

УДК 622.0223:539.374

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СОЛЯНЫХ ПОРОД
ПРИ ИСПЫТАНИИ ОБРАЗЦОВ С КЛИНООБРАЗНОЙ ВЫЕМКОЙ**

В. Н. Аптуков, С. В. Волегов

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
E-mail: aptukov@psu.ru, ул. Букирева, 15, 614000, г. Пермь, Россия*

Описана методика экспериментально-теоретической оценки параметров трещиностойкости соляных пород при испытании образцов с клинообразной выемкой и численного моделирования проведенных экспериментов в пакете ANSYS. Представлены значения коэффициента интенсивности напряжений и интенсивности освобождения энергии при образовании трещины отрыва в различных пластах соляных пород Верхнекамского месторождения калийных солей.

Соляные породы, образец с клинообразной выемкой, трещиностойкость, математическое моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20200202

Практика строительства и эксплуатации соляных рудников свидетельствует о том, что в неблагоприятных условиях породный массив проявляет хрупкое поведение с образованием отдельных или множественных трещин, возникающих в водозащитной толще шахтного поля, в кровле выработок, в целиках в случае массового динамического обрушения [1]. Анализ литературы показывает, что расчеты соляных массивов с учетом возможного образования трещин не проводятся, отсутствуют экспериментальные исследования по определению параметров трещиностойкости соляных пород, не существует стандартных методик их оценки.

Для структурно-неоднородных тел, в частности минеральных агрегатов, снижение прочности обусловлено наличием дефектов (трещин, пор и т. п.) на различных масштабных уровнях: внутрикристаллических (< 100 нм), межкристаллических (~ 10 мкм), макротрещин и пор. Кроме минералогического состава, определяющим для прочности является структурный фактор: размер, форма, взаимосвязь и строение отдельных зерен [2]. Наличие тонких трещин не более 0.5 – 1.0 мм, развивающихся параллельно плоскостям спайности в галите, влияет на прочность породы. В сильвините тонкие трещины развиваются реже, в карналлите — отсутствуют.

Разрушение кристаллов наблюдается вдоль плоскости спайности, при этом торможение процесса разрушения на границе большого кристалла будет меньше, чем у более мелких кристаллов [3]. Существенный фактор — направление нагрузки по отношению к плоскости спайности. При нагрузке, перпендикулярной к плоскости спайности, прочность на 3 – 38 % больше,

чем при нагрузке, параллельной плоскости спайности. Оценка влияния шероховатости поверхности развития микротрещины на трещиностойкость в кристаллах соляных пород приведена в [4]. Микронеоднородности в виде пор и газовых включений проявляют себя как концентраторы напряжений, в их окрестности возникают и развиваются микротрещины. В соляных породах при нагружении выявляются множественные структурные изменения, зарождение микродефектов происходит при пересечении полос скольжения между собой или с границами зерен.

Моделирование больших объемов соляных пород (горнотехнические сооружения, выработки, водозащитная толща) осуществляется на основе феноменологического подхода, где материал соляных пород исследуется в рамках механики сплошной среды. Процентное содержание глины, микротрещины, поры и прочие дефекты учитываются путем введения эффективных характеристик материала. Это позволяет получить сравнительно простые определяющие уравнения. Однако существуют задачи, в которых необходимо выделять и рассматривать отдельную трещину (систему трещин), к ним относятся задачи о гидроразрыве.

Для определения характеристик трещиностойкости соляных пород не существует стандартизированных методик. Ранее при нахождении коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} использовалась экспериментальная схема трехточечного изгиба прямоугольного образца с надрезом [3]. Согласно результатам эксперимента, для каменной соли K_{IC} составляет 0.67 ± 0.09 МПа·м^{1/2}, для карналлита — 0.12 ± 0.01 МПа·м^{1/2}.

Важная характеристика пород — трещиностойкость при плоском сдвиге, полученная на прямоугольных образцах с двумя симметрично расположенными пропилами [5, 6]. Значения K_{IC} для каменной соли составляют 1.04 МПа·м^{1/2} при относительной погрешности 17 %, для карналлита — 0.26 МПа·м^{1/2} при относительной погрешности 26 %.

Для определения локальных характеристик трещиностойкости (отдельных зерен) применяют метод индентирования пирамиды Виккерса в полированную поверхность образца с нагрузкой, приводящей к образованию микротрещин, развивающихся от углов отпечатка [7]. Результаты превышают полученные при трехточечном изгибе в 2–3 раза [8]. Существует также метод сжатия дискового образца с двумя симметричными трещинами, выходящими из центрального отверстия [9]. Для бетонов используется метод Хиллемайера–Хильсдорфа, заключающийся во внедрении жесткого клина в заранее изготовленную клиновидную выемку с надрезом в компактном образце [10]. Утверждается, что такое испытание позволяет получить устойчивый рост трещины. По нашему мнению, метод расклинивания образца хорошо подходит к соляным породам как структурно-неоднородным материалам, поскольку нагружение путем давления траверсы испытательной машины на металлический клин проще осуществить, чем прямое растяжение. Кроме того, действие клина на берега клиновидной выемки в некоторой степени моделирует действие давления жидкости на берега трещины (задача о гидроразрыве).

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Изготовление образцов осуществлялось сухой резкой кернового материала на отрезном камнерезном станке с помощью корундовых дисков. Схема цилиндрических образцов в плане с клинообразной выемкой и трещиной-пропилем показана на рис. 1. Диаметр образцов 95 мм, высота 130 ± 5 мм и 170 ± 5 мм. Размер клинообразной выемки a изменялся в диапазоне 35–45 мм. Ширина трещины-пропила $h = 1.5$ мм, ее длина 10 мм.

Изготовлено 52 образца из кернового материала, добытого из скважин, пробуренных в кровле, почве и боковой стенке выработки. Представлены соляные породы пластов от $K_{рп}$ до B , включающие сильвинит красный, сильвинит пестрый, сильвинит полосчатый, каменную соль, содержащую глинисто-ангидритовые прослойки.

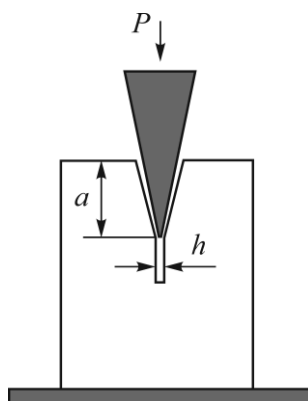


Рис. 1. Схема образца с выемкой и нагружающего стального клина

Результаты эксперимента представляют собой кривые “усилие–перемещение” металлического клина, получаемые автоматически на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z-250. Осуществлялась фотофиксация мест появления и развития трещин. Характерный график “усилие–перемещение” на рис. 2 содержит несколько локальных максимумов, соответствующих времени появления той или иной трещины.

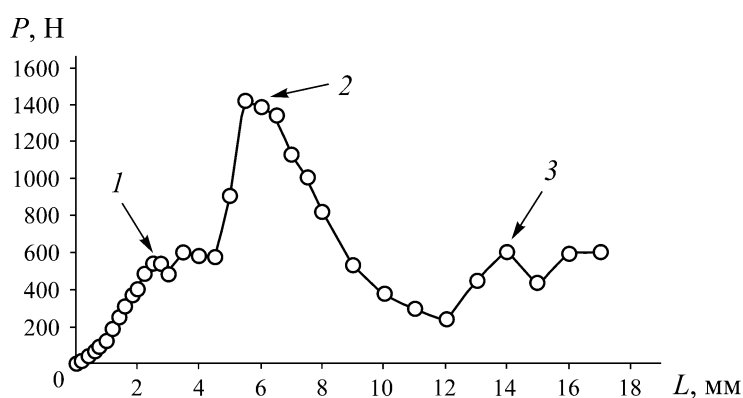


Рис. 2. Экспериментальная кривая “усилие – перемещение”: 1–3 — локальные максимумы

Первый максимум соответствует возникновению боковой трещины, пересекающей глинисто-ангидритовый прослой 1, второй — субмеридиональной трещине по границе глинисто-ангидритового прослоя и синего сильвинита 2, третий — субмеридиональной трещине, возникшей из нижней точки пропила, идущей вдоль слоя молочно-белого сильвина 3 (рис. 3). По локальным максимумам для боковой трещины можно оценить среднее касательное напряжение среза (тип разрушения II), для субмеридиональных трещин — среднее давление на клинообразную выемку, при котором формируется трещина отрыва (тип разрушения I).

Среднее касательное напряжение среза для боковой трещины оценим по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{Q}{S_6}, \quad (1)$$

где $Q = P / 2 \sin \alpha$; $\alpha = 11.5^\circ$ — угол полураствора металлического клина; S_6 — площадь боковой трещины.



Рис. 3. Вид образца после испытания. Пояснения в тексте

Для рассматриваемого примера (максимум 1, рис. 2) $S_0 = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $P = 580 \text{ Н}$, $Q = 1455 \text{ Н}$. Тогда из (1) получаем для боковой трещины в глинисто-ангидритовом прослое $\tau_{\text{ср}} = 0.86 \text{ МПа}$. Среднее предельное давление, при котором формируется трещина отрыва, оцениваем по локальному максимуму 2 (рис. 2) следующим образом. Предполагаем, что предельное давление p_p равномерно действует по всей площади клиновидной выемки S_k (рис. 1). Проекция результирующего усилия этого давления на вертикаль равна усилию, действующему на клин, откуда имеем

$$p_p = \frac{P}{S_k \sin \alpha}.$$

В нашем примере $P = 1400 \text{ Н}$ (рис. 2), $S_k = 8.55 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, тогда для субмеридиональной трещины $p_p = 0.82 \text{ МПа}$.

Экспериментальные кривые “усилие – перемещение” позволяют получить следующую информацию. После достижения второго максимума возникает длительный спад усилия, действующего на клин. Данный эффект обусловлен уменьшением податливости системы (образца) за счет развития трещины отрыва. Работа W , производимая усилием на этом этапе (перемещение от 6 до 12 мм, рис. 2), затрачивается в основном на развитие вязкой трещины. Определяя W путем интегрирования функции $P(L)$ на этапе спада, а также оценивая площадь трещины S_T по фотографиям образцов в ходе нагружения и после разрушения, можно рассчитать работу (энергию), затрачиваемую на образование единицы площади вязкой трещины (аналогичную плотности поверхностной энергии γ [11]):

$$\gamma = \frac{W}{S_T}.$$

Для кривой $P(L)$, показанной на рис. 2, $W = 3341 \text{ Н} \cdot \text{мм}$, $S_T = 2850 \text{ мм}^2$, $\gamma = 1.2 \text{ Н/мм}$. Результаты обработки эксперимента приведены в табл. 1. В некоторых случаях определение тех или иных характеристик разрушения не представлялось возможным. Например, в образцах из вертикального керна, несмотря на наличие концентратора в виде прорези в нижней части клиновидной выемки образца, трещины распространялись в плоскости, перпендикулярной оси образца.

ТАБЛИЦА 1. Средние значения экспериментальных величин для различных пластов

Пласт	Напряжение среза, МПа	Предельное давление, МПа	Удельная энергия, Н/мм
Пласт А	0.84	0.93	0.95
Пласт В	0.90	1.86	1.95
Пласт В–В'	0.97	1.43	1.14
Пласт В	1.43	2.28	0.85
Пласт K_{pI}	0.47	1.01	1.00
Пласт $K_{pI}-K_{pII}$	0.56	1.42	0.61
Пласт K_{pII}	0.71	1.55	0.76
Среднее по пластам	0.84	1.50	1.04

Наблюдается минимальная положительная корреляция между предельным давлением и глубиной расположения образца (рис. 4а). Это означает, что гораздо большее значение, чем глубина расположения образца, имеют физико-механические свойства пласта, в котором находится образец. А именно текстура, зернистость, тип кристалла соляной породы, наличие глинистых прослоев в месте формирования и распространения трещины. Прослеживается четкая корреляционная зависимость между напряжением среза и предельным давлением, построенная для различных сильвинитов и каменной соли (рис. 4б). Отмечается влияние ориентации (горизонтальная или вертикальная) оси образца на определяемые свойства, хотя встречаются и исключения для образцов с “винтовой” или неопределенной текстурой. Тем не менее в средних значениях для напряжения среза и предельного давления жидкости эта ориентация проявляется (табл. 2).

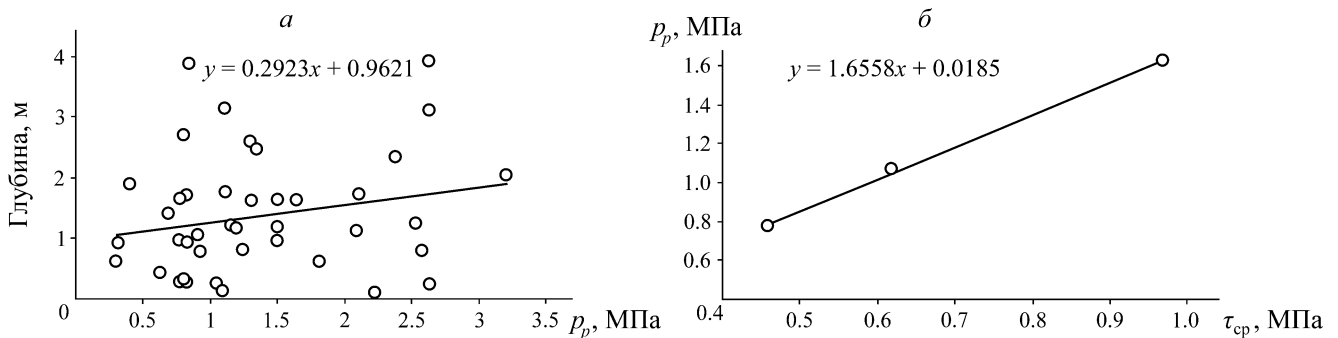


Рис. 4. Корреляционная зависимость: а — между предельным давлением и расстоянием от места расположения образца до контура выработки; б — между предельным давлением и напряжением среза для различных соляных пород

ТАБЛИЦА 2. Влияние ориентации оси образца на определяемые свойства

Ориентация оси образца	Напряжение среза, МПа	Предельное давление, МПа	Удельная энергия, Н/мм
Горизонтальная	0.71	1.15	0.97
Вертикальная	0.99	1.64	0.98

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ РАСКЛИНИВАНИИ ОБРАЗЦА МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Напряженно-деформированное состояние испытанных образцов при образовании трещины отрыва численно моделировалось с применением пакета ANSYS для определения параметров трещиностойкости пород. Образец в расчетной схеме нагружался давлением p_p по берегам клиновидного выреза, соответствующим максимальному усилию, полученному из эксперимента (максимум 2, рис. 2). Макроскопические свойства образца задавались на основе данных эксперимента по сжатию образцов из кернов аналогичных скважин. Путем численного перебора

находилась интенсивность освобождения энергии G_{IC} , т. е. параметр, определяющий трещиностойкость при образовании трещины отрыва (критерий “energy-release rate” в ANSYS) для заданного уровня давления (см. табл. 1). Коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} получали из соотношения для вычисленного G_{IC} : $G_{IC} = [(1-\nu^2)(K_{IC})^2]/E$ (ν — коэффициент Пуассона, E — модуль упругости) [3, 10].

На рис. 5 показано поле интенсивности напряжений и векторное поле перемещений в образце пласта A в момент образования трещины. Полученные параметры трещиностойкости K_{IC} и G_{IC} представлены в табл. 3. Для исследуемых пластов коэффициент интенсивности напряжений, характеризующий сопротивление материала образованию трещины отрыва соляной породы, лежит в диапазоне 0.12 – 0.24 МПа·м^{1/2}.

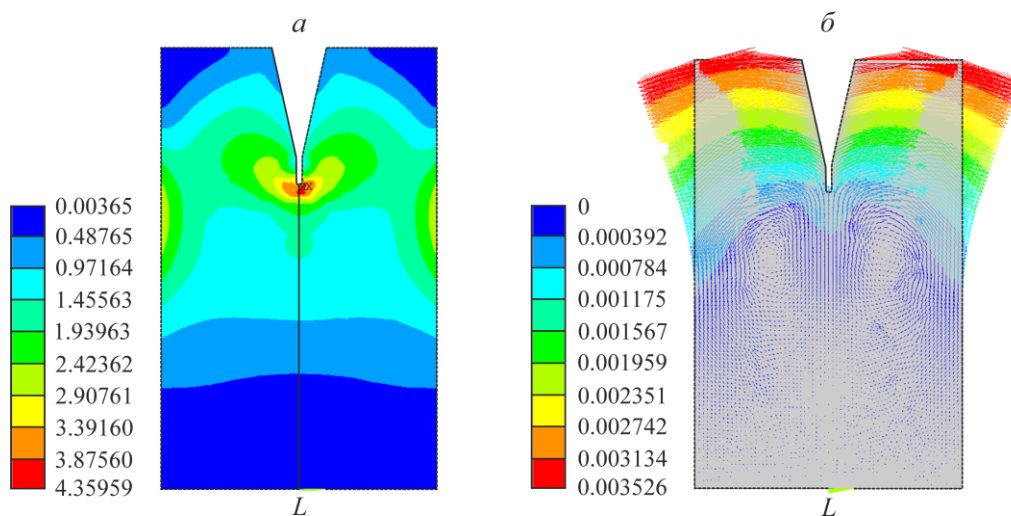


Рис. 5. Поле интенсивности напряжений (а) и векторное поле перемещений (б) в момент образования трещины

ТАБЛИЦА 3. Параметры трещиностойкости пород

Пласт	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	G_{IC} , Па·м
Пласт А	0.130	1.20
Пласт Б	0.210	3.10
Пласт Б–В'	0.170	2.20
Пласт В	0.240	4.00
Пласт K_{pI}	0.120	1.30
Пласт $K_{pI} - K_{pII}$	0.180	2.10
Пласт K_{pII}	0.190	2.40
Глинисто-ангидритовый прослой	0.034	0.51

Для глинисто-ангидритового прослоя $K_{IC} = 0.034$ МПа·м^{1/2}, что в 5–7 раз меньше коэффициентов интенсивности напряжений для основных пластов. Это означает, что при наличии глинистых прослоев именно они будут определять сопротивляемость породного массива образованию трещины при гидроразрыве. Представленные в настоящей работе коэффициенты интенсивности напряжений меньше соответствующих значений, указанных в [3]: для каменной соли — 0.67 МПа·м^{1/2}. Данные [3] основаны на определении коэффициента интенсивности напряжений при трехточечном изгибе образцов соляных пород. В [3] при испытании соляных пород методом микроиндентирования получены коэффициенты интенсивности напряжений для монокристаллов каменной соли Верхнекамского месторождения (0.3 – 3.2 МПа·м^{1/2}).

ВЫВОДЫ

Проведены эксперименты по внедрению жесткого клина в клиновидную выемку с надрезом в торце компактных образцов с различным образом ориентированной текстурой по отношению к формируемой трещине (аналог метода Хиллемайера–Хильсдорфа для разрушения бетонных образцов, ранее для соляных пород не применявшегося). Определены средние показатели характеристик разрушения для горизонтальных скважин в боковой стенке выработки: касательного напряжения среза для боковых трещин (0.71 МПа), предельного давления для образования трещины отрыва (1.15 МПа), энергии, затрачиваемой на образование единицы площади трещины отрыва (0.97 Н/мм). Средние показатели для вертикальных скважин в кровле и почве выработки: $\tau_{cp} = 0.99$ МПа, $p_p = 1.64$ МПа, $\gamma = 0.98$ Н/мм. Предельное давление изменяется для образцов по пластам от 0.93 до 2.28 МПа, предельное давление для образования трещины в глинисто-ангидритовом прослое в 5 раз ниже (0.31 МПа). На основе критерия “energy-release rate” с применением пакета ANSYS определены параметры трещиностойкости для исследуемых пластов соляных пород. Значения K_{IC} находятся в пределах 0.12–0.24 МПа·м^{1/2}, значения G_{IC} — в пределах 1.2–4.0 Па·м. Соответствующие значения параметров трещиностойкости для глинисто-ангидритового прослоя: $K_{IC} = 0.034$ МПа·м^{1/2}, $G_{IC} = 0.51$ Па·м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алыменко Д. Н., Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Котляр Е. К. О видах крепи сопряжений шахтных стволов и приствольных выработок в соляных породах // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 46–54.
2. Проскураков Н. М., Пермьяков Р. С., Черников А. К. Физико-механические свойства соляных пород. — Л.: Недра, 1973. — 272 с.
3. Зильбершмидт В. Г., Зильбершмидт В. В., Наймарк О. Б. Разрушение соляных пород. — М.: Наука, 1992. — 144 с.
4. Аптуков В. Н., Митин В. Ю. Механические и фрактальные свойства поверхности кристаллов соляных пород в нанодиапазоне и их влияние на трещиностойкость и смачиваемость // ФТПРПИ. — 2016. — № 4. — С. 29–38.
5. Зильбершмидт В. Г., Спиркова С. И., Замесов Л. А. Развитие трещины в каменной соли при плоском сдвиге // Горн. журн. — 1982. — № 6. — С. 13–14.
6. Зильбершмидт В. Г., Тимантеев О. А., Митус А. П. Физические свойства горных пород Верхнекамского калийного месторождения. — Пермь: Перм. политехн. ин-т, 1979. — 60 с.
7. Evans A. G. and Chales E. A. Fracture toughness determination by indentation, J. Amer. Ceram. Soc., 1976, Vol. 59, No. 7. — P. 371–378.
8. Скрябина Н. Е., Зильбершмидт В. Г. Определение вязкости разрушения покровной каменной соли Верхнекамского калийного месторождения // Технология и безопасность разработки калийных месторождений. — 1991. — С. 124–129.
9. Чирков С. Е., Старосельский А. В., Присташ В. В. Методика определения вязкости разрушения (трещиностойкости). — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1990. — 14 с.
10. Зайцев Ю. В. Механика разрушения для строителей. — М.: Высш. шк., 1991. — 288 с.
11. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. — М.: Наука, 1974. — 312 с.

Поступила в редакцию 10/II 2020

После доработки 18/II 2020

Принята к публикации 10/IV 2020