

Экспресс-метод контроля эрозии бетона

Д.т.н., профессор ГОУ СПбГПУ С.Г. Никольский*

Эмиссионные методы основаны на том, что при зарождении микротрещин или при скачкообразном развитии магистральной трещины освобождается динамически потенциальная энергия деформации частично разгруженного объема. Эта энергия расходуется не только на образование новой поверхности, но и на пластическую деформацию перед вершиной трещины, на колебания вновь образовавшейся поверхности, а также на другие сопутствующие процессы. В частности, зарегистрирована эмиссия электронов с поверхности деформируемых металлов и излучение электромагнитных волн при нагружении силикатного стекла. Пластическая деформация перенапряженных объемов вызывает локальный разогрев и эмиссию тепла из зоны разрушения. Колебания вновь образовавшейся поверхности инициируют акустический импульс длительностью от десятых до десятков миллисекунд. Каждый импульс, многократно отражаясь от поверхностей изделия и постепенно рассеиваясь на неоднородностях материала, создает акустический сигнал, который в виде волн напряжений регистрируют на поверхности изделия как акустическую эмиссию.

Интенсивность этих эмиссий позволяет судить о фазе разрушения и о его кинетике, что используют для оценки прочности и остаточного ресурса изделия; причем точность этих оценок оказывается значительно выше, чем точность косвенных методов¹ контроля прочности. Чувствительность эмиссионных методов также на порядок выше, чем у других неразрушающих методов, и позволяет обнаружить зарождение или развитие дефекта размером 1 мкм. Кроме того, эмиссионные методы позволяют локацией определить координаты слабого звена без сканирования изделия. В настоящее время в силу исторических причин наиболее разработаны методы регистрации акустической эмиссии (АЭ). Их же чаще других эмиссионных методов используют для контроля разрушения и прочности.

Обычно АЭ регистрируют с помощью пьезопреобразователя, установленного на поверхности изделия и имеющего с ним акустический контакт через слой смазки, жидкости или через волновод. Акустико-электронная система регистрирует общее число N акустических сигналов, количество их в единицу времени – активность АЭ \dot{N} , а также информацию об амплитудах сигналов и о вероятностном распределении этих амплитуд. Амплитуда сигнала сильно зависит от расстояния между источником АЭ и датчиками. Активность же \dot{N} АЭ определяется числом событий в единицу времени, в частности, интенсивностью микрорастрескивания или скоростью роста магистральной трещины и по этой причине содержит больше информации о процессе разрушения.

К сожалению, \dot{N} микрорастрескивания часто маскирует \dot{N} наиболее опасного дефекта и мешает тем самым оценке опасного дефекта по \dot{N} .

Эрозия – главное препятствие для длительной работы изделия при максимальной неразрушающей нагрузке L_0 . В этом случае скорость эрозии определяет долговечность. Скорость могут оценивать визуально с использованием краски, магнитного порошка, суспензии, оттиска эродированной поверхности, фотографирования, а иногда и интраскопа с гибким световодом. При этом трещины от 2 до 5 мм и меньше могут быть не обнаружены. Вероятность пропуска дефекта при визуальном осмотре составляет 0,12 и выше. Метод цветной дефектоскопии трудоёмок, так как требует подготовки поверхности с шероховатостью $R_z=1,25$ мкм. Лишены вышеперечисленных недостатков традиционные вихретоковые и активные ультразвуковые методы контроля.

Методы оценки эрозии по эмпирическим формулам удовлетворительно характеризуют эрозию изделия того типа и формы, для которых они разрабатывались. Применение этих формул к другим изделиям невозможно: прогнозируемое отличается от наблюдаемой картины эрозии.

Для увеличения долговечности изделия существуют методы борьбы с эрозией, которые делят на активные, пассивные и активно-пассивные. К первым относят способы изменения характеристик среды, приводящей к эрозии материала, например уменьшение влажности и размера капель воды, ко вторым – применение эрозионно-стойких материалов, например покрытий из стеллита. Третьи представляют собой комбинирование первых двух групп [1]. Для совершенствования этих методов проводят теоретические и экспериментальные исследования. Первые посвящены созданию расчёта эрозии [2], вероятностно-статистическому анализу эрозионного состояния [3]. Вторые уделяют внимание поиску не только статистической связи эрозии с параметрами материала (твёрдостью по Бринеллю, пределом прочности на сжатие и др.), но и использованию современных методов нанодиагностики², например акустико-эмиссионному способу.

Ещё в прошлом веке эрозию керамики рассматривали как процесс скалывания, в котором решающую роль играет пластическая деформация, а то, что максимальные шум и эрозия – два одновременных процесса, было отмечено недавно [6].

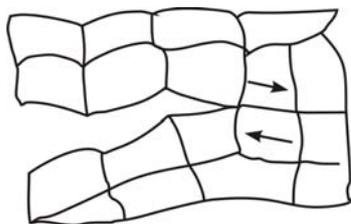


Рис. 1. Устье трещины в кристаллическом теле (стрелками отмечены зерна с остаточными деформациями сдвига)

Данная статья посвящена проблеме создания неразрушающего метода определения следующих величин для конкретного изделия: максимальной неразрушающей нагрузки L_0 , остаточного ресурса и эрозии.

Основной результат

Эффект Кайзера затрудняет оценку по АЭ состояния изделия после аварийной нагрузки $L_{ав}$, значительно превышающей эксплуатационную нагрузку $L_{эк}$. В этом случае при контрольном нагружении АЭ отсутствует, пока $L < L_{ав}$. А при $L = L_{ав}$ возможно заметное развитие опасного дефекта, снижение прочности изделия, а иногда и его разрушение при контрольном нагружении. В частности по этой причине, для оценки состояния изделия по АЭ его целесообразно нагружать до $L < L_{эк}$ и регистрировать АЭ не при нагружении, а в процессе разгрузки, когда не развиваются микропластические или пластические деформации и нет АЭ микрорастрескивания или роста опасного дефекта. Однако при разгрузке с $L \approx L_0$ трещина перестает закрываться еще до полного снятия нагрузки. Этот эффект, обнаруженный Эльбером в 1978 году, получил название «закрытие трещины». Вызван он тем, что при $L \approx L_0$ старту трещины предшествуют микропластические деформации перед фронтом трещины, которые при разгрузке приводят к несовпадению микрорельефа поверхностей трещины у вершины (рис.1). Это несовпадение вызывает шумы трения («зубной скрежет») перед окончанием разгрузки. Современная аппаратура позволяет регистрировать такие шумы и тем самым без разрушения изделия определять значение L_0 изделия, даже если при его нагружении АЭ отсутствовала, например, из-за эффекта Кайзера.

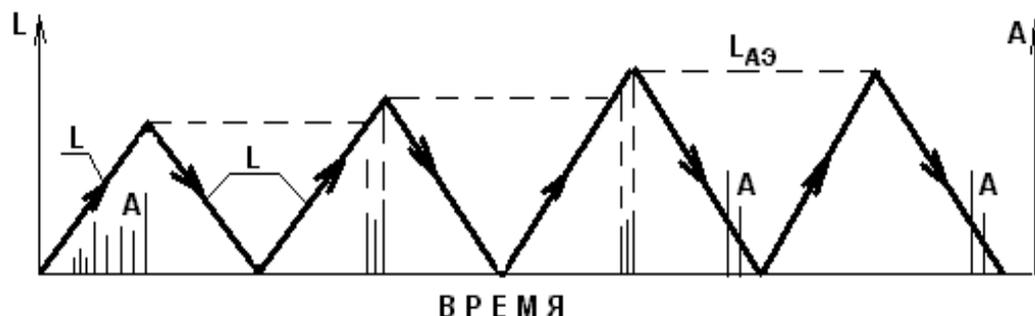


Рисунок 2. Режим определения L_0

Сдвиговые микропластические деформации в вершине трещины предшествуют ее старту, поэтому дискретная АЭ при разгрузке появляется еще до старта трещины. Это обстоятельство позволило создать надежный способ определения пороговой нагрузки L_0 для изделий с исходными технологическими дефектами, результат которого не зависит от предыстории изделия.

Нагрузку $L_{AЭ}$, после которой появляется дискретная АЭ закрытия трещины (рис. 2), определяют, регистрируя амплитуду A акустических сигналов при разгрузке. Если в процессе разгрузки дискретная АЭ отсутствовала, то при последующем нагружении максимальную нагрузку увеличивают на 4...5%. Зарегистрировав дискретную АЭ, повторяют циклы с $L_{макс} = L_{AЭ}$, чтобы убедиться в воспроизводимости сигналов дискретной АЭ при разгрузке. Значение пороговой нагрузки рассчитывают по формуле $L_0 = 0,95L_{AЭ}$. Экспериментально установлено [7], что если максимальная нагрузка цикла не превышает $0,95L_{AЭ}$, снижение $L_{AЭ}$ после 10^7 циклов если и имеет место, то не превышает погрешности эксперимента, 0,5 %. Погрешность определения L_0 конкретного изделия можно свести к 2%. Снижение L_0 после 12 опытов по ее определению не превышает 4%; экспериментально также выяснено [8], что L_0 , в отличие от разрушающей нагрузки L_P , не зависит от температуры, например, для керамики в диапазоне 78...1400 К.

Значение L_0 характеризует длительную прочность конкретного изделия при заданной схеме его нагружения.

Номинальные напряжения σ_o , рассчитанные по L_o в условиях растяжения, сжатия или изгиба, называют пределом длительной прочности³ при статическом нагружении или пределом выносливости при циклическом нагружении.

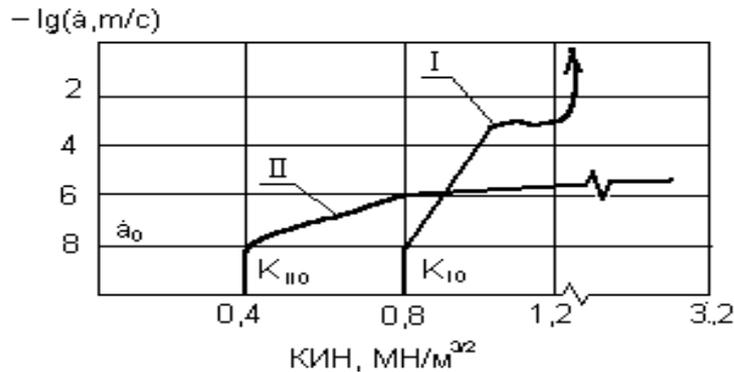


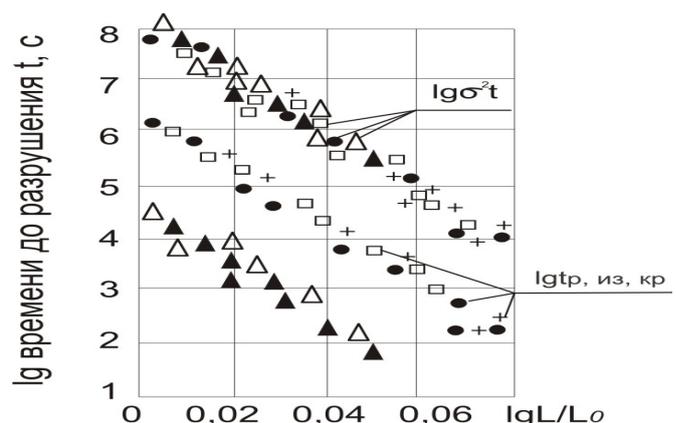
Рисунок 3. Зависимость скорости \dot{a} роста трещины в техническом фарфоре в условиях: I - отрыва, II -сдвига

Так как коэффициент интенсивностей напряжений $K_o = Y\sigma_o\sqrt{a}$, то значение σ_o и L_o зависит от размера дефекта a , попавшего в наиболее напряженную область изделия (Y - безразмерный коэффициент, учитывающий соотношение размеров трещины и тела, а также другие особенности тела). По этой причине изменение схемы нагружения, например, направления изгиба силой посередине пролета стержня круглого сечения, приводит, как выяснено неразрушающим методом для хрупкого материала, к изменению предельных нагрузок L_o и L_p в несколько раз и к изменению отношения L_p/L_o от 1,15 до 4.

На рис. 3 при $K > K_o$ до практически горизонтального участка справедливо соотношение $\dot{a} = \dot{a}_o(K/K_o)^n$, где n – константа материала при заданной температуре, обратно пропорциональная ей. Для трещины отрыва n раза в 2 больше, чем для трещины сдвига, и на графике плато (которого может и не быть) сменяется практически вертикальной прямой. Трещина же сдвига, достигнув незначительной скорости, мало увеличивает ее до момента фрагментации изделия, если только не переходит в трещину отрыва. За K_{Ic} обычно принимают значение K_I при $\dot{a} \approx 1$ м/с. Как правило, трещина сдвига начинает развиваться раньше трещины отрыва, постепенно ослабляет изделие и подготавливает катастрофическое разрушение отрывом.

Интегрирование $\dot{a} = \dot{a}_o(K/K_o)^n$ при $\sigma = const$ приводит к результату $\sigma^2 t = \sigma_o^2 t_o / x^{n-2}$ или $t = t_o / x^n$, где $x = \sigma/\sigma_o = L/L_o$, L – действующая нагрузка, t_o – долговечность при $x \rightarrow 1$. Такой результат не противоречит результатам испытаний на растяжение, сжатие, изгиб, кручение материалов с исходными технологическими дефектами (рис.4).

Рисунок 4. Кривые длительной прочности при статическом нагружении керамики стеновых панелей на основе кембрийской глины при комнатной температуре в условиях: сжатия с $\sigma = 50$ МПа (\blacktriangle) и 70 МПа (\triangle), изгиба с $\sigma_{max} = 6...12$ МПа (\bullet), кручения с $\sigma_{max} = 7...10$ МПа ($+$) и растяжения с $\sigma = 5...10$ МПа (\square)



Причем при $x = const$ разброс lgt или $lgt^2 t$ не превышает 1. Это обстоятельство позволяет прогнозировать долговечность после определения L_o неразрушающим методом при заданной схеме нагружения изделия. Для этого дополнительно в условиях статического нагружения разрушают выборку образцов того же материала при неизменном $x_{обр} = \sigma/\sigma_o \approx 1.4$, регистрируют их долговечность t (порядка 100 с) и рассчитывают среднее $t_{обр}$. На образцах того же материала экспресс-методом определяют n для трещины сдвига [9]. Долговечность изделия в условиях статического нагружения при температуре испытания образцов рассчитывают по формуле

$$t_{изд} = t_{обр} (x_{обр} / x_{изд})^n$$

Известные способы оценки стойкости материала против эрозии различаются приемами ее иницирования [11,12,13] и регистрации поврежденности материала. Поврежденность оценивают по весовому

износу Q или его интенсивности \dot{Q} , по площади S поврежденной поверхности, по возникающей э.д.с. [14] или по акустической эмиссии (АЭ), связанной с разрушением [15]. В последнем случае предварительно на образцах выясняют, например, зависимость весового износа Q от числа N событий АЭ. Такую зависимость можно использовать для оценки поврежденности сооружения, взвешивание которого или осмотр поверхности затруднены, например, закрытый водосброс платины.

Наиболее близок к предлагаемому способ [16], включающий перемещение контртела по поверхности материала, регистрацию АЭ, определение весового износа Q материала и зависимости Q от числа N АЭ за период контроля. Связь между Q и N обусловлена тем, что число N пропорционально вновь образовавшейся поверхности S материала, а при неизменной форме и размеров частиц число N пропорционально также объему V и весу этих частиц.

Однако, как показали опыты, с увеличением интенсивности воздействия на материал форма и размеры отделяющихся частиц изменяется: они становятся более вытянутыми; одновременно увеличивается отношение V/S и Q/S . Это обстоятельство снижает точность прототипа и требует уточнения зависимости Q от параметров АЭ.

Цель предложенного способа - повышение точности определения износа материала по параметрам АЭ.

Цель достигают тем, что, как и в прототипе, перемещают контртело по поверхности материала и регистрируют АЭ. Но, в отличие от прототипа, предварительно образец материала нагружают циклически от нулевой в условиях сжатия, уже вызывающего эрозию с поверхности в виде чешуек [17,18], ступенчато повышают максимальную нагрузку циклов до появления АЭ после первой разгрузки образца на 80 %, после каждой ступени определяют потерю Q веса образца, число N событий акустической эмиссии, среднее значение \dot{N} ее активности. По этим результатам находят зависимость отношения Q/N от \dot{N} , а о весовом износе материала в процессе эксплуатации судят по этой зависимости и соответствующим параметрам (N и \dot{N}) АЭ при перемещении контртела по поверхности изделия. Циклическое нагружение от нулевой до постоянной для данной ступени нагрузки, в отличие от выдержки при постоянной нагрузке [19], во-первых, после первого цикла исключает АЭ микрорастрескивания перенапряженных частиц материала внутри объема образца (эффект Кайзера: все, что могло, уже растрескалось при первом нагружении). Во-вторых, переход от статического к циклическому нагружению увеличивает скорость эрозии с поверхности, что сокращает время определения зависимости Q/N от \dot{N} при низких уровнях силового воздействия (при низких напряжениях сжатия). В-третьих, появление АЭ после снижения максимальной нагрузки на 80 % предупреждает о предстоящем старте магистральной трещины [20] и позволяет избежать наложения АЭ магистральной трещины на АЭ эрозии. С увеличением интенсивности силового воздействия возрастает скорость развития трещин или микротрещин, отделяющих поверхностную частичку материала от его объема. В связи с этим возрастает и активность АЭ, что позволяет использовать среднее значение \dot{N} как показатель интенсивности воздействия, а зависимость отношения Q/N от \dot{N} , полученную в условиях сжатия, использовать для оценки Q по N и \dot{N} при других видах эрозии.

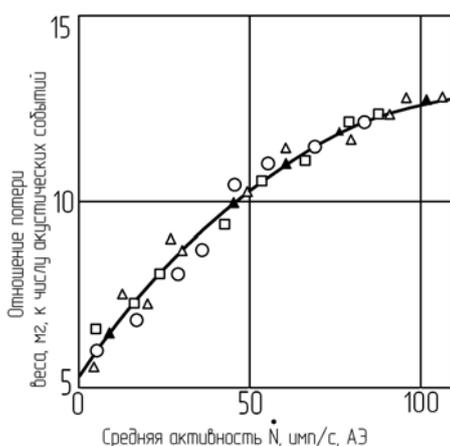


Рисунок 5. Зависимость отношения веса Q мг, к числу акустических событий N от средней активности \dot{N} , имп/с, АЭ

На рисунке 5 отражены результаты, полученные при одноосном сжатии четырех воздушно-сухих образцов бетона (Δ), при сжатии четырех водонасыщенных образцов бетона (\blacktriangle), при истирании четырех пластин (\circ) и четырех таблеток в условиях микрокавитации (\square).

Для проверки способа его реализовали на образцах мелкозернистого бетона в возрасте 28 дней, изготовленного из смеси одной весовой части (в.ч.) напрягающегося цемента [21], воды (1 в.ч.) и песка 0,15...1 мм (8 в.ч.). Для получения образцов смесь укладывали тромбованием в формы, выдерживали их 28 дней в воде комнатной температуры, а затем не менее 10 дней на воздухе. Полученный таким образом бетон имел пористость $3\pm 0,5\%$ и среднее значение предела прочности 25 МПа в условиях однородного осевого сжатия по методике, близкой к методике [18]. Торцы образцов для сжатия (диаметром $d=10$ мм и высотой $h=30$ мм) находились в соосных углублениях глубиной 5 мм обойм из стали ШХ-15 с наружным диаметром 40 мм. Акустические датчики устанавливали на торец верхней обоймы, а под нижнюю обойму подкладывали блюдце (поддон) диаметром 10 см из алюминиевой фольги. Вес отделившихся чешуек определяли взвешиванием их вместе с блюдцем (поддоном). Кроме образцов на сжатие, изготавливали образцы-пластины с размерами $20\times 10\times 3$ мм³ и образцы-таблетки с $d=18$ мм и $h=6$ мм. Образцы-пластины подвергали истиранию смесью, состоящей из воды (1 в.ч.), кембрийской глины (3 в.ч.) и песка 0,15...1 мм (1 в.ч.); при этом использовали устройство [22], создавая в области контакта среднее давление 0,2 МПа. Акустический датчик устанавливали на поверхность 10×20 мм² образца-пластины. Потерю веса образца за известный период испытаний (2 часа) определяли взвешиванием образца на аналитических весах. На дно формы для образца-таблетки укладывали латунную сетку с ячейками ~ 1 мм² и с припаянной перпендикулярно сетки U-образной душкой. После заполнения такой формы на 5 мм на смесь укладывали диаметрально противоположно концы двух медных проводков-электродов и покрывали их еще слоем смеси толщиной 1 мм. После твердения таблетки сушили до постоянной массы при 105 °С и на цилиндрическую поверхность наносили силиконовое покрытие заподлицо с двухэлектродным торцом и с коническим раструбом высотой 6 мм над латунной сеткой. В раструб заливали слой воды (2мм) и слой веретенного масла (6мм), в которое опускали торец акустического датчика. При испытаниях таблеток их подвешивали за душку, которую заземляли, а на электроды нижнего торца подавали напряжение промышленной частоты. Переменное электрическое поле возбуждало микрокавитацию [23] в порах [21] поверхностных слоев таблетки и осыпание частиц бетона на алюминиевую фольгу под таблеткой. Вес этих частиц определяли взвешиванием на аналитических весах после сушки при 105° С на алюминиевой фольге. Во всех опытах АЭ и ее параметры регистрировали с помощью прибора АФ-15. Выбор частотного диапазона производили на приборе [22] при трении пластины $20\times 10\times 3$ мм³ из карбида кремния с нулевым водопоглощением об используемую смесь; в этом случае износ пластины за 40 минут, если и был, то составлял менее 0,001 г, а шумы трения удавалось удалить используя частотный диапазон 1...2 МГц. В таком диапазоне и проводили регистрацию АЭ при одноосном сжатии и микрокавитации.

Используя неразрушающий способ, можно определить L_o изделия при различных схемах его нагружения и с учетом полученных результатов оптимально ориентировать изделие для дальнейшей эксплуатации [9, 10]. Такой приём позволяет повысить несущую способность изделия в несколько раз, а долговечность при заданном режиме нагружения – на несколько порядков.

Описанный прием определения L_o позволяет контролировать кинетику разрушения, независимо от того, происходит ли снижение L_o из-за: 1 – силового воздействия путем развития наиболее опасного дефекта (при $L > L_o$), 2 – или путем рассредоточенного микрорастрескивания, которое снижает модуль E , а следовательно, K_o и тем самым L_o ; 3 – или снижением значения из-за коррозии, эрозии или поверхностно-активного вещества.

Как видно из рисунка 5, результаты, полученные при разных интенсивностях воздействия (различных \dot{N}), группируются вокруг общей аппроксимирующей кривой в пределах не более 15 %. Следовательно, погрешность оценки потери веса в условиях истирания и кавитации с использованием предложенного способа составляет около 30 %. Использование предложенного способа [24] ограничено возможностью разделения паразитных шумов и АЭ, связанной с разрушением. Пока не удалось решить эту задачу для оценки сопротивления царапанию.

Литература

1. Фаддеев И.П., Биржаков М.Б., Масляноко А.И., Хавия С.Л. Эрозия деталей паровых турбин.- Энергетическое машиностроение (НИИ информэнергомаш), 1982, №6.
2. Григорьева Е.Н. Разработка метода расчёта эрозии при фрезеровании горных пород гидроабразивным инструментом: автореф.дис.на соиск.учён.степ.к.т.н./ Тул.гос.ун-т.- Тула, 2006.- 18с.
3. Лагерев А.В. Эрозия паровых турбин: вероятностный подход: в 3т. Т.1. Вероятностный анализ эрозии паровых турбин: Монография/ А.В. Лагерев.- М.: Машиностроение – 1, 2006.- 267с.
4. Пул Ч., Оуэнс Ф., Нанотехнологии. М: Техносфера, 2005.- 335с.
5. Мелихов И.В. Физико-химическая эволюция наносистем //Актуальные проблемы нанотехнологий и наноматериалов. Тезисы докладов учёных РАН на Российско-Китайском семинаре (Китай, Пекин) – 2006, - с.29-31.

6. Кавешников А.Т. Кавитационная эрозия на элементах водопропускных гидротехнических сооружений. Монография./ Московский государственный университет природообустройства, М., МГУП, 2001, 158с.
7. Бормоткин В.О., Никольская Т.С., Никольский С.Г. Способ определения максимальной нагрузки, ещё не снижающей прочность изделия. // Сб. докл. II Междунар. конф. "Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности..." - СПб ГТУ, 1997, с. 88-89.
8. Никольская Т.С., Никольский С.Г. Влияние температуры на пороговые параметры прочности керамики // С-Петербург. журн. электроники. –2001., № 1, с. 25-28.
9. Никольская Т.С. Особенности акустической эмиссии при частичной разгрузке керамического изделия //М.ж. Проблемы прочности, Киев, 2002., № 4, с. 140-147.
10. Никольская Т.С. Определение предельных значений пороговой нагрузки при изгибе опорного фарфорового изолятора // Сб. Трудов III Международн. конференция "Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности...", СПб.: Санкт-Петербург. гос. техн. ун-т, 1999., с. 51-52.
11. Ясь Д.С., Подмоков В.Б., Дяденко Н.С. Испытания на трение и износ. Киев: "Техника"- 1971.- 140с.
12. Склерометрия. Под редакцией Хрущева М.М.: Наука.-1968.-с.220
13. Пирсол И. Кавитация. М. Мирр.-1975.-95 с.
14. Авт.св. СССР №1420459 МКИ G 01 N 3/56. Способ контроля износа металлических поверхностей при контакте с влажной дисперсной системой. Барабанщиков Ю.Г. Опубликовано 30.08.88 в Бюл.32.
15. Рапопорт Л.С., Вайнберг В.Е., Воронина И.М. Применение метода АЭ для исследования процессов деформации и разрушения при трении и износе металлов// Зав. Лаборатория.-1981.-N 11.-С. 80-81
16. Калмыков Т.Ф., Свириденко А.И., Холодилов С.В. К вопросу о спектре акустического излучения при трении полимеров// Сб. "IX Всес. акуст. конф., 1977 Секция В". М.-1977.-С. 179-181.
17. Влияние размеров образцов на прочность электротехнического фарфора при осевом сжатии/ Ю.В. Добровольский, С.И. Лихацкий, С.Г. Никольский и др.// Проблемы прочности.-1983.- N 6.-С. 25-29.
18. Конструкционная прочность стекол и ситаллов/ Писаренко Г.С., Амелянович К.К., Козуб Ю.И. и др.- Киев: Наук.думка. 1979.-284 с.
19. Авт.св. СССР 95 8961, МКИ G 01 N 29/04 Способ имитации сигналов АЭ от дефекта в хрупком материале./ Ю.В. Добровольский, С.Г. Никольский, Г.М. Охрименко Заявлено 04.01.81 ЛПИ и ИПП АН УССР. Опубликовано 15.09.82 в Бюлл. №34.
20. Пат. 2305281 РФ, МКИ G01N 29/14 Способ контроля прочности изделия из хрупкого материала / С.Г. Никольский, Т.С. Никольская (РФ) ; ПНИПКУ "Венчур" (РФ).- №2005131106; Заявлено 30.10.05; Опубл. 27.08.07; Бюл №24.- 3 с.
21. Строительные материалы. Учебник для студентов вузов/ Под ред. Г.И. Горчакова. - М.: Высшая школа, 1982.- 352 с.
22. Авт.св. СССР 1423961, МКИ G 01 N 33/38. Устройство для контроля и тарировки влагомера/ С.Г. Никольский. Заявлено 14.10.87, опубл. 15.09.88 в бюлл.№ 34.
23. Mole G. A meconism of water treeing in polyethylene insulation/ World Elektrotechnical congress in Moscow.1977. Sect. 3A, paper 64. P. 164.
24. Заявка №2007124615 Российская Федерация, Способ оценки стойкости хрупкого материала против эрозии / Никольская Т.С., Никольский С.Г.; Заявлено 22.06.2007. Пол. решение от 23.06.2008.

¹ Традиционная дефектоскопия не учитывает возможности изменения формы и размеров исходных дефектов в процессе нагружения, а тем более зарождения новых и более опасных дефектов. Косвенные методы контроля прочности, основанные на связи прочности с соотношением упругости и структурной вязкости (метод отскока, вдавливания, затухания ультразвуковых волн и т.д.), требуют предварительного выяснения этой статистической связи, весьма нестабильной и чувствительной не только к составу материала, но и к различным факторам технологии.

² Нанодиагностика – совокупность методов исследований, направленных на изучение механических электрофизических и других специфических характеристик наноматериалов и наносистем [4]. Наносистема – гетерогенная система, в которой элементы одной из фаз (жидкой, газообразной, твёрдой) имеют размеры от 10 до 100 нм, хотя бы в одном направлении. [5]. Пластическую деформацию наносистемы регистрируют с помощью акустической эмиссии.

³ В отличие от предела прочности $\sigma_{пч}$, или временного сопротивления $\sigma_{в}$, которые характеризуют кратковременную прочность.

* Сергей Григорьевич Никольский, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Тел. раб. 5527554, тел. моб. +79214235776