камерными запасами блока и сочетает в себе признаки, как класса камерных систем разработки (с магазинированием), так и класса с обрушением руды и вмещающих пород (одностадийность, как в системах подэтажного обрушения).

Литература

1. *Опыт* применения систем с гибким разделяющим перекрытием при разработке месторождений руд цветных металлов. – Фрунзе: Илим, 1981. – 35 с.

2. *Гринев В.Г., Зубков В.П.* Разработка рудных месторождений с применением гибких перекрытий. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1991. – 118 с.

УДК 539.4

Нелокальные критерии разрушения. Критерий фиктивной трещины

С.В. Сукнёв

Рассмотрены особенности применения нелокальных критериев, основанных на моделировании зоны предразрушения, в задаче о прочности твёрдого тела, содержащего концентратор напряжений, при растяжении и сжатии. Показаны преимущества и ограничения использования критерия фиктивной трещины.

Considered are some specific features of application for nonlocal criteria based on fracture process zone modeling in a strength problem of solid body containing a stress concentrator under tension and compression. Advantages and restrictions for using the fictitious crack criterion are shown.

Ключевые слова: прочность, твердое тело, критерий разрушения, фиктивная трещина, критическое напряжение.

Введение

В предыдущих работах [1, 2] были рассмотрены возможности применения традиционных критериев, критериев механики разрушения, а также некоторых нелокальных критериев в задаче о прочности твёрдого тела, содержащего концентратор напряжений.

Показано, что при проведении расчётов на прочность конструкций и сооружений из таких структурно-неоднородных материалов, как горные породы, высокопрочные металлические сплавы, композиты, бетон, чугун, механические и прочностные свойства которых подвержены сильному влиянию масштабного фактора, область применения традиционного подхода ограничена невысокими значениями коэффициента концентрации напряжений K_t, характеризующего отношение эквивалентного напряжения σ_e в наиболее напряжённой точке тела к приложенному напряжению σ.

СУКНЕВ Сергей Викторович – д.т.н., с.н.с., зав. лабораторией ИГДС СО РАН.

Условие прочности имеет вид

$$\sigma_e < \sigma_0. \qquad (1)$$

Эквивалентное напряжение σ_e характеризует внутреннее напряжённое состояние тела, предельное напряжение σ_0 – стандартные механические свойства тела и полагается константой материала. Наступлению предельного состояния (разрушению) соответствует знак равенства в выражении (1), а критическое напряжение σ_c, при котором в наиболее напряжённой точке тела достигается предельное состояние, определяется выражением

$$\sigma_c = \frac{\sigma_0}{K_t}. \qquad (2)$$

При очень высоких значениях коэффициента концентрации напряжений используют подход линейной механики разрушения, в соответствии с которым предельное состояние оценивают на основе анализа распределения напряжений вблизи вершины концентратора напряжений (трещины). В качестве меры напряжённого состояния рассматривают не зависящий от координат коэффициент

(коэффициент интенсивности напряжений) при сингулярном члене разложения напряжений в ряд по степеням r (r – радиус, исходящий из вершины трещины). Наступление предельного состояния (рост трещины) связывают с достижением коэффициентом интенсивности напряжений критического значения. Условие прочности записывают в виде

$$K < K_c , \qquad (3)$$

где K – коэффициент интенсивности напряжений; K_c – его критическое значение, характеризующее локальные свойства материала. Данный подход получил широкое распространение. Однако область его применения ограничена очень острыми концентраторами, когда характер распределения напряжений позволяет отнести их к концентраторам типа трещин.

Указанные ограничения приводят к тому, что подходы классической механики и механики разрушения имеют различные области практического применения. Первый подход используется при проектировании конструкции, когда ставится задача оптимизации её формы с целью максимально возможного снижения концентрации напряжений, а второй – на стадии эксплуатации конструкции, когда ставится задача оценки её остаточного ресурса с учётом влияния имеющихся в конструкции дефектов, наибольшую опасность из которых представляют дефекты типа трещин. Проблема состоит в том, что большая часть конструктивных, технологических и эксплуатационных дефектов и концентраторов напряжений, имеющих высокое, но конечное значение коэффициента концентрации, оказывается вне области применения этих подходов. Поэтому актуальной является задача разработки новых подходов к расчётам конструкций на прочность, позволяющих охватить весь спектр концентраторов напряжений и с единых позиций подходить к расчёту конструкций с тупым концентратором напряжений и с трещиной.

В настоящее время интенсивно разрабатываются так называемые нелокальные критерии разрушения, в том числе критерии средних напряжений (ASC) и напряжений в точке (PSC), рассмотренные в работах [1, 2]. Общим свойством нелокальных критериев является введение внутреннего размера материала, характеризующего его структуру, что позволяет описать масштабный эффект в условиях концентрации напряжений и тем самым расширить область применения по сравнению с традиционными критериями.

В то же время критерии ASC и PSC не лишены недостатков, которые приводят к некоторому ограничению области их практического использования. Однако наибольшие нарекания в адрес этих критериев связаны с тем, что рассуждения, которые приводятся для их физического обоснования, о существовании зоны предразрушения вблизи концентратора напряжений, в которой происходит перераспределение напряжений и изменение физико-механических свойств материала, носят умозрительный характер. Иначе говоря, при использовании критериев ASC и PSC образование зоны предразрушения в явном виде не учитывается. Соответственно, расчёт критического напряжения производится на основании решения линейно-упругой задачи без учёта её образования. Следующим логическим шагом является расчёт напряжений с учётом образования зоны предразрушения.

Моделирование зоны предразрушения

Рассмотрим некоторые модели зоны предразрушения, для которой в дальнейшем используем принятое в настоящее время в зарубежной литературе обозначение FPZ (fracture process zone). Перечисление моделей FPZ даётся без оценки их физической адекватности.

1. Изменение формы концентратора напряжений.

В этой группе моделей необходимо выделить две подгруппы, в которых моделирование FPZ производится прямо противоположным образом. В первой подгруппе моделей рассматривается «затупление» концентратора напряжений, во второй, напротив, – его «заострение». Такие разные представления об FPZ диктуют необходимость использования различных подходов и для расчёта критического напряжения.

В первом случае для расчёта критического напряжения используется традиционный подход. Поскольку для однородного линейно-упругого тела увеличение критического напряжения может быть обеспечено только за счёт уменьшения коэффициента концентрации напряжений, расчёт производится для концентратора, имеющего эффективный радиус закругления в вершине, превышающий его реальный размер. Пример реализации такого подхода можно найти в работе [3].

Во втором случае используется подход механики разрушения, точнее, механики трещин. Для этого FPZ моделируется фиктивной трещиной, исходящей из вершины концентратора. Затем для трещины, находящейся в неоднородном поле напряжений, рассчитывается коэффициент интенсивности напряжений и применяется критерий (3). Ниже этот подход будет рассмотрен более подробно.

2. Когезионная зона.

Под когезионной зоной понимается область материала, в которой силы сцепления между материальными частицами ослаблены по сравнению с основным материалом. Закон ослабления (softening law) задаётся априори. Обычно когезионная зона представляется в виде математического разреза (трещины), по берегам которого действуют нормальные силы, имитирующие силы сцепления. Для расчёта критического напряжения используется аппарат механики трещин. Модель когезионной трещины представляет собой логическое развитие модели фиктивной трещины. Она получила очень широкое распространение в многочисленных работах, из которых в качестве примера приведём работу [4].

3. Зона повреждённости.

Под зоной повреждённости понимается область материала, в которой происходит деградация упругих свойств (модуль растяжения, модуль сдвига). Закон деградации свойств задаётся априори. Расчёт критического напряжения производится на основе решения линейно-упругой задачи для неоднородного тела с эффективными значениями упругих постоянных в зоне повреждённости и применения традиционного критерия разрушения [5].

Критерий фиктивной трещины

Для иллюстрации применения критерия рассмотрим задачу о прочности неограниченной пластины, ослабленной круговым отверстием и подверженной одноосному растяжению.

Модель FPZ в виде двух симметричных трещин длиной d, исходящих от контура кругового отверстия радиуса a, была предложена в работе [6] (рис. 1). В самой работе для обозначения зоны предразрушения использован термин «intense energy region». Размер d полагается новой константой материала, характеризующей его структуру. В некоторых работах (например, в [7]) рассматривается только одна трещина, исходящая от контура отверстия, что сути дела не меняет. Коэффициент интенсивности напряжений для таких трещин в бесконечной пластине можно представить в виде

$$K = \sigma \sqrt{\pi d}\, f(d/a),$$

где функция $f(d/a)$ определяется из решения задачи Бови [8]. Критическое напряжение

$$\sigma_c = \frac{K_c}{\sqrt{\pi d}\, f(d/a)} \ . \qquad (4)$$

В отсутствии отверстия ($a = 0$) функция $f(d/a)$ принимает значение 1. Поскольку при этом критическое напряжение характеризует не что иное, как прочность гладкого образца σ_0, то можно записать:

$$\sigma_0 = \frac{K_c}{\sqrt{\pi d}} \ . \qquad (5)$$

Здесь необходимо сделать важное замечание о том, что, вообще говоря, допущение d = const справедливо лишь для больших отверстий. Если отверстие мало, то $d >> a$, что противоречит самому определению зоны предразрушения. А предельный переход $a \to 0$ при этом оказывается физически некорректным, поскольку зона предразрушения не может существовать отдельно от причины, её породившей, т.е. от концентратора напряжений. Поэтому значение d при $a \to 0$ не определено и выражение (5), строго говоря, не верно.

Чтобы принять справедливость допущения d = const для любых размеров отверстия (в том числе при его отсутствии) и воспользоваться выражением (5), мы должны допустить изначальное

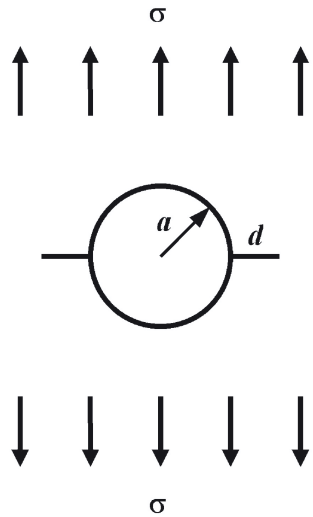


Рис. 1. Задача Бови

существование в теле фиктивных трещин. Модель твёрдого тела с распределёнными в нём микротрещинами (трещинами Гриффитса) достаточно широко распространена и вполне согласуется с общепринятыми представлениями о реальном твёрдом теле, обладающем изначальной, присущей ему дефектностью. Такая модель может быть использована для оценки прочности твёрдого тела, содержащего большой ансамбль гладких дефектов, например, пор, хотя попытки обнаружить микротрещины вокруг пор экспериментально методом электронной сканирующей микроскопии успехом не увенчались [9]. Но чтобы применить подход механики разрушения для оценки прочности однородного тела, содержащего одиночный дефект произвольного размера, трещины Гриффитса должны заполнять объём всего тела, что физически абсурдно. Поэтому и в рамках модели твёрдого тела с распределёнными микротрещинами могут рассматриваться только большие отверстия, размер которых намного превышает размер микротрещин, а также расстояние между микротрещинами.

Тем не менее, следуя [6], запишем выражение (4) с учётом формулы (5) в виде

$$\sigma_c = \frac{\sigma_0}{f(d/a)}. \qquad (6)$$

Сравнивая полученное выражение с формулой (2), функцию $f(d/a)$ можно интерпретировать как эффективный коэффициент концентрации напряжений, зависящий от радиуса отверстия и некоторого структурного параметра. Было бы справедливо ожидать, что для очень больших отверстий эффективный коэффициент концентрации напряжений совпадёт с теоретическим коэффициентом K_t, рассчитанным по теории упругости. Однако в пределе $d/a \to 0$ функция принимает значение 3,36 [8], в то время как решение задачи Кирша о растяжении бесконечной плоскости с круговым отверстием даёт $K_t = 3$ [10]. Таким образом, при больших a критерий фиктивной трещины ведёт себя некорректно и не обеспечивает сшивку с традиционным критерием.

Для приближённого вычисления функции $f(d/a)$ Tirosh [7] использовал известный приём [8], в соответствии с которым исходная задача заменяется задачей о трещине, к берегам которой приложено распределённое давление $\sigma_y(x)$ (рис. 2). Общее выражение для коэффициента интенсивности напряжений в этой задаче (K вычисляется в точке $x = b$) имеет вид [11]:

$$K = \sqrt{\frac{2}{\pi(b-a)}}\int_a^b \sigma_y(x)\sqrt{\frac{x-a}{b-x}}\,dx. \qquad (7)$$

Напряжение $\sigma_y(x)$ определяется из решения исходной задачи при отсутствии трещины, т.е. в данном примере из решения задачи Кирша [10]:

$$\sigma_y(x) = \sigma\left(1 + \frac{a^2}{2x^2} + \frac{3a^4}{2x^4}\right). \qquad (8)$$

Подставив выражение (8) в формулу (7) и выполнив интегрирование, приняв $b = a + d$, получим:

$$K = \sigma\sqrt{\frac{\pi d}{2}}\left(1 + \frac{1}{2}\left(1 + \frac{d}{a}\right)^{-3/2} + \right.$$
$$\left. + \frac{3}{2}\left(1 + \frac{d}{a}\right)^{-7/2}\left(1 + \frac{d}{2a} + \frac{d^2}{8a^2}\right)\right).$$

Учитывая, что при $a = 0$ $K_c = \sigma_0(\pi d/2)^{1/2}$, выражение для критического напряжения можно представить в виде (6), где функция имеет вид:

$$f(d/a) = 1 + \frac{1}{2}\left(1 + \frac{d}{a}\right)^{-3/2} +$$
$$+ \frac{3}{2}\left(1 + \frac{d}{a}\right)^{-7/2}\left(1 + \frac{d}{2a} + \frac{d^2}{8a^2}\right). \qquad (9)$$

Вычисление $f(d/a)$ по формуле (9) даёт результаты, близкие к точному решению Бови при $(d/a) > 0$, и значение $f(0) = 3$.

В то же время из формул (6) и (9) следует, что присутствие в пластине любого сколь угодно малого дефекта (отверстия) приводит к снижению её прочности, что не согласуется с современными представлениями о реальном твёрдом теле, изложенными выше. Поскольку любой материал обладает изначальной, присущей ему дефектностью,

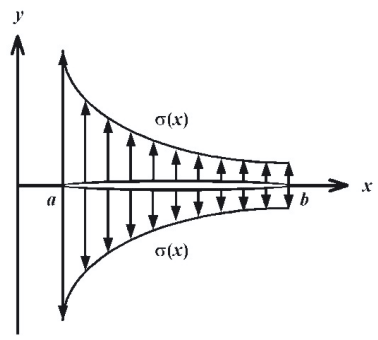


Рис. 2. Трещина, нагруженная внутренним давлением.

малые искусственные дефекты, размеры которых сопоставимы с размерами структурных составляющих материала, не оказывают влияния на его прочность до тех пор, пока их размеры не достигнут определённого (критического) значения. В рассмотренном выше примере задача определения критического размера дефекта в рамках критерия фиктивной трещины не может быть поставлена, также как и в рамках критериев ASC и PSC [1, 2].

При этом следует уточнить, что речь идёт о минимальном критическом размере дефекта, который не зависит от уровня действующих в конструкции напряжений. Задача о допустимых размерах дефекта в реальных конструкциях ставится, как правило, с учётом нагруженности конструкции, которая определяется реальными условиями её работы. В этом случае критический размер дефекта зависит от уровня действующих в конструкции напряжений, уменьшаясь по мере их роста.

Несмотря на указанные недостатки критерия фиктивной трещины, расчёт критического напряжения по формулам (6) и (9) достаточно хорошо описывает известные экспериментальные данные о прочности композитных материалов с круговыми отверстиями [7]. Вместе с тем, использование критерия совместно с приближённым расчётом коэффициента интенсивности напряжений по формуле (7) для оценки прочности пластины, ослабленной более острым, например, эллиптическим отверстием, может привести к существенной погрешности. В этом нетрудно убедиться, рассмотрев предельный случай эллиптического отверстия – трещину.

Точное значение коэффициента интенсивности напряжений в этом случае равно

$$K = \sigma\sqrt{\pi(a + d/2)}\,.$$

Теперь рассчитаем K по формуле (7). Для прямолинейной трещины длиной $l = 2a$ распределение нормальных напряжений $\sigma_y(x)$ в опасном сечении имеет вид [8]:

$$\sigma_y(x) = \sigma\frac{x}{\sqrt{x^2 - a^2}}\,. \qquad (10)$$

Подставив выражение (10) в формулу (7) и выполнив интегрирование, получим:

$$K = \sigma\sqrt{\frac{\pi d}{2}}\left(1 + \frac{2}{\pi}\sqrt{\frac{2a}{d}} - \frac{2}{\pi}\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{2a}{d}}\right).$$

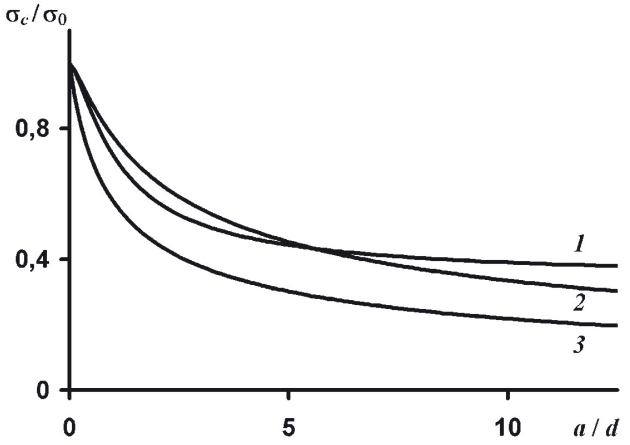


Рис. 3. Зависимость критического напряжения от безразмерного параметра a / d

Учитывая, что при $a = 0$ $K_c = \sigma_0(\pi d/2)^{1/2}$, можно записать выражение для критического напряжения:

$$\sigma_c = \sigma_0\left(1 + \frac{2}{\pi}\sqrt{\frac{2a}{d}} - \frac{2}{\pi}\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{2a}{d}}\right)^{-1}. \qquad (11)$$

Аналогичным образом получим точное выражение:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_0}{\sqrt{1 + 2a/d}}\,. \qquad (12)$$

На рис. 3 приведены результаты расчёта критического напряжения, выполненные по формулам (6), (9), (11) и (12), для кругового отверстия (кривая 1) и трещины (кривая 2 – приближённый расчёт, кривая 3 – точный расчёт) в зависимости от безразмерного параметра a / d. Расхождение между приближённым и точным расчётом для трещины весьма существенно, причём при малых размерах выреза ($a \le 5{,}6d$) критическое напряжение, рассчитанное для трещины по приближённой формуле (11), даже выше значения, рассчитанного для кругового отверстия. Это означает что, начиная с некоторого K_I, критическое напряжение возрастает с его увеличением, т.е. является немонотонной функцией коэффициента концентрации напряжений. Такое поведение критического напряжения является физически абсурдным, поэтому на практике приближённая формула (7) может быть использована для расчёта коэффициента интенсивности напряжений только при выполнении условия $a >> d$.

Сжатие

Рассмотрим возможность применения критерия фиктивной трещины для оценки образования

трещин отрыва при сжатии пластины с круговым отверстием. Распределение нормальных напряжений $\sigma_y(x)$ вдоль линии приложения нагрузки имеет вид [10]:

$$\sigma_y(x) = \frac{p}{2}\left(3\frac{a^4}{x^4} - \frac{a^2}{x^2}\right), \qquad (13)$$

где p – приложенное сжимающее напряжение (давление); a – радиус отверстия. Начало координат выбрано в центре отверстия, напряжение p принято положительным. Растягивающие напряжения достигают своего максимального значения $\sigma_{max}=p$ на контуре отверстия в точках $x=\pm a$, при удалении от него напряжения быстро убывают. Распределение напряжений $\sigma_y(x)$ показано на рис. 4. Как видно из формулы (13) и рис. 4, на некотором расстоянии от контура отверстия напряжение σ_y переходит через ноль и меняет знак. Очевидно, что критерий фиктивной трещины в этом случае не может быть применён, поскольку трещина оказывается в поле сжимающих напряжений и физический механизм отрыва не реализуется. Поэтому, как и в случае растяжения, критерий применим лишь для больших отверстий.

Подставив выражение (13) в формулу (7) и выполнив интегрирование, приняв $b = a + d$, получим:

$$K = p\sqrt{\frac{\pi d}{2}}\left(-\frac{1}{2}\left(1+\frac{d}{a}\right)^{-3/2} + \frac{3}{2}\left(1+\frac{d}{a}\right)^{-7/2}\left(1+\frac{d}{2a}+\frac{d^2}{8a^2}\right)\right). \qquad 14)$$

Приравняв выражение (14) к K_c и учитывая, что $K_c=\sigma_0(\pi d/2)^{1/2}$, получим формулу для критического давления:

$$p_c = \chi C_0\left(-\frac{1}{2}\left(1+\frac{d}{a}\right)^{-3/2} + \frac{3}{2}\left(1+\frac{d}{a}\right)^{-7/2}\left(1+\frac{d}{2a}+\frac{d^2}{8a^2}\right)\right)^{-1}, \qquad (15)$$

где $\chi = \sigma_0 / C_0$; C_0 – предел прочности материала на сжатие.

При больших значениях диаметра отверстия $l = 2a$ критерий фиктивной трещины даёт значение $p_c = \sigma_0$, т.е. обеспечивает сшивку с традиционным критерием. При уменьшении диаметра отверстия критическая величина приложенного давления, при котором на контуре отверстия образуются трещины отрыва, стремится к неограниченному

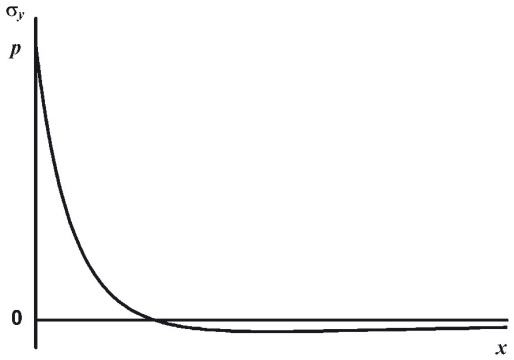


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений вдоль линии приложения нагрузки

значению. В действительности это значение, очевидно, ограничено пределом прочности материала на сжатие C_0, откуда следует, что существует критическое значение размера отверстия $l = l_c$, ниже которого трещины отрыва на контуре отверстия не образуются. Другими словами, при $l \le l_c$ материал не чувствует присутствия концентратора напряжений. Это согласуется с современными представлениями о реальном твёрдом теле, изложенными выше.

Была проведена экспериментальная проверка возможности применения критерия фиктивной трещины к оценке образования трещин отрыва при сжатии. В качестве модельного материала использовали дигидрат сульфата кальция (двухводный гипс), приготовленный из водного раствора строительного гипса. Наряду с полуводным сульфатом кальция, строительный гипс уже содержит в своём составе определённую долю двухводного сульфата кальция, который не участвует в реакции гидратации при изготовлении образцов и фактически играет роль заполнителя. Были изготовлены две партии образцов: одна из гипсового материала с высоким (более 90 %) содержанием полуводного сульфата кальция (гипс 1), вторая – из гипсового материала с низким (в пределах 60–70 %) содержанием полуводного сульфата кальция в исходном составе (гипс 2).

Образование трещин отрыва в зонах концентрации напряжений исследовали на образцах, содержащих центральные круговые отверстия различного диаметра и подверженных одноосному сжатию со скоростью 0,5 мм/мин. Образцы представляли собой квадратные плиты размером 200x200 мм и толщиной 30–35 мм. Диаметр отверстия изменяли от 3,5 до 25 мм. На контур отверстия наносили графитовые датчики электропроводимости. Регистрацию трещин отрыва

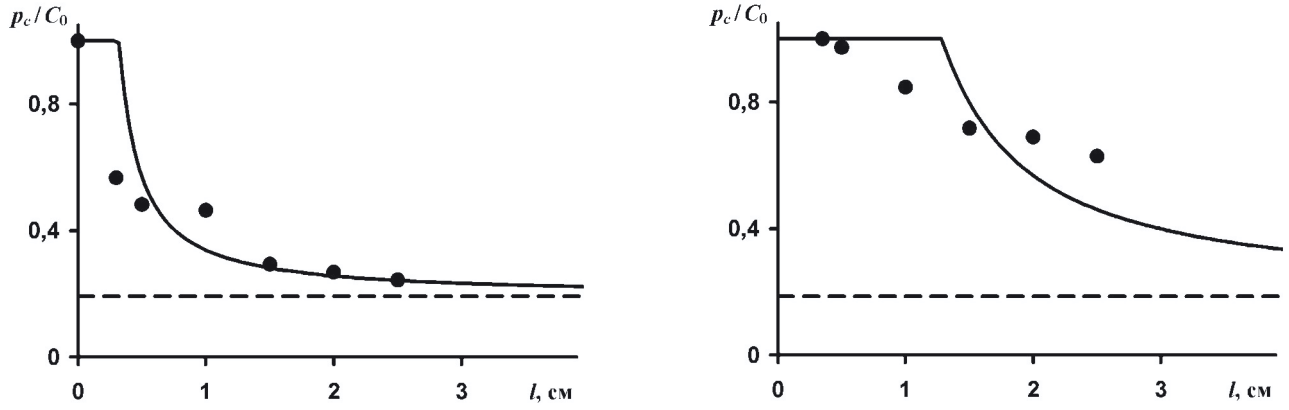


Рис. 5. Зависимость критического давления от диаметра отверстия

осуществляли по диаграммам изменения электропроводимости графитовых датчиков в процессе нагружения образца. Методика проведения эксперимента описана в работе [12].

На рис. 5, *а* представлены экспериментальные данные (точки) о величине нагрузки в момент образования трещин отрыва на контуре отверстия в зависимости от его диаметра, полученные на образцах из гипса 1, и результаты расчёта критического давления (сплошная кривая) по формуле (15). Штриховая прямая рассчитана согласно традиционному подходу. Аналогичные результаты, полученные на образцах из гипса 2, приведены на рис. 5, *б*. Рис. 5, *а, б* иллюстрируют существенный масштабный эффект, т.е. влияние диаметра отверстия на локальную прочность материала. С его уменьшением критическое давление возрастает, достигая предела прочности на сжатие, с увеличением – асимптотически приближается к пределу прочности на растяжение. Такое поведение качественно описывается критерием фиктивной трещины. Однако удовлетворительное количественное соответствие расчётных и экспериментальных значений получено только для гипса 1 (рис. 5, *а*). Критический диаметр отверстия l_c оказался приблизительно равным 4d. Эти результаты в целом повторяют выводы, сделанные ранее [1, 2] в отношении критериев средних напряжений и напряжений в точке.

Выводы

1. Критерий фиктивной трещины, также как критерии средних напряжений и напряжений в точке, позволяет описать масштабный эффект локальной прочности материала в условиях концентрации напряжений. При растяжении критерий фиктивной трещины ведёт себя некорректно при больших размерах концентратора напряжений и не обеспечивает сшивку с традиционным критерием.

2. Использование приближённой процедуры для расчёта коэффициента интенсивности напряжений по формуле (7) позволяет использовать критерий при больших размерах концентратора напряжений, но приводит к ограничению области его применения, связанному с немонотонным характером поведения критического напряжения при увеличении остроты концентратора напряжений малого размера.

3. Экспериментально показано, что для некоторых материалов критерий фиктивной трещины может быть успешно применён как для описания масштабного эффекта, так и для оценки критического размера дефекта при сжатии. Однако применение критерия для других материалов позволяет получить лишь качественные оценки локальной прочности.

Литература

1. *Сукнёв С.В.* Нелокальные критерии разрушения. Критерий средних напряжений // Наука и образование. – 2007. – № 1. – С. 28–33.

2. *Сукнёв С.В.* Нелокальные критерии разрушения. Критерий напряжений в точке // Наука и образование. – 2008. – № 1. – С. 27–32.

3. *Полилов А.Н.* Схема предразрушения композитов около отверстий // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1982. – № 3. – С. 110–117.

4. *Smith E.* Size effect relations associated with cohesive zone type fracture at a blunt stress concentration // Int. J. Fract. – 1999. – Vol. 95, No. 1/4. – P. 41–50.

5. *Tan S.C.* A progressive failure model for composite laminates containing openings // J. Compos. Mater. – 1991. – Vol. 25, No. 5. – P. 556–577.

6. *Waddoups M.E., Eisenmann J.R., Kaminski B.E.* Macroscopic fracture mechanics of advanced composite materials // J. Compos. Mater. – 1971. – Vol. 5, No. 4. – P. 446–454.

7. *Tirosh J.* On the tensile and compressive strength of solids weakened (strengthened) by an inhomogeneity // Trans. ASME. J. Appl. Mech. – 1977. – Vol. 44, No. 3. – P. 449–454.

8. *Хеллан К.* Введение в механику разрушения. – М.: Мир, 1988. – 364 с.

9. *Nordgren A., Melander A.* Influence of porosite on strength of WC–10 % Co cemented carbide // Powder Metallurgy. – 1988. – Vol. 31, No. 3. – P. 189–200.

10. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1984. – Т. 2. – 560 с.

11. *Черепанов Г.П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

12. *Сукнёв С.В., Елшин В.К., Новопашин М.Д.* Экспериментальное моделирование процессов трещинообразования в образцах горных пород с отверстием // ФТПРПИ. – 2003. – № 5. – С. 47–54.

УДК 550.832.07

Особенности технологии электрокаротажа скважины обсаженной металлической колонной

С.А.Великин

Рассмотрены технологические особенности электрического каротажа скважин, обсаженных металлическими трубами. Разработаны базовые элементы технических средств, теоретического и методического обеспечения ЭКОМС применительно к мониторингу захороненных рассолов в условиях криолитозоны. Экспериментально оценено состояние захоронения рассолов, удаленных с Удачнинского горно-обогатительного предприятия, подтверждаемое результатами наземной индуктивной электроразведкой.

The technological specifics of electrical logging in boreholes cased with metal pipes are discussed. The basic elements of the apparatus, theory and methods for electric logging in metal-cased boreholes are presented which were developed to monitor buried brines in permafrost. The method was applied to evaluate a brine disposal site at the Udachnyi Mine; the experimental results were confirmed by a surface induction survey.

Ключевые слова: электрокаротаж, рассол, обсадные трубы, электрическое сопротивление.

Для решения задач мониторинга, контроля и оценки геологической среды одним из важных направлений развития разведочной и промысловой геофизики представляется электрокаротаж обсаженных металлическими трубами скважин. Идея возможности такой технологии предложена Л.М. Альпиным (1962), согласно которой электрическое поле между электродом, находящимся внутри обсадной трубы, и электродом, расположенным вне этой трубы (в зумпфее на поверхности земли или в другой скважине), не полностью шунтируется трубой. Измеряя это поле, можно с достаточной точностью определять электросопротивление пород, вмещающих обсадную колонку [1–3]. Активные технологические исследования в этом направлении начались сравнительно недавно. Так в течение последнего десятилетия компанией «Para Magnetik Logging» (США) ведутся работы по созданию системы для выполнения таких измерений (СЭКУК). Полевые испытания, проведенные этой компанией в Техасе, в мелких скважинах показали хорошо воспроизводимые результаты. Эти исследования помимо самой компании финансируют также Департамент энергетики США, Научно-исследовательский институт газа (США) и одна из крупных нефтяных международных компаний. В России такие исследования носят фрагментарный характер, что побудило нас начать исследования по разработке технологии электрического каротажа в скважинах обсаженных металлическими трубами (ЭКОМС) применительно к гидрогеологическому

ВЕЛИКИН Сергей Александрович – к.т.н., начальник Вилюйской научно-исследовательской мерзлотной станции ИМЗ им. П.И.Мельникова СО РАН.