 1, 2 разрушаются квазивязко и квазихрупко.

Критерии разрушения, предложенные в работах [1, 2], качественно согласуются с результатами проведенных натурных экспериментов на макрообразцах, когда реализуется первая мода разрушения. Для хрупких и квазихрупких материалов целесообразно использовать гипотезу Эрдогана — Си [5].

2. Излом трещин при трехточечном изгибе. Рассмотрим более подробно ветвление и излом траекторий трещин при контролируемом совместном воздействии растягивающих и сдвиговых напряжений на квазихрупкие и хрупкие материалы. Ветвление разломов и возникновение новых разломов при землетрясениях исследовались в работе [6]. По характеру разрушения горные породы можно отнести к хрупким или квазихрупким материалам. Разрушение горных пород в условиях обобщенного напряженного состояния зависит от вида нагружения и структуры пород [7, 8]. К числу квазихрупких и хрупких материалов относятся полиметилметакрилат (оргстекло) и мелкозернистый бетон. В экспериментах проводился трехточечный изгиб балок при дополнительном нагружении

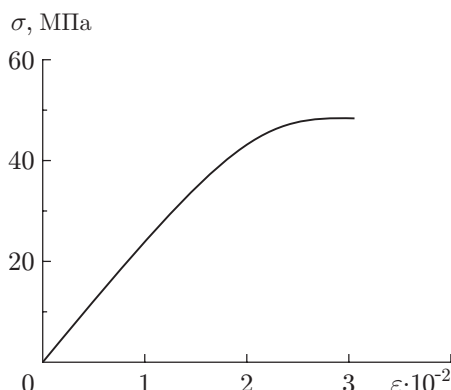
Рис. 3. Зависимость $\sigma(\varepsilon)$ при растяжении образца из оргстекла

Таблица 2

Экспериментальная зависимость $\sigma(\varepsilon)$ при растяжении образца из оргстекла			
$\sigma(\varepsilon)$, МПа	$\varepsilon \cdot 10^{-2}$	$\sigma(\varepsilon)$, МПа	$\varepsilon \cdot 10^{-2}$
0	0	40,0	1,76
10,0	0,40	43,2	2,08
20,0	0,82	45,4	2,28
25,0	1,04	48,0	2,55
30,0	1,24	48,1	2,80
35,0	1,42	47,9	3,00

Таблица 3

Экспериментальная зависимость $\sigma(\tau)$ для образца из оргстекла			
σ , МПа	τ , МПа	σ , МПа	τ , МПа
48	0	-26	76
-124	0	-36	78
0	52	-57	81
-14	67		

торцов сжатием. Для каждого из указанных материалов построена кривая прочности типа кривой Кулона — Мора [8] и определены величины углов ветвления трещин (углов α излома траектории трещины (см. рис. 1)) при разрушении, когда осуществляется контролируемое нагружение при изменении параметра s , причем рассматриваются два случая: $\sigma = 0$ и $\sigma \neq 0$.

2.1. *Эксперименты с образцами из полиметилметакрилата (оргстекла)*. Сначала построим кривую прочности типа кривой Кулона — Мора для оргстекла. Образцы вырезались из плиты оргстекла толщиной 25 мм. На первом этапе определялись прочность на растяжение (48 МПа) и прочность кубика из этого материала на сжатие (-124 МПа). Экспериментально полученная зависимость нормального напряжения от деформации образца $\sigma(\varepsilon)$ представлена на рис. 3 и в табл. 2. Заметим, что в данном случае модуль упругости при растяжении $E = 2600$ МПа несколько отличается от значения этого параметра в случае, когда образцы изготавливались из листа (см. п. 1).

Для построения кривой прочности типа кривой Кулона — Мора на плоскости (σ, τ) испытывались на срез образцы сечением 10×10 мм и длиной 25 мм (σ, τ — нормальные и сдвиговые напряжения). Срез образца проходил по сечению 10×10 мм между двумя опорами, расположенными на расстоянии 10 мм друг от друга. Следует отметить, что при испытании только на срез образец хрупко разрушается на фрагменты, сжатый же по торцам образец деформируется пластически без разделения на части (рис. 4). В табл. 3 представлены экспериментальные данные, а на рис. 5 — кривая прочности типа кривой Кулона — Мора, построенная по экспериментальным точкам.

Далее рассмотрим испытания на трехточечный изгиб балки из оргстекла с трещиной. При испытании балок с заданной глубиной краевой трещины l определялась зависимость величины угла излома траектории трещины α от расстояния s до центра изгиба образца

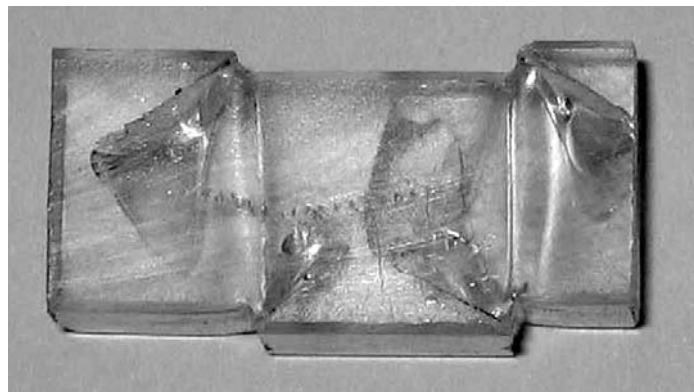


Рис. 4. Фотография разрушенного образца из оргстекла в эксперименте на срез со сжатием

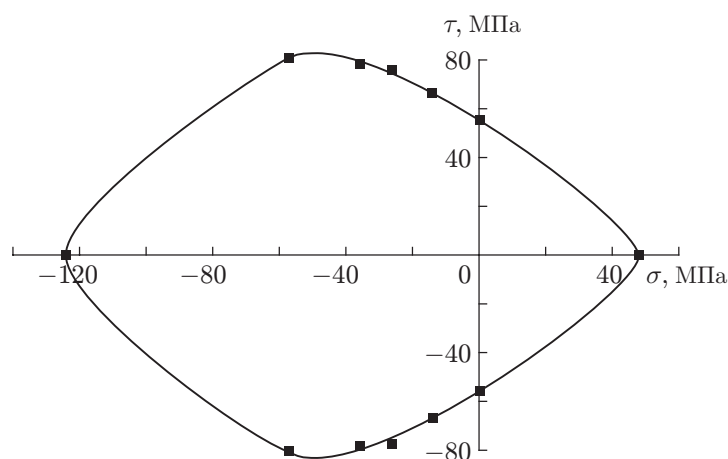


Рис. 5. Кривая прочности типа кривой Кулона — Мора для оргстекла

(ширина пропила, имитирующего трещину, равна 1 мм), причем размеры образцов соответствовали ГОСТу [9]: $L = 100$ мм, $b = 25$ мм, $l = 11,3$ мм, $t = 12,5$ мм. Зависимость $\alpha(s)$ определялась для двух видов нагружения: $\sigma = 0$, $\sigma \neq 0$ (см. рис. 1). Предварительное сжатие балки со стороны торцов соответствовало значению $\sigma = -1,25$ МПа. Угол α представляет собой угол между касательной, проведенной из кончика трещины к ее траектории, и первоначальным направлением трещины. Результаты испытаний на трехточечный изгиб балки из оргстекла с трещиной приведены в табл. 4.

Для каждого типа нагружения испытывалось не менее трех балок. Разброс экспериментальных данных не превышал 15 %. Анализ результатов проведенных экспериментов позволяет сделать следующие выводы: 1) при увеличении расстояния s от центра изгиба до трещины угол наклона траектории трещины α и нагрузка разрушения P также увеличиваются; 2) при догрузке каждого торца балки сжимающими напряжениями $\sigma = -1,25$ МПа увеличивается нагрузка разрушения P , а при $s > 20$ мм существенно увеличивается угол наклона траектории трещины α .

Используя полученные экспериментальные данные, определим критический коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_{Ic} по ГОСТу [9]:

$$K_{Ic} = PY_1/(t\sqrt{b}) = 0,53 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}, \quad (1)$$

где $Y_1 = 2,29$ — поправочная функция для $l/b = 0,45$. Полученное значение критического

Таблица 4

Экспериментальная зависимость
величины угла излома траектории трещины α и разрушающей нагрузки P
от расстояния s от трещины до центра изгиба для образцов из оргстекла

s , мм	$\sigma = 0$		$\sigma = -1,25$ МПа	
	P , Н	α , град	P , Н	α , град
0	470	0	529	0
10	588	13	637	13
20	706	20	882	20
30	1039	25	1078	37
35	1509	40	—	—

Таблица 5

Экспериментальная зависимость $\sigma(\tau)$ для образца из мелкозернистого бетона

Цемент М 400		“Портландцемент”	
σ , МПа	τ , МПа	σ , МПа	τ , МПа
1,1	0	1,3	0
-10,7	0	-14,5	0
0	2,13	0	2,3
-2,6	4,60	-2,2	5,8
-5,4	6,30	-3,8	6,4
-7,5	5,20	-5,1	7,6
—	—	-8,0	7,0

КИН в соотношении (1) отличается от значения КИН, приведенного в справочнике [10], где $K_{Ic} \approx 1$ МПа \cdot м^{1/2}.

2.2. *Эксперименты с образцами из мелкозернистого бетона.* При построении кривой прочности типа кривой Кулона — Мора для исследования прочности образцов из мелкозернистого бетона использовался цемент двух марок: М 400 и “Портландцемент”. Образцы изготавливались из смеси песка и цемента в соотношении 2 : 1, размер фракции песка не превышал 2 мм. Время отвердевания образцов при температуре 20–22 °С составляло 30 дней. Определялись прочности на растяжение и сжатие. При растяжении образцы имели форму лопатки длиной 40 мм с сечением в срединной части 20 × 51 мм, при сжатии — форму куба с размерами 52 × 52 × 52 мм. При растяжении образцы упруго деформировались вплоть до разрушения (модуль упругости при растяжении $E = 400$ МПа). Для получения предельной кривой прочности типа кривой Кулона — Мора проведены эксперименты на срез образцов как предварительно сжатых, так и без предварительного сжатия. На срез испытывались образцы длиной 75 мм с сечением 25 × 25 мм. Образец, предварительно сжатый по длине, помещался между двумя жесткими опорами, находящимися на расстоянии 25 мм друг от друга. Срез проходил по сечению 25 × 25 мм. Значение сжимающей нагрузки измерялось динамометром. В каждой серии экспериментов испытывалось три-пять образцов. Максимальное отклонение экспериментальных данных от средних значений, приведенных в табл. 5, не превышало 14 %.

На рис. 6 на плоскости (σ, τ) показаны кривые прочности типа кривых Кулона — Мора, описывающие предельные напряженные состояния мелкозернистого бетона для двух марок цемента.

Для испытания на трехточечный изгиб балки из мелкозернистого бетона с трещиной образцы изготавливались на основе “Портландцемента”. При испытании балок с заданной

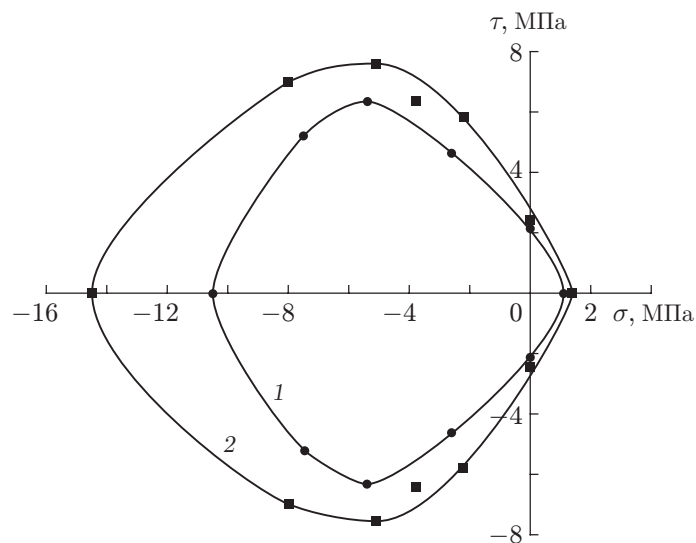


Рис. 6. Кривые прочности типа кривых Кулона — Мора для мелкозернистого бетона:

1 — образцы, изготовленные с использованием цемента М 400; 2 — образцы, изготовленные с использованием “Портландцемента”

Таблица 6

Экспериментальная зависимость величины угла излома траектории трещины α и разрушающей нагрузки P от расстояния s от трещины до центра изгиба для образцов из мелкозернистого бетона

s , мм	$\sigma = 0$		$\sigma = -1,25$ МПа	
	P , Н	α , град	P , Н	α , град
0	235	0	519	0
20	284	14	588	24
30	353	27	637	32
50	412	32	676	40
60	539	36	706	42

глубиной краевой трещины l определялась зависимость величины угла излома траектории трещины α от расстояния s до центра изгиба образца (ширина пропила, имитирующего трещину, составляла 1 мм), размеры образцов соответствовали ГОСТу [9]: $L = 200$ мм, $b = 50$ мм, $l = 22,5$ мм, $t = 25$ мм. Зависимость угла α от расстояния s определялась для двух видов нагружения: $\sigma = 0$, $\sigma \neq 0$ (см. рис. 1). Предварительное сжатие балки со стороны торцов соответствовало значению $\sigma = -1,25$ МПа. Для каждого образца проводилось не менее трех испытаний, результаты которых приведены в табл. 6.

Выводы о взаимосвязи параметров s , α , P , сделанные на основе анализа результатов проведенных экспериментов, практически не отличаются от аналогичных выводов для образцов из оргстекла.

Проведенные эксперименты позволяют определить критические КИН в соответствии с ГОСТом [9], что и сделано в работе [11], в которой также установлено, что экспериментальные и расчетные критические КИН удовлетворительно согласуются.

3. Обсуждение результатов. Проанализируем результаты проведенных экспериментов и сравним их с данными из справочников [7, 8]. Кривые прочности типа кривых Кулона — Мора на плоскости (σ, τ) приближенно можно описать, используя принадле-

Таблица 7

Безразмерные константы τ_0/σ_+ , $|\sigma_-|/\sigma_+$, $\operatorname{tg} \gamma$ для различных материалов

Материал	τ_0/σ_+	$ \sigma_- /\sigma_+$	$\operatorname{tg} \gamma$
Оргстекло	1,08	2,58	0,76
Цемент М 400	1,94	9,70	1,12
“Портландцемент”	1,77	11,20	1,26
Плотнупакованный слой атомов	1,02	0,82	1,03

жащие этой кривой точки $(\sigma, \tau) = (\sigma_+, 0)$, $(\sigma, \tau) = (\sigma_-, 0)$, $(\sigma, \tau) = (0, \pm\tau_0)$ и параметр $\operatorname{tg} \gamma$ (σ_+ , σ_- — пределы прочности при растяжении и сжатии, τ_0 — сопротивление чистому сдвигу, γ — угол “трения”, причем все эти параметры получены в отсутствие гидростатического давления). Для рассматриваемых материалов сформируем безразмерные константы τ_0/σ_+ , $|\sigma_-|/\sigma_+$, первая из которых при разрушении характеризует хрупкость материала (если $\tau_0/\sigma_+ \approx 1$) либо его вязкость (если $\tau_0/\sigma_+ \ll 1$), а вторая — сопротивление разрушению при растяжении и сжатии. Эти константы позволяют определять углы ветвления трещин и углы излома траекторий трещин [1, 2].

Безразмерные константы для оргстекла, мелкозернистого бетона на основе цемента М 400 и “Портландцемента”, а также для плотнупакованного слоя атомов (силы взаимодействия атомов определялись с использованием потенциала Морса [12]) приведены в табл. 7. Представленные в табл. 7 материалы разрушаются хрупко, так как для оргстекла и плотнупакованного слоя атомов $\tau_0/\sigma_+ \approx 1$, для мелкозернистых бетонов $\tau_0/\sigma_+ > 1$. Заметим, что в табл. 7 для каждого материала приведено только одно значение параметра $\operatorname{tg} \gamma$ для случая $\sigma = 0$ (при $\sigma \neq 0$ этот параметр существенно меняется). Изученные образцы бетонов слабо сопротивляются растяжению. В справочниках [7, 8] приведены параметры кривых разрушения только для случая сжатия, т. е. для второго и третьего квадрантов на плоскости (σ, τ) . В отличие от данных [7, 8] в настоящей работе приведены предельные кривые разрушения в четырех квадрантах на плоскости (σ, τ) , что имеет большое значение для отыскания углов ветвления и излома трещин [1, 2]. Значение параметра $\operatorname{tg} \gamma$ для мелкозернистых бетонов хорошо согласуется со значением аналогичного параметра для песчаника (см. табл. 11-4 в [7]).

Заключение. С использованием результатов проведенных экспериментов для оргстекла и мелкозернистого бетона построены предельные кривые прочности типа кривых Кулона — Мора. По безразмерным параметрам для этих кривых установлено, что разрушение оргстекла и мелкозернистого бетона происходит по квазихрупкому и хрупкому типам соответственно. Для мелкозернистых бетонов значение угла “трения” практически совпадает со значением аналогичного параметра для песчаников, поэтому в первом приближении поведение песчаников при разрушении можно моделировать, используя мелкозернистый бетон. Обработка и сравнение с теоретическими предположениями экспериментально полученных зависимостей углов излома траекторий трещин от параметров напряженного состояния при трехточечном изгибе балок из оргстекла и мелкозернистого бетона не проведены, поскольку простая теория, предложенная в [1, 2], справедлива только для первой моды разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Корнев В. М.** Разрушение хрупких и вязких кристаллов. Силовой и деформационный критерии // Прикл. математика и механика. 2003. Т. 67, вып. 6. С. 1029–1041.
2. **Корнев В. М.** Ветвление и излом траекторий трещин отрыва в поликристаллах // Физ. мезомеханика. 2003. Т. 6, № 5. С. 37–46.

3. **Leblond J.-B., Frelat J.** Crack kinking from an initially closed crack // Intern. J. Solids Struct. 2000. V. 37. P. 1595–1614.
4. **Шмит-Томас К. Г.** Металловедение для машиностроения: Справ. М.: Metallurgia, 1995.
5. **Эрдоган Ф., Сих Г. С.** О развитии трещин в пластинах под действием продольной и поперечной нагрузок // Тр. Амер. о-ва инж.-механиков. Сер. Д. Техн. механика. 1963. Т. 85, № 4. С. 49–59.
6. **Fliss S., Bhat H. S., Dmowska R., Rice J. R.** Fault branching and rupture directivity // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. B06312.
7. **Хендин Д.** Прочность и пластичность: Справ. физ. констант горных пород. М.: Мир, 1969. С. 211–272.
8. **Каталог** механических свойств горных пород. Л.: Всесоюз. науч.-исслед. маркшейдер. ин-т, 1972.
9. **ГОСТ 25.506-85.** Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости при статическом нагружении. Введ. 27.03.85 г.
10. **Ковчик С. Е.** Механика разрушения и прочность материалов: В 4 т. Т. 3. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения / С. Е. Ковчик, Е. М. Морозов. Киев: Наук. думка, 1988.
11. **Корнев В. М., Демешкин А. Г.** Критический коэффициент интенсивности напряжений при изгибе бетонных балок с поперечной трещиной // Изв. вузов. Стр-во. 2007. № 8. С. 10–19.
12. **Астапов Н. С., Корнев В. М.** Область устойчивости плотноупакованного слоя атомов // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 1. С. 161–172.

*Поступила в редакцию 11/І 2008 г.,
в окончательном варианте — 5/V 2008 г.*
