

УДК 620.18

Применение гибридной диагностики для оценки эксплуатационных свойств композиционной керамики*

А.Л. Галиновский, С.Г. Муляр, М.В. Хафизов

Рассмотрены вопросы создания информационно-диагностического обеспечения оценки эксплуатационных свойств композиционной керамики путем сочетания потенциала методов акустической эмиссии и ультразвуковой диагностики.

Ключевые слова: гидроструя, керамика, диагностика.

Application of hybrid diagnostics to assess performance properties of structural ceramics*

A.L. Galinovsky, S.G. Mulyar, M.V. Khafizov

The article deals with the creation of dataware and diagnostic assurance to assess the performance properties of structural ceramics by using an acoustic emission and waterjet diagnostics combination approach.

Keywords: waterjet, ceramic, diagnostics.

Одним из перспективных материалов для изготовления бронезащитных элементов, входящих в состав средств индивидуальной защиты, является специальная композиционная керамика (КК). Этот материал должен обладать высокими баллистическими свойствами, которые определяются физико-механическими характеристиками КК, такими как: твердость, пористость, прочность, зернистость, трещиностойкость и др. [1]. Определение данных характеристик — сложная научно-техническая задача, решение которой, в настоящее время, осуществляется с помощью натуральных экспериментов. Серьезным недостатком данного подхода является упрощенный критерий оценки качества бронеструктуры «пробитие — непробитие». В связи с чем поиск более информативных, менее затратных и быстрых методов оценки физико-технических характеристик КК является актуальным и значимым. Потребность в таких методах диагностики будет несомненно расти вместе с расширением областей применения данных материалов в различных отраслях машиностроения и смежных направлениях науки и техники. Причем следует отметить, что решение представленной



ГАЛИНОВСКИЙ
Андрей Леонидович
 кандидат технических наук, доктор педагогических наук, доцент, профессор



МУЛЯР
Сергей Геннадьевич
 аспирант



ХАФИЗОВ
Максим Васильевич
 аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
 e-mail: galcomputer@mail.ru

* Данное исследование проводилось в рамках гранта президента РФ № 16.120.11.5069-МД и гранта РФФИ № 12—08—00802-а, РФФИ № 12-08-33022.

проблемы будет востребовано как производителями КК, так и потребителями.

Учитывая результаты исследований технологических возможностей гидроструйных технологий, в частности, используя физические особенности гидроэрозионного разрушения поверхности КК в месте воздействия сверхскоростной ультраструи воды, можно оценить параметры ее качества: прочность, ударную вязкость и т. д. Предварительный анализ возможностей данного метода ультраструйной диагностики (УСД) показал, что одними из информативных параметров могут стать результаты эрозионного разрушения ультраструей контролируемой КК, например геометрические размеры и форма гидрокаверны [2], керамических частиц, отделившихся от поверхности исследуемого образца, изменения массы образцов до и после ультраструйного воздействия (унос массы).

Все это в целом создает предпосылки для разработки и реализации инженерных методик экспресс-контроля и диагностики эксплуатационно-технологического состояния КК на основе метода УСД. Особый эффект может быть достигнут при использовании предложенного метода диагностики для экспресс-оценки и контроля функциональных характеристик КК на этапе отработки технологии ее получения, повышения технико-экономической результативности технологической подготовки производства.

Важно подчеркнуть, что процесс УСД связан с использованием стандартного гидрорежущего оборудования, применяемого в настоящее время для решения широкого спектра задач, в частности размерной обработки бронеэлементов, вырезки образцов для испытаний, сложноконтурного раскроя композиционных эластомеров, входящих в состав средств индивидуальной бронезащиты, осуществления имитирующего воздействия на поверхность броне-материала и т. д.

На первом этапе исследований возможностей УСД было проведено моделирование методом конечных элементов, который как показано в работе [3], позволяет весьма точно смо-

делировать совокупность процессов, протекающих в зоне гидрорезания. Постановка задачи механики сплошной среды заключалась в составлении замкнутой системы уравнений, описывающей движение и состояние сплошной среды с учетом ее физико-механических свойств и внешних силовых факторов. Такой подход позволяет найти все функции, определяющие движение и состояние среды, в зависимости от координат и времени. Основными этапами решения задачи моделирования являлись:

- 1) выбор системы отсчета и систем координат, по отношению к которым рассматривается движение деформируемой среды;
- 2) выбор модели сплошной среды для изучаемого процесса;
- 3) составление системы исходных уравнений для выбранной модели сплошной среды;
- 4) выбор основных неизвестных и построение систем нахождения этих неизвестных;
- 5) определение начальных и граничных условий.

В результате выполненных расчетов было установлено, что значения напряжений в месте контакта гидроструи с преградой из КК на основе оксида алюминия сопоставимы с напряжениями, возникающими при взаимодействии ударника с аналогичной преградой*. При этом на практике технологические возможности гидроструйного оборудования позволяют путем варьирования рядом параметров, прежде всего давления жидкости, создавать необходимый уровень напряжений, сопоставимый с теми или иными параметрами ударника. Другими словами представляется возможным осуществлять имитационное гидроструйное воздействие, соответствующее требуемому классу защиты в широком диапазоне вплоть до ба класса.

На втором этапе исследований были проведены эксперименты по гибридной диагностике образцов КК на основе оксида алюминия, изготовленных из различного состава исходного порошка. Эксперименты проводились при единых технических параметрах скорости гид-

* Моделирование методом конечных элементов с применением программного обеспечения Ansys AutoDyn.

роструи ~800 м/с, продольная подача сопловой головки ~0,5 мм/с, диаметр гидроструи ~0,15 мм, расстояние от среза сопла до керамической пластины ~3...4 мм. В результате данного воздействия на поверхности образцов образовывались эрозионные гидрокаверны, размер и форма которых коррелируют на качественно-количественном уровне с физико-механическими свойствами материала. Так, например, в материалах с большим количеством внутренних дефектов края гидрокаверны сильно выкрашиваются, образуются крупные сколы материала, при этом унос массы материала является важнейшим диагностическим параметром, требующим точного ($\Delta \sim 0,001$ г) измерения. В сочетании с данными о значениях акустической эмиссии (АЭ), фиксирующей уровень сигнала при возникновении и распространении упругих колебаний (акустических волн) во время деформации напряженного образца из КК, может быть получена объективная картина качественных и эксплуатационных характеристик данного материала.

В таблице 1 представлены результаты расчетов, полученные описанным выше процессом моделирования взаимодействия ударника/гидроструи с пластиной из оксидной керамики.

Таблица 1

Результаты моделирования по определению уровня максимальных напряжений в материале пластины

Эквивалентное напряжение в керамической пластине для пуль стрелкового вооружения, ГПа	Скорость струи V , м/с	Эквивалентное напряжение в материале керамической пластины для ультраструи, ГПа
Для ПМ — 3,82	580	2,1
	770	4,6
	850	5,7
Для АК-74 — 8,66	1 010	7,9
	1 050	8,6
	1 090	9,2

Проведенное моделирование и его результаты составили основу теоретических исследований по данной научной задаче и позволили перейти к следующему этапу обработки техноло-

гии УСД — экспериментальной отработке технологии.

Суть экспериментальных исследований состояла в том, что для проверки гипотезы о возможности использования УСД для оценки качественных характеристик керамических материалов на основе оксида алюминия был подготовлен комплект пластин из КК на основе оксида алюминия, изготовленных по различным технологиям. Образцы изготавливались в Институте порошковой металлургии ГНПО ПМ НАНБ (г. Минск) при полусухом статическом прессовании (100 кг/мм²) и режиме спекания на воздухе в течении двух часов при температуре 1 580 °С. Перед проведением УСД образцы были взвешены на микровесах с ценой деления 0,001 г и получены изображения микрошлифов их поверхности для анализа структуры материала (табл. 2).

Таблица 2

Данные по экспериментальным образцам

Номер образца	Состав КК	Масса образцов, г
1	Al ₂ O ₃	86 480
2	Al ₂ O ₃ +5% модификата (нанопорошок Al ₂ O ₃)	78 812
3	Al ₂ O ₃ +1%TiO ₂ +0,5%MgO	86 788

Процесс УСД состоял из следующих основных этапов:

- 1) взвешивание образцов с точностью 0,001 г;
- 2) установка и закрепление керамических образцов в технологической оснастке на координатном столе гидроструйной установки MultiCam Waterjet Systems (США)*;
- 3) эмпирический подбор технологического режима гидроструйного воздействия (скорости подачи, давления жидкости, расстояния от среза сопла до поверхности образца);
- 4) установка датчиков акустической эмиссии (АЭ) на поверхности экспериментального образца и их подключение к прибору «Малахит АС-15А/2»;

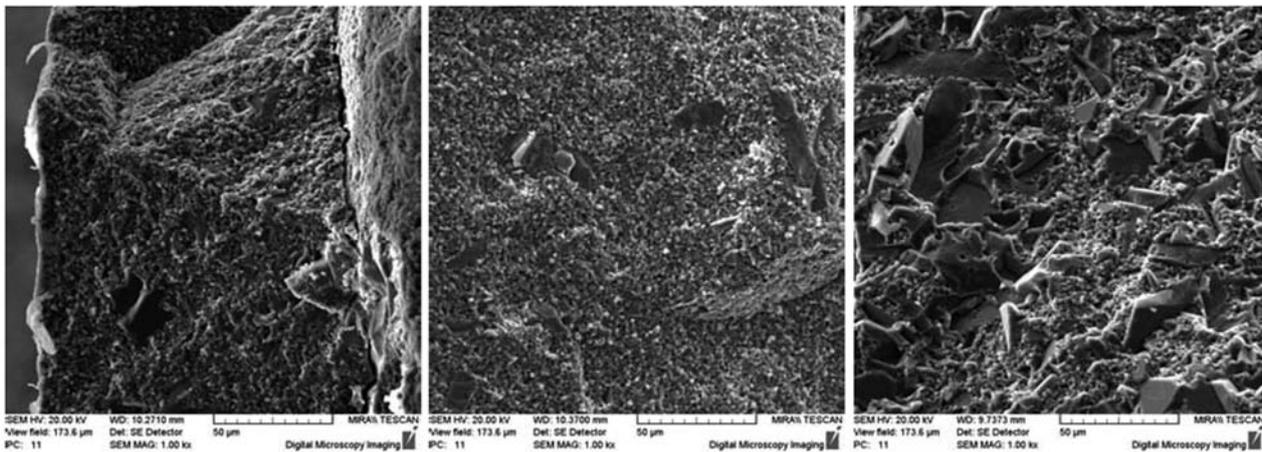
* Эксперименты проводились в Дмитровском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством канд. техн. наук, доц. Н.К. Литвина.

5) гидроструйное воздействие на поверхность пластины из КК при заданных технологических режимах и одинаковой длине реза для трех образцов;

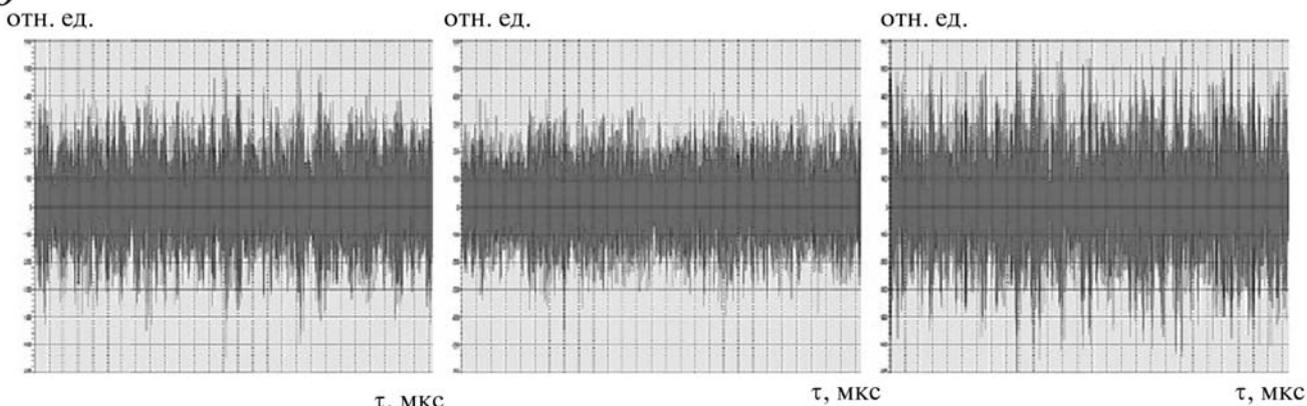
6) запись сигнала АЭ и его значений на ПК;
7) повторное взвешивание образцов с точностью 0,001 г;



a № 1 № 2



б № 1 № 2 № 3



в № 1 № 2 № 3

Рисунок. Образцы композиционной керамики после УСД:

a — изображение гидрокверн; *б* — изображение микрошлифа при увеличении $\times 100$; *в* — данные о значениях АЭ

8) занесение экспериментальных данных в таблицу для проведения дальнейшего анализа результатов.

Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 3. Фотографии полученных в результате эксперимента гидрокаверн, микрошлифов образцов и полученные данные о значениях АЭ представлены на рисунке.

Таблица 3

Результаты экспериментальных данных качественно-количественного анализа характеристик КК

Номер образца	Масса m_2 , теряемая образцом при ультразвуковой обработке, на 1 мм длины реза, г/мм	$\lg\left(\frac{1}{m_2}\right)$	Уровень сигнала АЭ, отн. ед.
1	0,0075	2,12	360
2	0,0065	2,19	330
3	0,0148	1,83	440

Для перевода некоторых качественных показателей в количественные может быть разработана относительная шкала. Примерный вид которой для графы табл. 4 (Качественные данные по линиям эрозионного изнашивания при воздействии струи по торцевой поверхности керамических образцов) может выглядеть как показано в табл. 4. Оценочный балл можно определить путем экспертного оценивания.

В результате перехода к количественной оценке характера повреждений образца становится возможным рассчитать коэффициент множественной корреляции между данной характеристикой, уносом массы материала и значением уровня сигнала АЭ. Расчеты по известным математическим зависимостям позволили установить значение корреляции $r = 0,92$, которое демонстрирует эффективность предложенного способа гибридной диагностики.

В заключение следует отметить, что универсальность ультразвуковой технологии имеет большие перспективы в производстве изделий бронезащиты. Ее применение позволит решить не только многочисленные задачи, связанные с обработкой материалов, но и благодаря инновационности идеи сочетания методов

Таблица 4

Примерная шкала перевода качественных показателей оценки характера повреждений композиционной керамики в количественные

Номер образца	Характер повреждений образца	Относительный унос массы, %	Оценочный балл
1	Полное разрушение	>0,8	7
2	Размер отколовшихся кусков керамики многократно превышает ширину гидрокаверны, гидрокаверна не просматривается/форма гидрокаверны имеет волнообразную форму с характерными равными краями	0,7—0,8	6
3	Размер отколовшихся кусков керамики в несколько раз превышает с ширину гидрокаверны	0,6—0,7	5
4	Размер отколовшихся кусков керамики сопоставим с шириной гидрокаверны, кромки неровные, рваные	0,5—0,6	4
5	Гидрокаверна не имеет ярко выраженных сколов, кромки неровные	0,3—0,4	3
6	Гидрокаверна ровная, без неровных или рваных кромок	0,1—0,2	2
7	Гидрокаверна плохо просматривается визуально	<0,1	1

УСД и АЭ, решать как вопросы входного контроля качества керамических материалов, так и выходной диагностики средств индивидуальных бронезащиты путем имитирующего воздействия.

Литература

1. Эванс А.Г., Ленгдон Т.Г. Композиционная керамика. М.: Металлургия, 1980. 256 с.
2. Тарасов В.А., Полухин А.Н. Оценка геометрических параметров формируемой поверхности при гидроструйной обработке // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. № 1(86). 2012. С. 107—116.
3. Абашин М.И., Хафизов М.В. Механизмы гидроэрозионного разрушения твердотельной преграды // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». № 10. 2011.

Статья поступила в редакцию 15.06.2012