

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И РАЗРУШЕНИЯ КАМНЕЛИТЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ

М.Н. Игнатов¹, А.М. Игнатова¹, А.О. Артемов¹, В.А. Асанов²

Пермский государственный технический университет
614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, корпус А, к. 120

Пермский государственный университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, 8 корпус ПГУ, ауд. 416

В работе представлены результаты лабораторных исследований акустической эмиссии при одноосном сжатии образцов камнелитых материалов на основе симиналов. Установлено, что разрушению образцов предшествует акустическая активность, вызванная структурными преобразованиями в материале, и накопление межструктурных напряжений в материале. Характер акустической эмиссии и величина нагрузки, которую выдерживает материал, зависят от количества аморфной составляющей в его структуре.

Ключевые слова: *каменное литье, синтетические минеральные сплавы, напряженно-деформированное состояние, акустическая эмиссия, разрушение, трещины.*

В процессе эксплуатации элементы различных конструкций испытывают на себе механическое воздействие определенного типа. Примером тому служат конструкции для укрепления шахт, которые работают на сжатие и практически не испытывают изгибающих или ударных нагрузок [1]. В таких случаях рационально использовать конструкционные материалы, у которых максимально выражены прочностные характеристики именно при работе на сжатие. Таковыми являются камнелитые материалы, полученные на основе симиналов (синтетических минеральных сплавов) по технологии каменного литья. Это технология подразумевает получение огненно-жидких расплавов из минерального или техногенного оксидного сырья (основного по химическому составу) и изготовление из них отливок [2]. В настоящее время известны количественные показатели механических характеристик камнелитых изделий, а также имеются данные о характере их деформации и разрушения под действием сжимающих нагрузок [3]. Камнелитые материалы являются хрупкими, они практически не испытывают упругих деформаций, их разрушение происходит за короткий промежуток времени. Согласно данным последних исследований, скоротечному разрушению предшествуют внутреннее накопление напряжений, структурные изменения и другие процессы, приводящие к скорейшей разгрузке, которая и проявляется как макроразрушение [4-6]. Установление начала процессов, предшествующих разрушению, позволило бы продлевать срок службы конструкций из хрупких материалов и предупреждать их разрушение. Поэтому изучение процессов деформирования камнелитых материалов в предразрушающей области нагружения является актуальным.

По своей природе камнелитые материалы схожи с плотными основными и ультраосновными горными породами, т. е. они анизотропны и состоят как минимум из

Михаил Николаевич Игнатов – д.т.н., профессор.

Анна Михайловна Игнатова – ассистент.

Арсений Олегович Артемов – ассистент.

Владимир Андреевич Асанов – д.т.н., профессор.

трех структурных составляющих (как правило, это пироксены, оливин, аморфная кремнеземистая составляющая и т. д.) [7-9]. Исследования, проведенные нами ранее, доказывают, что процессы деформирования и разрушения камнелитых материалов и горных пород схожи, а значит и явления, предшествующие разрушению, аналогичны [10].

Характер процессов деформирования камнелитых материалов в предразрушающей области нагружения позволяет определить, какие изменения в материале являются предвестниками его разрушения. Ранее признаком предстоящего разрушения считалось явление дилатансии, то есть увеличения объема материала при сжатии [11]. Однако дилатансия – не первый и не единственный предвестник разрушений. Известно, что при воздействии на камнелитые материалы сжимающих нагрузок в них происходят структурные изменения различной природы (полиморфизм аморфной структурной составляющей и т. д.), которые, вероятнее всего, и приводят к началу накопления напряжений, которые при разгрузке приводят к образованию очагов разрушения. В процессе структурных преобразований, накопления напряжений, начала разгрузки и развития трещин возникают акустическая (АЭ) и электромагнитная эмиссии [12]. Акустическая эмиссия (АЭ) – излучение упругих волн, возникающее в процессе перестройки внутренней структуры твердых тел. АЭ проявляется при пластической деформации твердых материалов, при возникновении и развитии в них дефектов, например при образовании трещин, при фазовых превращениях, связанных с изменением кристаллической решетки, а также при резании твердых материалов [13]. Целью контроля АЭ обычно является обнаружение, определение координат и слежение (мониторинг) за источниками акустической эмиссии. Метод АЭ может быть использован также для оценки скорости развития дефекта в целях заблаговременного прекращения эксплуатации или испытаний и предотвращения разрушения изделия [14]. Известно, что АЭ развивается с нарастанием интенсивности и достигает максимального значения во время макроразрушения [15].

Целью настоящего исследования является изучение акустических колебаний, возникающих в камнелитых материалах на основе симиналов под воздействием сжимающей нагрузки.

Объектом исследования является камнелитый материал, полученный на основе базальтового симинала. Его химический состав представлен в таблице.

Химический состав камнелитого материала на основе базальтового симинала, %

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O+Na ₂ O	FeO	Fe ₂ O ₃
45,5	1,7	15	12	11,5	2,4	9,1	3,5

В рамках данного исследования испытания на сжатие проводились на универсальной испытательной машине (УИМ) марки Zwick-Z250 (Германия).

Все изменения, происходящие в ходе испытания, а также все входные и выходные значения фиксировались и обрабатывались с помощью универсального программного обеспечения TestXpert, которое входит в комплектацию установки. Регистрацию акустической эмиссии осуществляли с помощью акустико-эмиссионного комплекса АЕС-USB-8. Комплекс предназначен для приема по 8 каналам сигналов акустической эмиссии и их обработки, обеспечения регистрации информативных параметров, а также определения координат источников акустической эмиссии в линейных объектах или на плоскостях по измеренным значениям разности времен прихода сигналов к преобразователю акустической эмиссии. Работа комплекса основана на принципе приема сигналов акустической эмиссии, вызванных ростом тре-

щин или развитием любого дефекта, с преобразованием их в электрические сигналы и их дальнейшей обработкой с целью обеспечения индикации и регистрации информативных параметров.

Образцы для испытания были подготовлены с соблюдением рекомендуемого соотношения ($h/a \approx 2$). Образцы были вырезаны из камнелитого изделия, полученного методом литья в постоянную металлическую форму, из определенной части отливки, что является важным условием, поскольку в зависимости от того, из какой части образец был вырезан, он имеет различную структуру. Образец №1 был вырезан из части отливки, контактирующей с формой, его структура отличается высоким содержанием аморфной составляющей (более 50%). Образец №2 был вырезан из переходной зоны между поверхностной и внутренней частями отливки, его структура мелкозернистая, содержание аморфной фазы – не более 10%. Образцы №3 и №4 были вырезаны из сердцевины отливки, их структура относительно крупнозернистая, а содержание аморфной фазы – не более 5%. Скорость нагружения при проведении испытания составляла 1 мм/мин.

В ходе испытаний были получены графические диаграммы, характеризующие рост нагрузки и активность АЭ в течение времени испытания. Результаты представлены на рисунке. На зависимостях интенсивности акустических колебаний отмечены «спонтанные» всплески акустической активности.

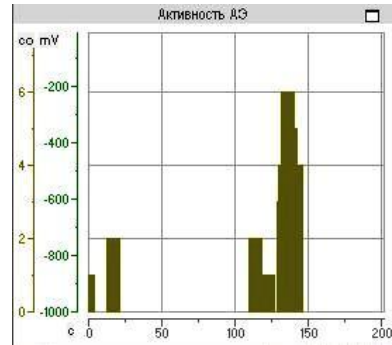
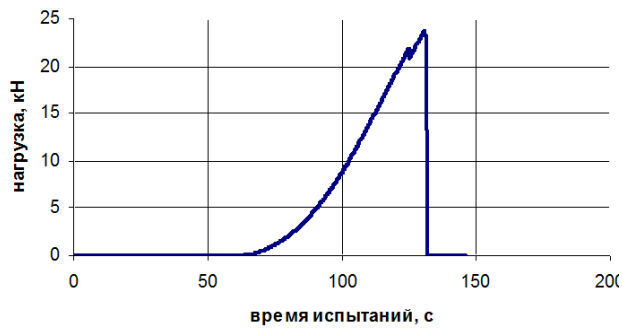
При испытаниях образца №1 зафиксировано два незначительных всплеска акустической активности, равных 2,3 мВ при нагрузках 0 и 23 кН. В первом случае это, очевидно, погрешность, вызванная отклонением грани образца от параллельности. Пик колебаний пришелся на отметку 6 мВ, что соответствовало разрушению образца при нагрузке 25 кН.

При испытаниях образца №2 зафиксирована серия небольших всплесков акустической активности, равных 1 мВ при нагрузке в 3, 5 и 6 кН, и один всплеск, равный 2 мВ при нагрузке 17 кН. Разрушение произошло при нагрузке 23 кН при акустической активности 13 мВ. Так же, как и в предыдущем случае, всем всплескам акустической активности соответствовали характерные пики на зависимости нагрузки от времени.

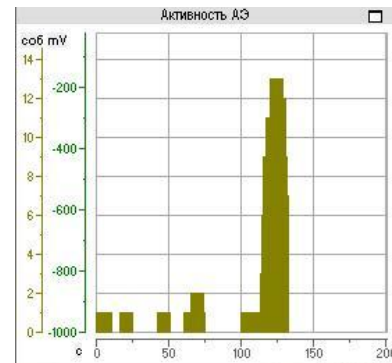
При испытаниях образца №3 зафиксировано несколько колебаний в диапазоне от 1 до 2 мВ, которым соответствовали значения нагрузки в диапазоне от 2 до 8 кН. На этом участке выделяется невысокий пик при незначительной нагрузке в 3 кН. Разрушение образца произошло при нагрузке 34 кН, ему соответствовала акустическая активность, равная 16 мВ. Разрушению предшествовало нарастание акустической активности в течение 20-22 сек. начиная с 5 мВ.

Наиболее интересный характер акустической активности разрушения наблюдали при испытании образца №4. Перед разрушением образца, которое произошло при нагрузке 33 кН и акустической активности 16 мВ, зафиксирован мощнейший всплеск акустической активности, равный 18 мВ при нагрузке в 5 кН. Самому разрушению предшествовало постепенное нарастание активности начиная от 2 мВ в течение 45 сек.

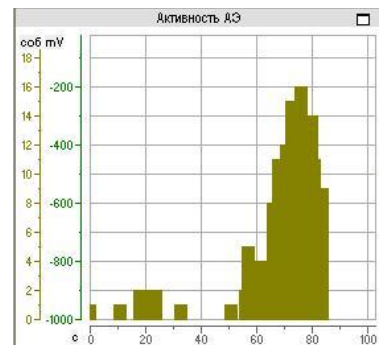
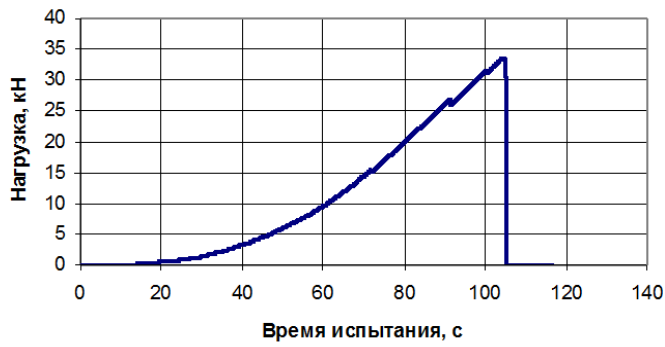
Во всех случаях перед разрушением на диаграммах, отражающих зависимость величины нагрузки от времени, зафиксированы характерные пилообразные пики. Общей тенденцией является то, что длительность нарастания акустической активности всегда превышала длительность ее затухания.



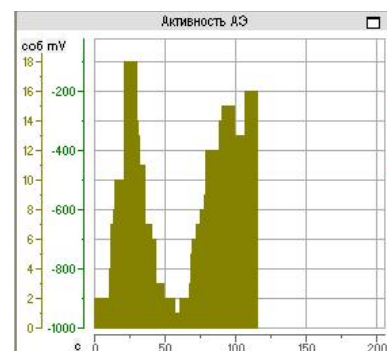
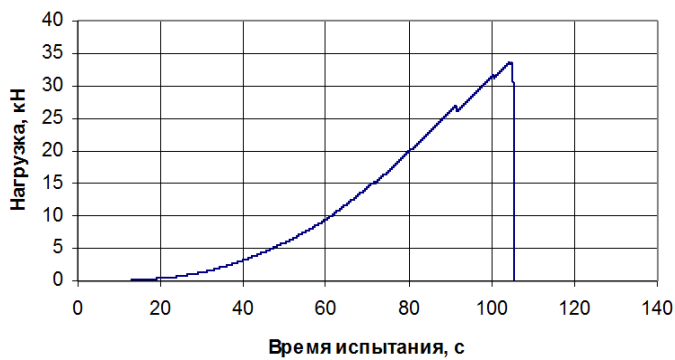
a



б



в



г

Результаты испытаний камнелитых базальтовых материалов на сжатие с регистрацией акустической эмиссии:

a – образец №1; *б* – образец №2; *в* – образец №3; *г* – образец №4

При анализе полученных результатов было обнаружено, что всплески акустической активности можно разделить на два типа. Первый тип – это те колебания, которые после возникновения затухали, а второй тип – колебания, которые нарастали и завершались разрушением образца.

Колебания первого типа были вызваны, на наш взгляд, структурными изменениями в материале. Как уже было отмечено ранее, структура материала анизотропная, содержит в своем составе как кристаллические, так и аморфные составляющие. Эти составляющие реагируют на воздействие сжимающей нагрузки неодинаковым образом, поскольку обладают различной плотностью и твердостью. Проведенные нами ранние исследования по методу наноиндентирования показывают, что наиболее «мягким» структурным составляющим является аморфная фаза, показатель ее твердости не превышает 2,5 ГПа, а данные рентгеноспектрального микронзондового анализа свидетельствуют о высоком содержании диоксида кремния в ней (более 87%) [16]. В силу малой твердости это структурное составляющее больше подвержено деформации и именно оно принимает на себя первичные нагрузки. Учитывая химический состав этого составляющего, можно сказать, что структурные изменения, вызвавшие всплеск акустической активности, относятся к разряду полиморфных. Известно, что основным элементом структуры аморфной фазы является кремнекислородный тетраэдр, а в зависимости от полиморфной модификации эти тетраэдры расположены под определенным углом друг к другу и под воздействием деформации поворачиваются, занимая более выгодно положение; упаковка их становится плотнее [17]. Такие структурные изменения не приводят к образованию начальных разрушений, о чем свидетельствует затухание колебаний.

Колебания второго типа свидетельствуют о том, что в материале началось накопление межструктурных напряжений, резкий всплеск активности говорит об их локализации. В пользу этого свидетельствует то, что при разрушении образцы раскалываются на множество осколков, а траектория трещин ориентирована строго вдоль образца. Нарастающий характер колебаний в зоне перед разрушением говорит о быстром росте трещин в зависимости от размера, сопоставимого с размером структурных элементов до макромасштаба. Время роста трещины соответствует периоду времени от начала нарастания колебаний до достижения ими пика. Этот период длится до 12 сек. Это говорит о том, что разрушения, вызванные деформацией в материале каменного литья, имеют скоротечный характер.

Прослеживается четкая тенденция: чем меньше в структуре доля аморфной составляющей, тем большую нагрузку может выдержать образец материала. Характер проявления акустической активности у образцов с различной структурой также имеет ярко выраженные особенности. Чем больше в структуре аморфной составляющей, тем стремительнее в ней развивается разрушение. Вероятно, это объясняется тем, что в образцах с большей долей кристаллических составляющих рост трещины затормаживается механически на границах составляющих.

Учитывая, что в реальных условиях эксплуатируемые изделия сочетают в себе различные типы структур, можно предположить, что процессы, предвещающие начало развития трещин и разрушения, соответственно зарождаются в поверхностных слоях, имеющих высокую долю содержания аморфной фазы. Сердцевина камнелитых отливок является более стойкой к сжимающим нагрузкам, она не позволяет трещинам, зародившимся в поверхностном слое, развиваться, локализует первичные признаки разрушения, соразмерные со структурными составляющими. Однако укрупнение размера кристаллических составляющих негативно сказывается на прочностных показателях – это показывает разница в результатах, полученных при испы-

тании образцов №3 и №4. Так, в первом случае структура была мелкозернистая, во втором крупнозернистая; именно во втором случае предвестником разрушения явилось сильнейшее колебание, по всей видимости, возникшее в результате образования микротрещины.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов установлен характер акустической активности при воздействии на камнелитой материал сжимающей нагрузки. Установлено, что разрушению предшествует ряд структурных превращений в аморфной фазе, затем начинается период накопления локальных межструктурных напряжений, структурные напряжения релаксируются за счет образования и быстрого роста трещин, которые и приводят к разрушению образца. Установлено, что характер акустических колебаний зависит от величины аморфной составляющей структуры: чем ее больше, тем быстрее происходит разрушение и тем меньше проявляются предразрушающие процессы. Поскольку структура отливок неоднородна, то и разрушение их происходит неравномерно. Начало разрушения, как правило, зарождается в поверхностных остеклованных слоях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Заславский Ю.З.* Исследования проявлений горного давления в капитальных выработках угольных шахт Донецкого бассейна. – М.: Недра, 1966. – 180 с.
2. *Игнатова А.М., Каминский М.М., Попов В.Л.* Технология переработки ультраосновных магматических горных пород. – Сб. трудов II НПК молодых ученых и специалистов «Геология, поиски и комплексная оценка твердых полезных ископаемых». – Москва: ВИМС, 2009. – С. 46.
3. *Игнатова А.М., Мерзляков А.Ф., Ханов А.М.* Методика и оборудование определения предела механической прочности на сжатие литых образцов синтетических минеральных сплавов // Вестник Пермского гос. техн. ун-та «Машиностроение. Материаловедение». – №3, т.12. – 2010. – 126-134 с.
4. *Шемякин Е.И.* О свободном разрушении твердых тел // Докл. АН СССР, 1988, т. 300. С. 1090-1094.
5. *Спивак А.И.* Механика горных пород. – М., 1967. – 192 с.
6. *Александров А.В., Потапов В.Д.* Основы теории упругости и пластичности. – М.: Наука, 1990. – 400 с.
7. *Саранчина Г.М., Шинкарев Н.Ф.* Петрография магматических и метаморфических пород. – М: Недра, 1967.
8. *Игнатова А.М., Чернов В.П., Ханов А.М.* Кристаллизационно-ликвационная модель-схема формирования стеклокристаллических материалов каменного литья // Мат-лы V Всероссийской НТК «АНТЭ-09». – Казань: КГАУ, 2009. – С. 235-237.
9. *Чечулин В.А., Ковалев Ю.Г.* Свойства силикатных расплавов для производства камнелитых отливок // Тр. XXI совещания по теории литейных процессов «Литейные свойства металлов и сплавов». – М: Наука, 1967. – 356 с.
10. *Игнатова А.М.* Исследование и разработка схемы абразивного изнашивания поверхности синтетических минеральных сплавов склерометрическими измерениями // Вестник Тамбовского ун-та. Сер. Естественные и технические науки. – №3, т. 15. – 2010. – 1203-1208 с.
11. Физические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах / Под ред. *Н.Е. Мироновой.* – М.: Наука, 1978.
12. *Грешников В.А., Дробот Ю.Б.* Акустическая эмиссия. – М.: Изд-во стандартов, 1976.
13. *Смирнов А.Н.* Генерация акустических колебаний в химических реакциях и физико-химических процессах // Росс. хим. журнал. – 2001. – Т. 45. – С. 29-34.
14. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / *Н.А. Семашко, В.И. Шнорт, Б.Н. Марьин и др.* Под общей ред. *Н.А.Семашко.* – М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.
15. *Беспалько А.А., Суржиков А.П., Хорсов Н.Н., Клишко В.К., Штирц В.А., Шутеев О.В., Яворович Л.В.* Наблюдения изменений напряженного состояния массива горных пород после массового взрыва по параметрам электромагнитной эмиссии // Физическая мезомеханика. – Том 7, спец. выпуск, часть 2. – 2004. – С. 253-256.
16. *Игнатова А.М., Ханов А.М., Скачков А.П.* Исследование структуры и свойств камнелитых материалов методом наноиндентирования // Вестник Пермского гос. техн. ун-та «Машиностроение. Материаловедение». – №1, т. 12, 2010. – С. 139-150.
17. *Пуцаровский Д.Ю.* Структурная минералогия силикатов и их синтетических аналогов. – М., 1986. – 450 с.

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2011 г.

UDC 622.831

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN ACOUSTIC EMISSION AND DESTRUCTION STONECASTING MATERIAL UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

M.N. Ignatov, A.M. Ignatova, A.O. Artemov, V.A. Asanov

Perm State Technical University
614990, Perm, pr. Komsomolski, 29, building A, room 120

Perm State University
614990, Perm, Bukireva st., 15, 8 building PSU, room 416

The results of laboratory studies of acoustic emission under uniaxial compression samples stonecasting based materials synthetic mineral fusion are presented. It is established that the destruction of the samples is preceded by acoustic activity is caused by structural changes in the material. Fracture is preceded by the accumulation of inter stresses in the material. The character of acoustic emission and the load, which maintains the material depends on the amount of amorphous component in its structure.

Keywords: *stone casting, synthetic mineral alloys, stress-strain state, acoustic emission, fracture.*

M.N. Ignatov – Doctor of Technical Sciences, Professor.

A.M. Ignatova – Assistant.

A.O. Artemov – Assistant.

V.A. Asanov – Doctor of Technical Sciences, Professor.