

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КАРБИДОКРЕМНИЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2019 г. А.А. Хлыбов<sup>1,\*</sup>, И.А. Иляхинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), Россия 603950  
Нижегород, ул. Минина, 24

<sup>2</sup>АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»), Россия 603074 Нижегород, Бурнаковский пр., 15  
E-mail: \*hlybov\_52@mail.ru

Поступила в редакцию 13.02.2017; после доработки 12.10.2018;  
принята к публикации 26.10.2018

Экспериментально показаны взаимосвязь между структурой и свойствами карбидокремниевых материалов с акустическими параметрами и характеристиками вихревых токов и то, что в областях с неоднородной структурой наблюдается разрушение изделий трибосопряжений, а также влияние структуры карбидокремниевых материалов на акустические характеристики и параметры удельной электропроводности. Экспериментально продемонстрирована возможность использования неразрушающих (акустического и вихретокового) методов контроля для изделий из карбидокремниевых материалов.

*Ключевые слова:* карбидокремниевый материал, электропроводность, упругие волны, скорость, затухание, вихревые токи, микроструктура.

DOI:10.1134/S01303082190100068

### ВВЕДЕНИЕ

Элементы конструкций электронасосов системы охлаждения энергетических установок эксплуатируются в агрессивной среде при повышенных температурах, высоких скоростях и нагрузках. Основными требованиями к материалам насосов являются стабильность физико-механических свойств, высокая износостойкость, низкий коэффициент трения, способность выдерживать температурные напряжения в течение всего срока эксплуатации [1, 10]. Им удовлетворяют карбидокремниевые материалы, которые разделяются на несколько основных типов, отличающихся друг от друга составами, структурой, технологическими особенностями получения и свойствами.

Сложность обработки и выбор материалов с характеристиками, исключающими наличие дефектов, длительный период испытаний, значительные экономические затраты, а также обеспечение безаварийной эксплуатации требуют оперативного неразрушающего контроля на всех этапах эксплуатации изделий из карбидокремниевых материалов. Он является неотъемлемой частью технологических процессов изготовления узлов трибосопряжения [1—3].

В настоящий момент для данного класса материалов применяется 100-процентный рентгеновский контроль, который однозначно отсеивает такие дефекты, как непросилицированные участки, раковины, трещины, участки «непропрессова» материала, но не дает однозначного ответа на вопрос, разрушится материал в дальнейшем или нет. Особенно проблема прогнозирования поведения изделий из карбидокремниевых материалов актуальна на начальной стадии их изготовления, так как исключение из процесса испытаний и дальнейшей эксплуатации образцов с неудовлетворительными характеристиками позволяет сократить объем испытаний и в конечном итоге повысить надежность изделий.

В [4—6] показано, что применение неразрушающих акустических методов контроля для прогнозирования состояния сложных композиционных материалов также имеет достаточную точность как для оценки акустических параметров, так и структуры материала. Однако акустические измерения связаны с определенными трудностями: введение в исследуемый материал зондирующего импульса, требование к плоскопараллельности и шероховатости его поверхностей и ряд других факторов создают некоторые сложности применения акустических методов.

Карбидокремниевые материалы обладают электропроводящими свойствами и соответственно изделия из этих материалов можно контролировать методами, основанными на измерении электрических характеристик материала. При выборе метода также учитывали оперативность, повторяемость результатов измерений, геометрию конструкции, состояние поверхности и т.д. В качестве метода неразрушающего контроля был использован метод вихревых токов, измеряемые

характеристики которого чувствительны как к однородности структуры, так и к изменениям, происходящим в процессе испытаний и эксплуатации изделий из карбидокремниевых материалов.

Таким образом, целью данной работы является проверка возможности использования акустического и вихретокового методов контроля в оценке работоспособности изделий из карбидокремниевых материалов.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Проверку работоспособности акустического и вихретокового методов осуществляли на образцах из карбидокремниевых материалов, в качестве которых использовали заготовки деталей подшипников скольжения насосов (рис. 1).

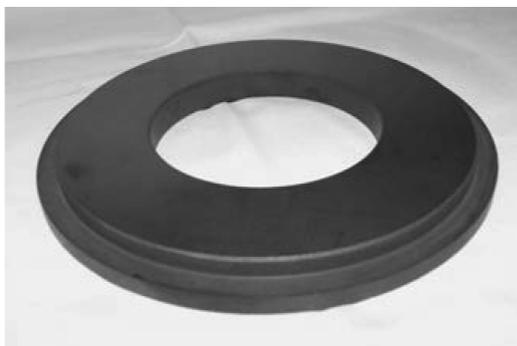


Рис. 1. Образцы для проведения исследований.

Измерения показаний значений вихревых токов осуществляли с помощью прибора ВТ-2А, представляющего собой токовихревой дефектоскоп с индуктивным датчиком 2 кГц. Так как эталонных образцов не существует, то при испытаниях измеряли относительные показания прибора.

Для акустических измерений применяли прибор фирмы Krautkramer USN 52. При работе с дефектоскопом в материал исследуемых образцов излучались упругие широкополосные ультразвуковые импульсы в диапазоне частот 1—10 МГц. Прибором регистрировали время распространения и амплитуду прошедших в образце эхоимпульсов. Время распространения и затухания упругих волн в контролируемой среде определяли между первым и вторым донными сигналами,

что позволило исключить влияние электрических цепей, контактной смазки и т.д. Измерения в каждой точке проводили не менее пяти раз, результаты обрабатывали с помощью программного комплекса Statistica.

Анализировали микроструктуру на микроскопе МИМ-8, увеличение  $\times 100$ , изображения микроструктур обрабатывали с помощью программы-анализатора изображений SIAMSPHOTOlab (SIAMGISResearch). Структурную составляющую кремния у образцов оценивали по площади, периметру, минимальной, максимальной и средней проекциям частиц. Анализ каждой структуры проводили по пяти полям зрения общей площадью 5,8 мм<sup>2</sup>. При обработке данных использовались стандартные программы Excel.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Структура исследованных образцов приведена на рис. 2, их основные характеристики представлены в табл. 1.

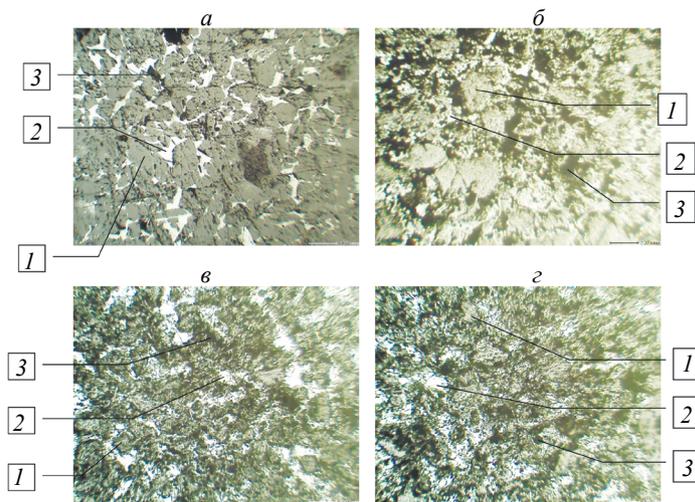


Рис. 2. Структура образцов из карбидокремниевых материалов,  $\times 100$ :

*a* — образец № 1; *б* — образец № 2; *в* — образец № 3; *г* — образец № 4; 1 — зерна карбида кремния; 2 — зерна кремния; 3 — зерна графита.

Таблица 1

## Характеристика исследованных материалов

Параметры материала	Образец			
	1	2	3	4
Карбид кремния, %	96	45	45	45
Кремний, %	4,5	20	20	20
Графит, %	Ост	35	35	35
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	3300	2450	2510	2490
Модуль Юнга, ГПа	430	120	110	100
Скорость продольной волны, м/с	11 800	7400	7300	6730
Скорость поперечной волны, м/с	7523	4900	4600	3840
Затухание продольной волны, дБ/м 4 МГц	0,45	0,58	0,63	0,55
Предел прочности при изгибе, МПа	200	110	150	140
Кремний, площадь, мкм <sup>2</sup>	650,8	409,4	858,2	441,9

Карбидокремниевые материалы получают пропиткой волокнистой углеродной основы кремнием, находящимся в жидкой и газообразной фазах. В результате взаимодействия пористой углеродной основы с кремнием формируется объемный пористый каркас из карбида кремния, в котором в основном находятся не вступившие во взаимодействие углерод и кремний, а также возможно наличие пористых областей макроскопических размеров (см. рис. 2). При этом количественное соотношение фаз в разных объемах образца может изменяться в несколько раз. Это свидетельствует о неоднородности распределения компонентов в материале.

Содержание фазы карбида кремния в карбидокремниевых материалах является наиболее важным фактором, определяющим свойства материала. Зависимость прочности и модуля Юнга от содержания фазы карбида кремния в материале носит экспоненциальный характер (см. табл. 1). Модуль Юнга может достигать 500 ГПа (предел прочности при изгибе — до 400 МПа [8]) при содержании карбида кремния до 100 %, при содержании карбида кремния порядка 50 % эти показатели имеют значения: модуль Юнга — 100 ГПа, предел прочности — 100 МПа.

Результаты акустических исследований показывают, что структура карбидокремниевых материалов оказывает существенное влияние на параметры упругих волн (см. табл. 1). Из представленных результатов видно, что все исследованные материалы можно разделить по скорости звука на две группы: имеющие скорость ~11 800 м/с (образец 1) и ~7000 м/с (образцы 2—4). Для образца 1 (скорость продольной волны ~11 800 м/с, плотность 3300 кг/м<sup>3</sup>, частота 5 МГц) затухание составляет 0,37 дБ/м, для образцов 2—4 (скорость продольной волны ~7000—6730 м/с, плотность 2450—2510 кг/м<sup>3</sup>, частота 5 МГц) — 0,586—0,63 дБ/м.

Уменьшение размеров структурной составляющей кремния (образцы 2—4) приводит к значимому уменьшению затухания при практически неизменной скорости распространения продольной волны.

Изменение акустических характеристик образцов из карбидокремниевых материалов зависит от его фазового состава. Можно считать, что основное влияние на скорость распространения и затухание продольной ультразвуковой волны оказывает содержание в них карбида кремния. В случае, когда содержание карбида кремния составляет 96 %, наблюдаем наибольшую скорость распространения продольных и сдвиговых волн. Эти данные хорошо коррелируют с результатами акустических исследований: определение модулей упругости через значение скоростей упругих волн. В частности, модуль Юнга [7] может быть определен следующим образом:

$$E = \frac{\rho \cdot C_s^2 \cdot (3C_l^2 - 4C_s^2)}{C_l^2 - C_s^2}, \quad (1)$$

где  $C_s$  — скорость поперечной волны, м/с;  $C_l$  — скорость продольной волны, м/с;  $\rho$  — плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Численные значения модулей упругости, вычисленные с использованием результатов акустических измерений (см. табл. 1), совпадают с данными механических испытаний.

Таким образом, видим, что упругие волны чувствительны к структуре материала. Это позволяет сделать вывод об обоснованном применении ультразвукового метода для контроля изделий трибосопряжений из карбидокремниевых материалов.

### ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ

Для предотвращения разрушения материала в эксплуатационных условиях проводят так называемые провоцирующие испытания, имитирующие работу материала в штатных условиях [9, 10]: при повышенной температуре и давлении. Их продолжительность — несколько суток. В процессе длительной эксплуатации, а также при провоцирующих испытаниях в некоторых случаях наблюдается разрушение изделий, связанное с образованием новых фаз, взаимодействие которых обусловлено локальными объемными изменениями, вызванными твердофазным химическим взаимодействием.

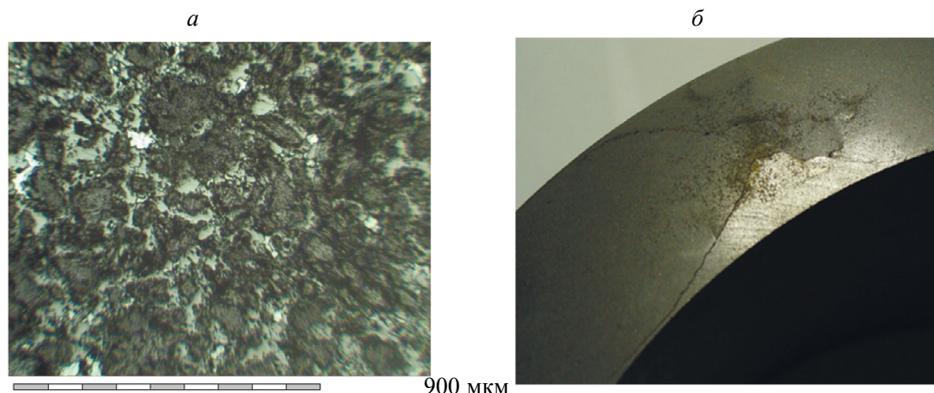


Рис. 3. Структура материала подшипника,  $\times 100$  (а); вид зоны разрушения подшипника (б).

Результаты исследований на образцах были использованы для разработки методики оценки работоспособности материала подшипникового узла, которая была апробирована на штатном узле в условиях, моделирующих работу подшипника в штатном режиме эксплуатации. Узел представляет собой кольцо диаметром 320 и толщиной 22 мм. В качестве материала был использован материал, по своим исходным характеристикам близкий образцу 2 (рис. 3а). Результаты акустических исследований и показания вихретокового дефектоскопа (измеряли по пять значений) представлены на рис. 4.

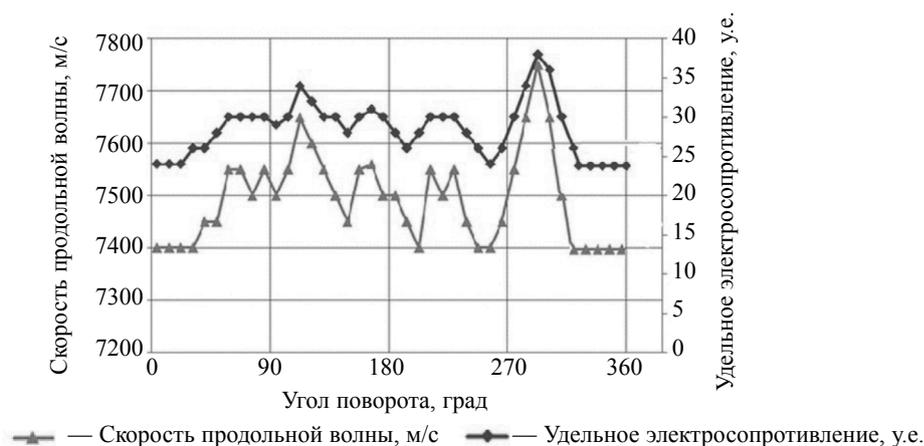


Рис. 4. Изменение скорости продольной волны и показаний вихревых токов по длине кольца.

Данные исследований работоспособности материала показали, что разрушение начинается в области, соответствующей значению скоростей ультразвука, превышающих на 1,5 % средние значения скорости по измеренному кольцу.

Если в качестве измеряемого параметра используются характеристики вихревых токов, то критерием годности кольца служит изменение значений вихревых токов более чем на 40 % от среднего значения по кольцу. Разрушение подшипников происходило в 98,3 % случаях в областях, совпадающих с наличием существенных отличий показаний значения скорости упругих волн и значений вихревых токов от средних значений этих же параметров, измеренных на кольце. Применение токовихревого метода контроля позволяет значительно экономить время и на начальной стадии

производства изделий из карбидокремниевых материалов отбраковывать уже заведомо плохие заготовки из данного материала. Вид подшипника в зоне разрушения показан на рис. 3б.

## ВЫВОДЫ

В данной работе экспериментально было показано влияние структуры карбидокремниевых материалов на акустические характеристики и параметры вихревых токов.

Скорость распространения продольной и сдвиговой волн зависит от количества карбида кремния, увеличение которого в карбидокремниевых материалах приводит к росту скоростей упругих волн. При содержании карбида кремния скорость распространения продольных волн достигает значений 12 000 м/с.

Экспериментально продемонстрирована возможность использования неразрушающих (акустического и вихретокового) методов контроля для изделий из карбидокремниевых материалов. Показано, что наиболее вероятным местом разрушения в процессе проведения провоцирующих испытаний являются области образцов, в которых наблюдается отклонение от средних значений: скорости ультразвука — до 1,5, показаний вихретокового дефектоскопа — до 40 %.

Неразрушающие методы контроля позволяют перейти от выборочной проверки (разрушающими методами) свойств материалов на специально изготовленных образцах к 100-процентному контролю на готовых изделиях без их разрушения или повреждения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы. М.: Металлургия, 1977. 216 с.
2. Шикунов С.Л. Получение и использование новых карбидокремниевых материалов для различных применений // *Материаловедение*. 2012. № 5. С. 51—57.
3. Тарабанов А.С., Костиков В.И. Силицированный графит. М.: Металлургия, 1977. 208 с.
4. Неразрушающий контроль / Справочник. В 8 т. Под ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2006. 861 с.
5. Неразрушающий контроль / Справочник. В 8 т. Под ред. В.В. Клюева Т. 2. М.: Машиностроение, 2006. 687 с.
6. Яковлев С.Г. Методы и аппаратура магнитного и вихретокового контроля / Учеб. пособие. Спб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. 88 с.
7. Хлыбов А.А., Васильев В.Г., Углов А.Л. Определение физико-механических характеристик образцов, подвергаемых радиационному облучению // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2009. Т. 73. № 12. С. 46—49.
8. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: МИСИС, 1998. 400 с.
9. Иляхинский И.А., Бугреев А.В., Иляхинский А.В., Родюшкин В.М. Неразрушающий контроль структуры карбидокремниегографитового композита акустическим методом // *Атомная энергия*. Декабрь 2015. Т. 119. Вып. 6.
10. Боровков М.Н., Бугреев А.В., Иляхинский И.А., Курицын В.С., Шишкин В.А. Исследование износостойкости материалов пар трения подшипников скольжения и определение их триботехнических характеристик при сухом трении в среде гелия // *Вопросы материаловедения*. 2012. № 4 (72). С. 388—393.