

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИТОВ С МЕЛКОДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ
(ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ)**

А.Ю. ЕРШОВА, кандидат технических наук, доцент
М.И. МАРТИРОСОВ, кандидат технических наук, доцент
Московский авиационный институт (НИУ) МАИ
125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Yershova_A@mail.ru

В данной статье представлено экспериментальное изучение механических характеристик нового вида мелкозернистых полимерных композитов – литьевого искусственного камня, разработка методики и проведение экспериментов по определению характеристик трещиностойкости данного материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экспериментальные исследования, вязкость разрушения материала, полимерные композиционные материалы, зернистые композиты, литьевой искусственный камень.

Благодаря своим свойствам и механическим характеристикам одним из наиболее интересных и перспективных видов полимерных зернистых композитов является литьевой искусственный камень (ЛИК). Это обусловлено целым рядом преимуществ ЛИК, выгодно отличающими его от ряда традиционных конструкционных материалов. В настоящее время литьевая технология позволяет изготавливать изделия практически любой сложности, в котором будут сохранены природные качества и внешний вид натурального камня. Механические характеристики этого материала сопоставимы с характеристиками натурального камня. Он не изменяет цвет со временем. Готовое изделие из ЛИК характеризуется однородной структурой и малой пористостью. Этот материал стоек к колебаниям температуры окружающей среды. Он обладает высоким шумопоглощением, низкой теплопроводностью (высокая теплоизоляционная способность), высокой электроизоляционной способностью, высокими антибактериальными характеристиками, износостойкостью. В отличие от природного камня, материалу присуще отсутствие радиоактивного фона, стойкость к некоторым химически агрессивным средам и коррозии, способность к восприятию ударных и вибрационных нагрузок. ЛИК легко поддается механической обработке, а также склеиванию и монтажу, обладает ремонтпригодностью. В данной технологии возможно использовать отходы

производства (например, мраморную крошку), сравнительно небольшие производственные площади, невысокую стоимость производства (меньшие затраты электроэнергии).

Изделия из ЛИК имеют длительный срок эксплуатации, отличное качество поверхности, красивый внешний вид. Материал полностью приспособлен для производства изделий, отвечающих требованиям современного дизайна. ЛИК представляет собой конструкционный композиционный материал, основными компонентами которого, являются ненасыщенная полиэфирная смола и инертный зернистый наполнитель. В зависимости от используемой смолы и наполнителя можно имитировать цвет и фактуру натурального природного камня: мрамора, малахита, змеевика, оникса, гранита, яшмы и т.д. Он не содержит вредных для здоровья веществ, не токсичен, у него полностью отсутствует радиоактивный фон, присущий декоративным природным камням.

В настоящее время известны ограниченные исследования механических характеристик ЛИК, необходимых для оценки работоспособности элементов конструкций из этих материалов. [1,2] В данной работе представлены результаты экспериментального исследования механических свойств ЛИК на основе ненасыщенных полиэфиров, используемого в различных областях современной техники и строительстве. В продолжение серии работ по определению механических характеристик ЛИК, в данной работе характеристики вязкости разрушения материала определена методом податливости по результатам испытаний образцов - брусков с центральными краевыми надрезами. Проведено сопоставление механических характеристик материала, полученных при различных видах испытаний.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

В данной работе свойства ЛИК определены по результатам испытаний образцов материала на универсальной испытательной машине ZWICK Z100, производства Германии. Эта испытательная машина предназначена для измерений силы и деформации в процессе испытания конструкционных материалов на растяжение и сжатие. Использование простого приспособления позволяет проводить на машине испытания на изгиб. В предлагаемой работе установка использовалась для проведения испытаний образцов ЛИК на растяжение, сжатие и изгиб при монотонных режимах нагружения. По результатам испытаний были определены предел прочности, модуль упругости [3] и вязкость разрушения материала. Для определения вязкости разрушения использовалось простое приспособление, позволяющее проводить испытания на трехточечный изгиб образцов - брусков с надрезами. В процессе испытания получены экспериментальные диаграммы сила-прогиб, которые использовались для идентификации необходимой зависимости податливости бруса (образца) от глубины надреза и предельных значений коэффициента интенсивности напряжений.

Стандартных методик определения характеристик механики разрушения для горных пород и литьевого искусственного камня не существует. В этой связи испытания по оценке характеристик трещиностойкости исследуемого ЛИК проведены в соответствии с рекомендациями по определению вязкости разрушения металлов [4]. В соответствии с указанными рекомендациями, испытания по определению вязкости разрушения ЛИК проведены в режиме трехточечного изгиба на образцах-брусках прямоугольного сечения с краевыми надрезами (рис. 1). Схема нагружения представлена на рис. 2. Образцы вырезались из пластины ЛИК толщиной 10мм, общая длина образца составляет 120 мм, высота 20 мм. Расстояние между опорами составило 100 мм.

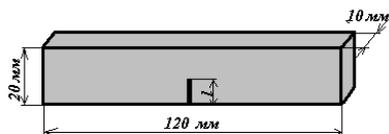


Рис. 1. Образец с надрезом для проведения испытаний на трехточечный изгиб для определения характеристик трещиностойкости литьевого искусственного камня

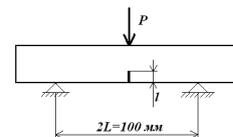


Рис. 2. Схема нагружения образца с надрезом для трехточечного изгиба

Глубина надреза варьировалась на 4-х уровнях и составляла 5, 7,5, 10 и 12 мм. Нагружение образца осуществлялось при скорости увеличения прогиба 0,2 м/с. В процессе испытаний регистрировалась экспериментальная зависимость перерезывающей силы от величины прогиба образца.

Для определения вязкости разрушения использовалось простое приспособление, входящее в комплект установки и позволяющее проводить испытания на трехточечный изгиб образцов-брусков с надрезами [4]. Характеристики трещиностойкости материала определены в соответствии с методом податливости и методом *K*-тарировки по результатам испытаний на трехточечный изгиб образцов-брусков с единичными краевыми надрезами (рис. 2.6). Для определения зависимости податливости от производной по относительной длине трещины образцы подвергались предварительному нагружению до прогиба 0,2 мм. Испытание проводилось при скорости изменения прогиба 0,2 мм/с и постоянной температуре $T = 20^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$. Для изготовления образцов использовалась тиксотропная ненасыщенная полиэфирная смола производства фирмы ASHLAND, США. В качестве наполнителя применялись кварцевый песок, мраморная крошка и ряд других материалов. По объему содержание ненасыщенной полиэфирной смолы составляет ~20%, наполнителя применяют не менее 80% [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Одной из важнейших характеристик определяющих работоспособность изделий и конструкций из хрупких материалов, является вязкость разрушения, определяющая сопротивление материала к образованию и развитию трещин. По своей природе, это существенно неоднородный материал с относительно пластичной полимерной матрицей-связующим и жестким наполнителем. Другим источником неоднородности является литьевая технология переработки ЛИК, которая не исключает возможности формирования дефектов в процессе изготовления изделий в виде раковин, пор и расслоений на межфазной границе. Наличие таких дефектов не мешает считать материал однородным при рассмотрении процессов деформирования и определения характеристик прочности.

В то же время, процесс разрушения сопровождается образованием и развитием трещин, формирующихся на неоднородностях (дефектах) при нагружении материала. В этой связи для оценки работоспособности ответственных изделий из литьевого искусственного камня следует руководствоваться не только средними значениями прочности, но также характеристиками сопротивления материала развитию трещин. Представляется целесообразным в этих случаях применять известные методы и подходы линейной механики разрушения, предполагающие использование критериальных оценок сопротивления материала развитию дефектов – трещин [4, 5].

В данной работе для определения характеристик трещиностойкости исследуемого ЛИК использованы метод податливости для определения интенсивности высвобождения энергии G_{IC} и метод *K*-тарировки для определения критического значения коэффициента интенсивности напряжений. В соответствии с методом

податливости проведена серия испытаний на трехточечный изгиб образцов-брусков прямоугольного сечения с центральными краевыми надрезами [4].

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости сосредоточенной силы P от перемещения δ , полученные при испытании образцов с глубиной надреза 5 и 12 мм. Подобные данные использовались для определения экспериментальной зависимости податливости бруса λ от относительной длины трещины (надреза) l/b . Естественной особенностью этой зависимости является то, что податливость возрастает с увеличением глубины надреза и для аппроксимации экспериментальной зависимости возможно использовать монотонную функцию (в работе применялась экспоненциальная функция).

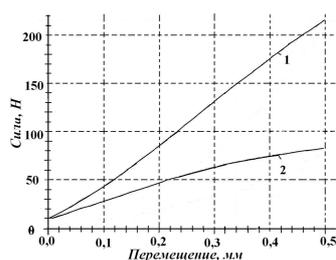


Рис. 3 Экспериментальная зависимость сосредоточенной силы P от перемещения δ образцов с различными размерами надрезов: 1- 5мм, 2-12 мм

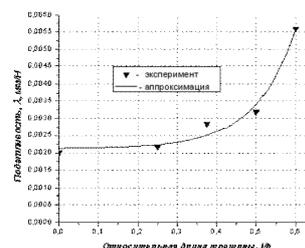


Рис. 4 Зависимость податливости λ от относительной длины трещины l/b

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость податливости λ от относительной длины исходной трещины (надреза) l/b . Полученная зависимость $\lambda(l/b)$ аппроксимировалась экспоненциальной зависимостью:

$$\lambda(\beta) = 2,12 \cdot 10^{-3} + 9,7448 \cdot 10^{-6} \exp(0,1023\beta), \beta = l/b \quad (1)$$

В соответствии с принятой методикой вязкость разрушения определяется по формуле

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2hb} \cdot \frac{d\lambda}{d\beta} \quad (2)$$

Значения производной податливости по относительной длине трещины находились по принятой аппроксимации (1).

Экспериментальные оценки вязкости разрушения исследуемого ЛИК получены для следующих надрезов: $l = 5$ мм и $l = 12$ мм. Разрушающие нагрузки составляли

$P_{кр} = 212$ Н и $P_{кр} = 83$ Н, соответственно. В результате для этих двух вариантов надрезов по формуле (2) получены такие значения интенсивности высвобождения энергии: $G_{IC} = 110,1$ Н/м, $G_{IC} = 57,7$ Н/м. Различия в значениях интенсивности высвобождения энергии для образцов с различной глубиной надреза обусловлены естественным разбросом свойств материала и погрешностями измерений.

Экспериментальные данные, полученные при испытаниях на изгиб образцов с надрезами, позволяют определить другую характеристику трещиностойкости материала – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} . Для этого использовался так называемый метод K -тарировки. В соответствии с этим методом K_{IC} определяется как предельное значение коэффициента интенсивности напряжений при изгибе образца с трещиной с заданными геометрическими размерами [4],

$$K_{IC} hb^2/(P_{кр}l^{1/2}) = Y_1(\beta), \quad (3)$$

где $P_{кр}$ – предельное значение силы, соответствующее разрушению образца; h и b – высота и толщина образца; l – глубина исходной трещины; $Y_1(\beta)$ – поправочный коэффициент, учитывающий конечные размеры образца. Для выбранной геометрии образца и схемы испытания функция $Y_1(\beta)$ имеет вид [6]:

$$Y_1(\beta) = 1,0375 - 2,99\beta + 14,3125\beta^2 - 24,8275\beta^3 + 25,655\beta^4,$$

$$Y_1(\beta) = A_0 + A_1\beta + A_2\beta^2 + A_3\beta^3 + A_4\beta^4. \quad (4)$$

В результате вычислений по формуле (3) получены следующие значения K_{IC} исследуемого материала для надрезов глубиной $l=5$ мм и $l=12$ мм:

$$K_{IC} = 1,11 \text{ МПа м}^{1/2} \text{ и } K_{IC} = 1,1 \text{ МПа м}^{1/2}.$$

Соотношения линейной механики разрушения, использованные для оценки сопротивления хрупкого разрушения образцов из рассматриваемого ЛИК, позволяют вычислить интенсивность высвобождения энергии G_{IC} по известным значениям K_{IC} и упругим характеристикам материала, полученным в работе [3]:

$$G_{IC} = k K_{IC}^2/E, \quad (5)$$

где множитель k зависит от типа нагружения. Для выбранной схемы испытаний $k = 1 - \mu^2$, где μ – коэффициент Пуассона, полученный в [3]. С использованием полученных в работе значений K_{IC} и упругих характеристик материала ($E = 14\,300$ МПа, $\mu = 0,276$) [3,6] расчетные значения G_{IC} для указанных двух надрезов таковы: $G_{IC} = 77,1$ Н/м и $G_{IC} = 63,8$ Н/м, что удовлетворительно согласуется со значениями, полученными при использовании метода податливости.

В работе [7] приведены следующие характеристики натурального гранита: $K_{IC} = 1,08$ МПа·м^{1/2}, предел прочности при растяжении $\sigma_B = 19,5$ МПа. Следует отметить, что вязкость разрушения ЛИК практически совпадает с этой характеристикой для гранита. Данные по прочности натурального материала несколько отличаются от данных для ЛИК, представленных в настоящей работе. Тем не менее, следует отметить, что для натуральных пород (в том числе и для гранита) имеет место большой разброс величин механических характеристик. Так в работе [8] значения модуля упругости для гранита приведены в пределах от 35 000 МПа до 100 000 МПа. Характеристики натурального гранита зависят от многих факторов, например, от месторождения данного камня, от глубины залегания, геологического строения массива и проч.

ВЫВОДЫ

В продолжение серии исследований по определению механических характеристик литьевого искусственного камня с использованием современного измерительного оборудования [3] в данной работе впервые определены характеристики трещиностойкости исследуемого материала. Методами податливости и К-тарировки получены экспериментальные значения характеристик вязкости разрушения исследуемого материала: интенсивности высвобождения энергии, G_{IC} и критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} . В соответствии с методом проведена серия испытаний на трехточечный изгиб образцов-брусков прямоугольного сечения с центральными краевыми надрезами. Полученные значения механических характеристик материала сопоставимы с аналогичными характеристиками натурального камня. С учетом значительных технологических преимуществ ЛИК можно сделать вывод о целесообразности использования этого материала в качестве заменяющего натуральный камень в строительных конструкциях.

Л и т е р а т у р а

1. Ершова А.Ю., Мартиросов М.И. Композиты на основе ненасыщенной полиэфирной смолы и мелкодисперсного наполнителя (теория и эксперимент) // Труды 2-й Межд. конф. «Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела».- Казань.: Казан. гос. ун-т, 2009. - С.167-169.
2. Ершова А.Ю., Мартиросов М.И. Механические испытания композиционных материалов с мелкодисперсным наполнителем // Сб. трудов 8-й Межд. научно-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности».- СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2009. - С. 86-87.
3. Ершова А.Ю., Мартиросов М.И. Экспериментальные исследования полимерных композитов с мелкодисперсным наполнителем (испытания на растяжение-сжатие)// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2014. – № 5. – С. 61-69.
4. Браун У., Сроули Дж. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. – М.: Мир, 1972. – 246 с.
5. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. – М.:Наука., 1987. – 80 с.
6. Uchigata M., Itaoka M., Sato K., Hashida T. Numerical Simulation of Propagation with Shear Slip Induced by Hydraulic Fracturing. Nihon kikai gakkai ronbunshu. A Trans. Jap. Spc. Mech. Engl.A. – 2006. – V. 72, №716. – P. 419-424.
7. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Смирнов В.И., Кривошеев С.И. Прогнозирование динамической вязкости разрушения горных пород // Проблемы механики деформируемых твердых тел и горных пород. Сб. статей к 75-летию Е.И. Шемякина. - М.: Физматлит, 2006. С.484-496.
8. Абрамсон М.Г., Байдюк Б.В., Зарецкий В.С. Справочник по механическим и абразивным свойствам горных пород нефтяных и газовых месторождений. – М.: Недра, 1984. – 207 с.

Reference

- 1.Ershova, AYu, Martirosov, MI (2009). Composites based on unsaturated polyester resins and fine-grained filler (theory and experiment). Proc. of the 2nd International Conference "Problems of Nonlinear Solid Mechanics".- Kazan: Kazan state University, p. 167-169.
- 2.Ershova, AYu, Martirosov, MI (2009). Mechanical testing of composite materials with fine filler. Proc. of the 8th International Scientific-Practical Conference "Research, Development and Application of High Technologies in Industry", SPb.: Publishing house Polytechn. University, p. 86-87.
- 3.Ershova, AYu, Martirosov, MI (2014). Experimental studies of polymer composites with fine filler (test expansion-comprsssion). *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, No. 5, p. 61-69.
- 4.Brown, U, Crawly, J (1972). *Testing of High Strength Metallic Materials on the Fracture Toughness under Plane Deformation*, M.: Mir, 207p.
- 5.Rabotnov, YuN (1987). *Introduction to Fracture Mechanics*. M.: Nauka., 80 p.
- 6.Uchigata, M, Itaoka, M., Sato, K, Hashida, T (2006). Numerical Simulation of Propagation with Shear Slip Induced by Hydraulic Fracturing. *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu (A Trans. Jap. Spc. Mech. Engl. A.)*, Vol. 72, №716, p. 419-424.
- 7.Morozov, NF, Petrov, YuV, Smirnov, VI, Krivosheev, SR (2006). Prediction of dynamic fracture toughness of rocks. *Problems of mechanics of deformable solids and rocks*. Collection of articles for the 75th anniversary of H. Shemyakin, M.: Fizmatlit, 496 p.
- 8.Abramson, MG, Baidyk, BV, Zaretsky, VS (1984). *Reference Mechanical and Abrasive Properties of Rocks of Oil and Gas Fields*. M.: Nedra, 207 p.

**EXPERIMENTAL STUDIES OF POLYMER COMPOSITES WITH FINELY
DISPERSED FILLER (BEND TEST)**

A.U. Yershova, M.I. Martirosov

Moscow Aviation Institute (National Research University)

This article presents an experimental study of the mechanical characteristics of new type fine polymer composites - injection artificial stone, the development of techniques and experiments for the characterization of fracture toughness of this material.

KEY WORDS: experimental studies, the fracture toughness of the material, polymer composite materials, granular composites, injection molding artificial stone.