

УДК 622.245.422

Орешкин Д.В. – доктор технических наук, профессор

E-mail: dmitrii_oreshkin@mail.ru

Королев Е.В. – доктор технических наук, профессор

E-mail: korolev@nocnt.ru

Семенов В.С. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: science-isa@yandex.ru

Московский государственный строительный университет

Адрес организации: 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Первушин Г.Н. – доктор технических наук, профессор

E-mail: isf@istu.ru

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова

Адрес организации: 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7

Истинная площадь разрушения облегчённых тампонажных материалов при равновесных испытаниях

Аннотация

В статье рассматривается методика определения истинной площади разрушения образцов тампонажного камня с облегчающими наполнителями при равновесных испытаниях. Приведены результаты исследований структуры и свойств облегчённого тампонажного камня. Определены удельные затраты энергии на старт, сопротивление росту локальной трещины и полное разрушение образцов. Сделан вывод о значительном увеличении истинной площади разрушения по сравнению с площадью поперечного сечения образца. Результаты рассмотрены с позиций механики разрушения.

Ключевые слова: тампонажные материалы, сверхлёгкий тампонажный раствор, полые стеклянные микросферы, истинная площадь разрушения, удельные параметры деформирования и разрушения, фрактографический анализ, трещиностойкость.

Необходимость увеличения добычи нефти и газа в России требует повышения качества тампонажных растворов. Это связано с тем, что чаще всего углеводородное сырьё залегает в зонах с многолетними мёрзлыми породами и/или в условиях аномально низких пластовых давлений. Такие грунты и горные породы имеют низкую несущую способность. Для этих условий требуются облегчённые или даже сверхлёгкие тампонажные растворы. Как показала практика, одним из лучших наполнителей для таких растворов являются полые стеклянные микросферы (ПСМС) [1-12].

Известно, что полые стеклянные микросферы равномерно распределяются в объёме тампонажного раствора и формируют однородную структуру [1-12]. Это обеспечивает однородность свойств [6-7]. За счет равномерного распределения микросфер и пор по объёму облегченного тампонажного камня повышаются его трещиностойкость и сопротивление росту локальной трещины. Повышению трещиностойкости камня также способствует поверхностная активность ПСМС. Микросферы комплексно проявляют адсорбционные, структурирующие и пуццоланические свойства, которые интенсифицируются с увеличением их содержания до 30...50 % от массы тампонажного портландцемента – ПЦТ [6]. В этом заключается специфическая роль микросфер в процессе структурообразования цементного камня. Это оказывает влияние на технологические и эксплуатационные свойства тампонажного материала. Микросферы вступают в химическое взаимодействие с продуктами ПЦТ, что повышает герметичность цементного кольца в затрубном и межтрубном пространстве.

В работе прочность определялась в возрасте 2 суток на образцах с размерами 4×4×16 см, хранившихся при температуре (20±2) °С. В состав раствора входили тампонажный портландцемент ПЦТ I-50 Топкинского завода, вспученный перлитовый песок (ВПП) ОАО «Стройперлит» (г. Мытищи, Московская область) марки М-75, насыпной плотностью 75 кг/м³. Использовались также аппретированные полые стеклянные микросферы (АПСМС), имеющие средний диаметр – 24,8 мкм. Они изготавливаются из натрийборосиликатного стекла. АПСМС и ПСМС производства Новгородского завода Стекловолокна имели среднюю плотность 250 кг/м³, насыпную

плотность 125 кг/м^3 , коэффициент заполнения объема $0,64$, прочность при объемном сжатии $9,6 \text{ МПа}$. Толщина стенки микросфер составляет от 1 до 2 мкм . АПСМС аппретированы γ -аминопропилтриэтоксисилоном с формулой $\text{NH}_2 (\text{CH}_2)_3 \cdot \text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$. В качестве пластифицирующей добавки использовался суперпластификатор С-3 (СП) Новомосковского завода. Расход суперпластификатора С-3 составлял $0,75 \%$ от массы ПЦТ. Тампонажные растворы имели одинаковую растекаемость по конусу КР-1 – 22 см . Свойства растворов определялись по ГОСТ РФ.

Одним из основных факторов применения ПСМС для цементирования нефтегазовых скважин является стабильность свойств тампонажного раствора в сложных горно-геологических условиях, которая обеспечивается особенностями производства и составом микросфер. В этом заключается основное отличие ПСМС от традиционных наполнителей.

Целью работы являлось определение истинной площади разрушения облегченного цементного тампонажного камня при равновесных испытаниях при трёхточечном изгибе с использованием методов механики разрушения.

В данной работе истинная площадь разрушения определялась с учетом микроструктурного анализа сколов образцов цементного камня с ПСМС, АПСМС и ВПП. Микроструктура цементного камня с АПСМС и ВПП представлена на рис. 1 и 2. Результаты испытаний приведены в табл. 1 и 2, а общий вид полностью равновесной диаграммы деформирования и разрушения образцов (ПРДД) – на рис. 3.

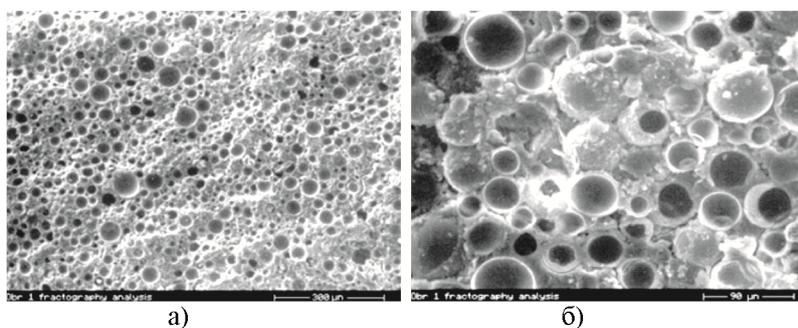


Рис. 1. Распределение 30 % АПСМС в цементном камне с С-3

Впервые фрактографический анализ облегченных тампонажных материалов был проведен в работах [8-11]. Он показал, что действительная площадь разрушения образцов существенно (до нескольких раз) превышает площадь их поперечного сечения. Однородность структуры тампонажных материалов с полыми стеклянными микросферами (рис. 1), позволила разработать методику расчета истинной площади разрушения камня.

Известно, что показатели трещиностойкости при изгибающих нагрузках в механике разрушения цементных материалов определяются по отношению затрачиваемой энергии ко всему поперечному сечению образца [13-16]. Сначала определялся путь прохождения локальной трещины после разрушения. Расчет площади разрушения производился по сколу, образованному после фрагментации образца на две части, что произошло после испытаний образцов на растяжение при трёхточечном изгибе.

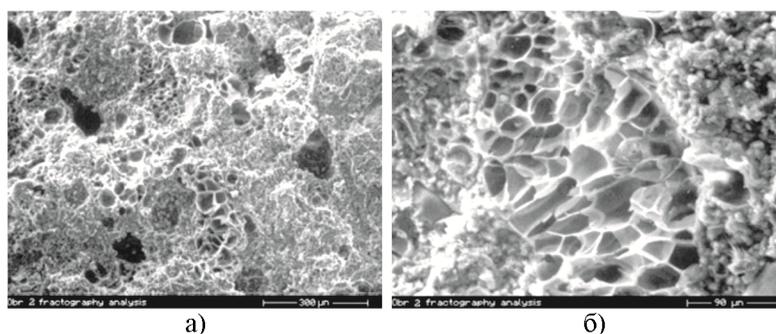


Рис. 2. Микроструктура тампонажного камня с 30 % ВВП

Таблица 1

Фрактографические показатели тампонажного камня

Состав, масс. %	Площадь участка, мкм ²	Длина линии рельефа, мкм		Площадь рельефной поверхности, мкм ²	Площадь разрушения, м ²
		Длина	Ширина		
100 ПЦТ	220991	2355	2654	6250170	0,0051
100 ПЦТ + 15 ВПП	45833	898	758	680684	0,0041
100 ПЦТ + 30 ВПП	44611	1046	930	972780	0,0045
100 ПЦТ + 10 АПСМС	47143	927	800	741600	0,00252
100 ПЦТ + 30 АПСМС	44917	986	811	799646	0,00285
100 ПЦТ + 50 АПСМС	47882	1100	907	998130	0,0033
100 ПЦТ + 10 АПСМС + С-3	46867	1020	793	708860	0,0028
100 ПЦТ + 30 АПСМС + С-3	43026	943	847	798721	0,0031
100 ПЦТ + 50 АПСМС + С-3	47771	1202	854	1025000	0,0041

где ПЦТ – портландцемент тампонажный; ВПП – вспученный перлитовый песок; АПСМС – аппретированные полые стеклянные микросферы; С-3 – суперпластификатор.

Таблица 2

Свойства и истинные удельные энергозатраты облегченного камня

Состав, масс. %	В/Ц	Средняя плотность раствора, кг/м ³	Прочность, МПа		Удельные энергозатраты* при изгибе, Дж/м ²		
			изгиб	сжатие	G _i	G _L	G _c
100 ПЦТ	0,5	1830	2,85	7,84	27,5	14,15	41,65
100 ПЦТ + 15 ВПП	1,0	1440	1,44	1,69	11	17,06	28,06
100 ПЦТ + 30 ВПП	1,6	1280	0,86	1,1	9,5	4,83	14,33
100 ПЦТ + 10 АПСМС	0,7	1410	1,75	7,7	22,7	29,77	52,47
100 ПЦТ + 30 АПСМС	1,1	900	1,3	2,16	13,4	16,36	29,76
100 ПЦТ + 50 АПСМС	1,5	780	0,8	1,5	9,0	7,41	16,41
100 ПЦТ + 10 АПСМС + С-3	0,45	1410	1,75	7,7	22,7	29,77	52,47
100 ПЦТ + 30 АПСМС + С-3	0,9	900	1,3	2,16	13,4	16,36	29,76
100 ПЦТ + 50 АПСМС + С-3	1,2	780	0,8	1,5	9,0	7,41	16,41

где G_i – удельные энергозатраты на инициирование локальной трещины (энергозатраты – участок ОАБ, отнесённые к площади поперечного сечения образца); G_L – участок БАВ и G_c – участок ОАВ (энергозатраты, отнесённые к площади разрушения образца) – удельные энергозатраты на сопротивление росту локальной трещины и полное разрушение образцов соответственно.

Был принят следующий порядок вычисления площади разрушения образцов:

- прямое измерение площади скола курвиметром;
- определение путем фрактографического анализа площади разрушения на участках, представленных на фотографиях микроструктуры;
- вычисление количества участков на определенной площади прямыми измерениями площади скола;
- вычисление общей поверхности разрушения и удельных энергозатрат на сопротивление росту локальной трещины и полное разрушение.

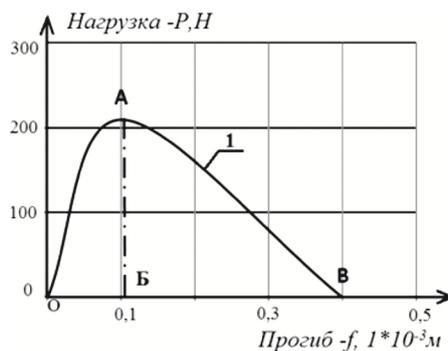


Рис. 3. Общий вид полностью равновесной диаграммы деформирования и разрушения облегченных цементных материалов

Таким образом, установлено, что невозможно получить облегченный тампонажный раствор с вспученным перлитовым песком со средней плотностью менее 1250 кг/м^3 при стандартной растекаемости и при выполнении требований по прочности и нерасслаиваемости. Проведенный анализ позволил заключить, что истинная площадь разрушения материала при трехточечном изгибе существенно выше площади поперечного сечения. Для образцов из чистого ПЦТ, с АПСМС и суперпластификатором С-3, а также с ВПП действительная площадь разрушения выше до полутора, двух и более раз по сравнению с площадью поперечного сечения образцов. Соответственно, это приводит к снижению удельных энергозатрат на сопротивление росту локальной трещины и полное разрушение.

Приведенный анализ также доказывает, что АПСМС являются лучшим наполнителем в облегченные цементные тампонажные растворы. По всем показателям трещиностойкости и сопротивления развитию трещин эти тампонажные материалы не имеют себе равных. Особенно это касается сверхлегких тампонажных растворов со средней плотностью менее 1000 кг/м^3 . Это способствует повышению надежности системы «цементная матрица – АПСМС» с точки зрения однородности раствора при креплении, трещиностойкости, прочности и коррозионной стойкости обсадных труб за счет рН среды, которая больше порога коррозии стали, т.е. 11,8. При прокачке тампонажного раствора на основе полых стеклянных микросфер не происходят его недоподъем до устья скважины, образование пустот по высоте, а также гидроразрывов пластов. Отпадает необходимость проведения сложных, дорогостоящих ремонтно-восстановительных работ, что уменьшает финансовые затраты.

Список библиографических ссылок

1. Орешкин Д.В. Материаловедческие аспекты геоэкологической безопасности при строительстве скважин // Вестник МГСУ, 2009, № 2. – С. 105-110.
2. Орешкин Д.В. Эффективные облегченные тампонажные растворы для условий аномально низких пластовых давлений и многолетнемёрзлых пород // Нефтяное хозяйство, 2008, № 1. – С. 50-53.
3. Орешкин Д.В. Облегченные и сверхлёгкие цементные растворы для строительства // Строительные материалы, 2010, № 6. – С. 34-37.
4. Орешкин Д.В., Беляев К.В., Семенов В.С. Теплофизические свойства, пористость и паропроницаемость облегченных цементных растворов // Строительные материалы, 2010, № 8. – С. 51-55.
5. Орешкин Д.В. Проблемы строительного материаловедения и производства строительных материалов // Строительные материалы, 2010, № 11. – С. 6-8.
6. Орешкин Д.В., Фролов А.А., Ипполитов В.В. Проблемы теплоизоляционных тампонажных материалов для условий многолетних мерзлых пород. – М.: Недра, 2004. – 232 с.
7. Первушин Г.Н., Орешкин Д.В. Проблемы трещиностойкости облегченных цементных материалов. – Ижевск: ИжГТУ, 2003. – 212 с.
8. Первушин Г.Н., Беляев К.В. Истинные показатели трещиностойкости облегченных и сверхлегких тампонажных материалов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море, 2005, № 4. – С. 43-46.
9. Орешкин Д.В., Семенов В.С., Первушин Г.Н. Фрактографическая оценка разрушения цементных материалов с полыми стеклянными микросферами при трёхточечном изгибе // Вестник МГСУ, 2009, Спецвыпуск № 3. – С. 128-132.
10. Орешкин Д.В., Первушин Г.Н. Истинная площадь разрушения цементного камня при изгибе // Вестник МГСУ, 2011, № 1. – С. 121-124.
11. Орешкин Д.В., Первушин Г.Н., Семенов В.С. Фрактографическая оценка разрушения цементных материалов с полыми стеклянными микросферами при трёхточечном изгибе // Технологии бетонов, 2010, № 3-4. – С. 52-55.
12. Орешкин Д.В., Перфилов В.А., Беляев К.В., Первушин Г.Н. Комплексная оценка трещиностойкости цементных материалов. – М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2012. – 168 с.
13. Зайцев Ю.В., Леонович С.Н. Прочность и долговечность конструкционных материалов: монография. – Минск: БНТУ, 2010. – 362 с.

14. Эберхардштайнер Й., Леонович С.Н., Зайцев Ю.В. Прочность и трещиностойкость конструкционных строительных материалов при многоосном напряженном состоянии. – Минск: БНТУ, 2012. – 522 с.
15. Леонович С.Н., Пирадов К.А. Расчет длины и ширины раскрытия трещины, развивающейся во времени // Вестник БНТУ, 2009, № 5. – С. 45-53.
16. Leonovich S. Non-destructive diagnostic methods of corrosion of concrete – lined tunnels / World Tunnel Congress 1997 on Tunnels for People, Vienna, AUSTRIA, 1997. – P. 197-200.

Oreshkin D.V. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: dmitrii_oreshkin@mail.ru

Korolev E.V. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: korolev@nocnt.ru

Semenov V.S. – candidate of technical sciences, associated professor

E-mail: science-isa@yandex.ru

Moscow state University of Civil Engineering

The organization address: 129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoe sh., 26

Pervushin G.N. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: isf@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University

The organization address: 426069, Russia, Izhevsk, Studencheskaya st., 7

The true area of destruction of lightweight backfill materials at the equilibrium tests

Resume

The article is dedicated to the questions of fracture mechanics of lightweight cement backfill materials. Oil and gas wells cementing in the hard conditions (at presence of permafrost or beds with low capacity) demands applying of lightweight backfill mortars. Hollow glass microspheres are the one of the best filler for such mortars. They provide the specified technological and physical-and-mechanical properties of mortars, and form the homogeneous structure of backfill stone as well. Properties of lightweight backfill materials with swollen perlite sand and dressed hollow glass microspheres were examined. It was shown, that the true area of destruction considerably increases in comparison with the cross-sectional area of the sample. The methodology of determine of true destruction area of lightweight backfill stone samples with lightweight filler at the equilibrium test was suggested. The research results of structure and properties of lightweight backfill stone are given. The specific energy consumption at the start, the local crack growth resistance and the total destruction of the samples were defined. The results are considered from the viewpoint of fracture mechanics. It was found that backfill materials with microspheres have no analogues concerning crack resistance parameters. Usage of such mortars furthers increasing of well structure reliability and reduction of building costs.

Keywords: backfill materials, super-lightweight backfill stone, hollow glass microspheres, true area of destruction, specific parameters of deformation and fracture, fracture graphic analysis, crack resistance.

Reference list

1. Oreshkin D.V. Material science aspects of ecological safety in wells building // Vestnik MGSU, 2009, № 2. – P. 105-110.
2. Oreshkin D.V. Effective lightened grouting mortars for conditions of anomalously low formation pressures and permafrost rocks // Neftyanoe khozyaistvo, 2008, № 1. – P. 50-53.
3. Oreshkin D.V. Light-weight and superlight cement mortars for construction // Stroitel'nye Materialy, 2010, № 6. – P. 34-37.
4. Oreshkin D.V., Belyaev K.V., Semenov V.S. Thermophysical properties, porosity and vapour permeability of light-weight cement mortars // Stroitel'nye Materialy, 2010, № 8. – P. 51-55.
5. Oreshkin D.V. Problems of building materiology and production of building materials // Stroitel'nye Materialy, 2010, № 11. – P. 6-8.

6. Oreshkin D.V., Frolov A.A., Ippolitov V.V. Problems of thermal insulating backfill materials for permafrost conditions. – M.: «Nedra» Publishing House, 2004. – 232 p.
7. Pervushin G.N., Oreshkin D.V. Problems of crack resistance of lightweight cement materials. – Izhevsk: Izhevsk State Technical University, 2003. – 212 p.
8. Pervushin G.N., Belyaev K.V. True parameters of crack resistance of lightweight and super-lightweight backfill materials // Stroitel'stvo nef'tjanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more, 2005, № 4. – P. 43-46.
9. Oreshkin D.V., Semenov V.S., Pervushin G.N. Fracture graphic estimation of destruction of cement materials with hollow glass microspheres at three-point bending test // Vestnik MGSU, 2009, Special issue № 3. – P. 128-132.
10. Oreshkin D.V., Pervushin G.N. True area of destruction of cement stone at bending test // Vestnik MGSU, 2011, № 1. – P. 121-124.
11. Oreshkin D.V., Pervushin G.N., Semenov V.S. Fracture graphic estimation of destruction of cement materials with hollow glass microspheres at three-point bending test // Tehnologii betonov, 2010, № 3-4. – P. 52-55.
12. Oreshkin D.V., Perfilov V.A., Belyaev K.V., Pervushin G.N. Complex estimation of crack resistance of cement materials. – M.: «MISI-MGSU» Publisher, 2012. – 168 p.
13. Zaytcev Yu.V., Leonovich S.N. Durability and longevity of construction materials: monograph. – Minsk: Belarusian national technical university, 2010. – 362 p.
14. Eberhardstainer J., Leonovich S.N., Zaytcev Yu.V. Durability and crack resistance of construction materials at multi-axis tensely state. – Minsk: Belarusian national technical university, 2012. – 522 p.
15. Leonovich S.N., Piradov K.A. Calculation of length and width of crack which is developing in time // Vestnik BNTU, 2009, № 5. – P. 45-53.
16. Leonovich S. Non-destructive diagnostic methods of corrosion of concrete – lined tunnels / World Tunnel Congress 1997 on Tunnels for People, Vienna, AUSTRIA, 1997. – P. 197-200.