

УДК 620.179.16:621.039.53

DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-3-376-385

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ПАР ТРЕНИЯ НАСОСОВ УСТАНОВОК ВВЭР\*

© 2022 г. **Ерофеев В.И.<sup>1</sup>, Иляхинский А.В.<sup>1</sup>, Родюшкин В.М.<sup>1</sup>,  
Иляхинский И.А.<sup>2,3</sup>, Пичков С.Н.<sup>2,3</sup>, Хлыбов А.А.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального  
исследовательского центра «Институт прикладной физики РАН»,  
Нижний Новгород, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Российская Федерация*

<sup>3</sup>*Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация*

ilyahinsky-aleks@bk.ru

*Поступила в редакцию 17.05.2022*

Экспериментально продемонстрирована возможность использования неразрушающих методов контроля состояния карбидокремниевых материалов пар трения насосов установок водо-водяных энергетических реакторов, позволяющая выявить на рабочей поверхности подшипников потенциальные места будущего возможного разрушения. Изложена методология исследований акустических свойств и электропроводности изделий из карбидокремниевых композиций. Установлена взаимосвязь электропроводности и акустических параметров материала пар трения с характеристиками микроструктуры исследуемого материала. В качестве аппаратной части излучения и приема акустических импульсов был использован прибор фирмы Krautkramer USN 52 с излучателями-приемниками продольных и поперечных волн. Для оценки электропроводности использовался вихретоковый измеритель удельной электропроводности ВТ2 с накладным преобразователем 5 кГц, имеющим в качестве индикаторного устройства стрелочный преобразователь с равномерной шкалой, не проградуированной в единицах электропроводности. Измерения электропроводности и скорости продольных и поперечных волн, поляризованных по радиусу, в одних и тех же точках рабочей поверхности подшипника показали совпадение характера изменения результатов этих измерений. Путем измерения скоростей поперечных волн с поляризацией параллельно и перпендикулярно радиусу установлено наличие в материале подшипников, не прошедших испытания в условиях повышенного давления и температуры, значительных внутренних напряжений, провоцирующих появление разрушений (сколов) на рабочей поверхности. Превышение значения скорости продольных волн в зоне разрушения над средним значением для всей рабочей поверхности подшипника достигает 30%, превышение значения электропроводности над средним значением достигает 40%.

---

\*Выполнено в рамках госзадания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021–2023 гг. по теме №0030-2021-0025 и при поддержке РФФИ (грант №20-07-00914).

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

## **Введение**

В настоящее время обеспечение состояния защищенности жизненно важных интересов личности и общества от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера является одной из приоритетных задач развития науки и техники в Российской Федерации. Обеспечение эффективной, надежной и безопасной работы объектов атомного машиностроения, в которых применяются изделия из углерод-карбидокремниевых материалов, определяется особенностью их физико-механических свойств, обладающих высокой окислительной стойкостью, высокой прочностью и способностью работать в ряде агрессивных сред. Одним из представителей этих материалов является силицированный графит (SiSiC), который представляет собой композитный материал с керамической матрицей, получаемый по технологии реактивной пропитки при температуре 1600 °С расплавом кремния специально созданной пористой углеродной основы [1]. При пропитке одновременно происходят процессы смачивания и растекания жидкого кремния по поверхности углеродной основы, а также процессы взаимодействия углерода и кремния, в результате которых от 20 до 70% кремния превращаются в карбид кремния [2, 3]. Влияние на процесс образования карбида кремния множества факторов (температура, время, скорость нагрева, скорость взаимодействия кремния с углеродом) приводит к тому, что выпускаемые в настоящее время углерод-карбидокремниевые материалы по уровню ликваций не всегда в полной мере удовлетворяют высоким требованиям, предъявляемым к изделиям, изготавливаемым из этого класса материалов. Поэтому операция контроля стабильности структуры и свойств углерод-карбидокремниевых материалов рассматривается как неотъемлемая часть технологических процессов изготовления узлов трибосопряжений агрегатов атомной энергетики. Для этого применяются различные методы, способы, технологии, в частности неразрушающий контроль. Неразрушающий контроль позволяет перейти от выборочной проверки свойств материалов на специально изготовленных образцах к стопроцентному контролю свойств готовых изделий. На практике наибольшее распространение получил ультразвуковой контроль [4–6], как обладающий высокой чувствительностью, мобильностью и экологичностью, а также радиационный [7, 8] и оптический [9], успешно выявляющие опасные дефекты и объективно фиксирующие полученные результаты. В зависимости от поставленных задач используют и другие методы контроля, например электрические [10], магнитоэлектрические [11, 12], магнитные [13] и вихретоковые [14], которые позволяют проводить контроль свойств проводящих сред на поверхности и в подповерхностном слое. Каждый из методов неразрушающего контроля имеет свои достоинства и недостатки и используется для выполнения определенного типа измерений. Стопроцентный рентгеновский контроль заготовок силицированного графита однозначно отсеивает такие дефекты, как непросилицированные участки, раковины, трещины, участки «непропрессов», но не дает однозначного ответа на вопрос, разрушится изделие из этого материала в дальнейшем или нет. Испытания готовых изделий в условиях высоких температур и давлений, имитирующих эксплуатационные режимы, позволяют выявить разрушения на рабочей поверхности подшипников, однако требуют больших затрат времени и ресурсов [15]. Универсального метода, увы, нет: физика процессов разная, технические реализации

методик контроля различаются. Поэтому каждый из методов контроля используется там, где его эффективность будет максимальной при минимальных затратах. Это требует разработки новых и совершенствования существующих методов оценки состояния углерод-карбидокремниевых материалов, работающих в условиях высокого теплового нагружения и окислительной среды [16–20].

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования были выбраны пары трения пяти подшипников электронасосов системы охлаждения в установках с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР), изготовленные из силицированного графита марок СГП-0,5 (на основе нефтяного пиролизного кокса), СГП-0,5П (на основе пекового кокса) и ПРОГ-2400. Внешний вид пар трения подшипников представлен на рис 1.



Рис. 1. Внешний вид пары трения

Основные методы исследования материала пар трения включали в себя:

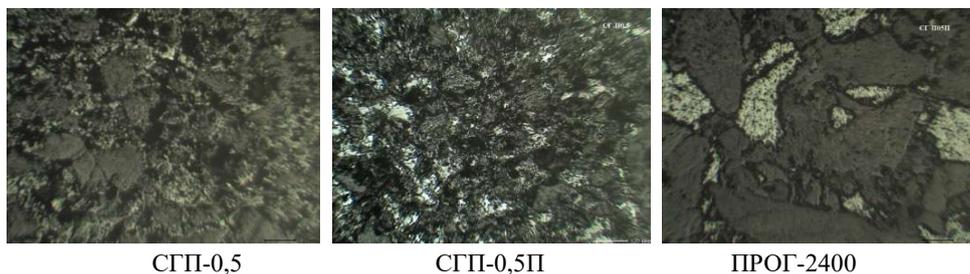
- металлографический метод (металлографический микроскоп МИМ-8 с программой – анализатором изображений SIAMSPhotolab (SIMAGISResearch), разработанной компаниями SIAMS (Россия) и Smart Imaging Technologies (США)). Проведена оценка структурной составляющей карбида кремния по параметрам: площадь, периметр, минимальная, максимальная и средняя проекция частиц. Анализ каждой структуры проводился по пяти полям зрения общей площадью 5,8 мм<sup>2</sup>;

- ультразвуковой эхо-импульсный метод (дефектоскоп Krautkramer USN 52 с пьезоэлектрическими преобразователями продольных волн b2s, seb4, mb4s, g5kb с частотами 2, 4 и 5 МГц и пьезоэлектрическими преобразователями поперечных волн mb4y и mb2y с частотами 2 и 4 МГц). Проводилась оценка скорости и затухания продольных и поперечных волн;

- вихретоковый метод (вихретоковый измеритель удельной электропроводности ВТ2 с накладным преобразователем 5 кГц, имеющим в качестве индикаторного устройства стрелочный преобразователь с равномерной шкалой, не проградуированной в единицах электропроводности). Измерение электропроводности проводилось в относительных единицах, электропроводность воздуха принята за 0, электропроводность меди М1 принята за 100.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Структура материала исследуемых пар трения приведена на рис. 2. Результаты исследований структуры и акустических свойств силицированного графита приведены на рис. 3 и в таблице 1.



СГП-0,5

СГП-0,5П

ПРОГ-2400

Рис. 2. Микроструктура материала исследуемых пар трения

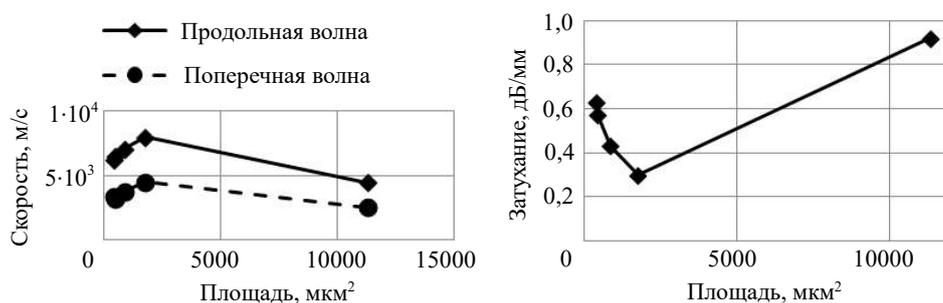


Рис. 3. Влияние размеров включений карбида кремния на скорость и затухание упругих волн

Таблица 1

**Результаты исследования структуры и акустических свойств силицированного графита**

Подшипник	1	2	3	4	5
Марка материала	СГП-0,5П	СГП-0,5	СГП-0,5П	СГП-0,5	ПРОГ-2400
Скорость продольной волны, м/с	6200±130	7075±140	6500±124	8000±160	4450±90
Скорость поперечной волны, м/с	3410±120	3750±130	3185±125	4480±150	2537±100
Затухание продольной волны 2 МГц, дБ/мм	0,63±0,01	0,43±0,01	0,57±0,01	0,3±0,01	0,92±0,02
Электропроводность, отн. ед.	23±5	30±5	25±5	39±5	19±5
Площадь, мкм <sup>2</sup>	409±49	858±21	441±95	1755±92	11304±75
Периметр, мкм	117±26	196±63	115±71	335±93	437±78
Минимальная проекция, мкм	19±02	26±79	19±54	41±96	55±83
Максимальная проекция, мкм	35±1	51±3	34±2	79±5	95±6
Средняя проекция, мкм	27±1	40±2	27±3	62±7	77±5

Металлографический анализ показал, что основой структуры силицированного графита является структура пористой углеродной основы (см. рис. 2). Данные, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о большом разбросе акустических свойств и параметров структуры материалов одной марки. При этом скорость распространения упругой волны (см. рис. 3) зависит от размеров ликваций карбида кремния. Однако, если для материалов СГП-0,5 и СГП-0,5П увеличение размеров равномерно

распределенных ликваций карбида кремния (см. таблицу 1) приводит к увеличению скорости упругой волны и снижению затухания, то у материала ПРОГ-2400, для которого продольные размеры ликваций больше поперечных (см. рис. 2), анизотропия структуры приводит к снижению скорости и увеличению затухания при увеличении площади и периметра ликваций карбида кремния, что делает проблематичной идентификацию размеров включений кремния в структуре силицированного графита по скорости и затуханию упругих волн. О неоднородности свойств материала свидетельствует разброс данных о затухании упругих волн в различных точках одного и того же изделия (рис. 4). В отдельных точках затухание было настолько велико, что определение параметров распространения волны в этих точках имеющимися средствами на частотах 4 и 5 МГц становилось невозможным. При этом общие закономерности поведения поглощения волн в композите соответствовали нормам. Так, например, для одного и того же изделия поглощение поперечных волн было меньше, чем продольных, так как поперечные волны не связаны с адиабатическим изменением объема, при котором появляются потери на теплопроводность.

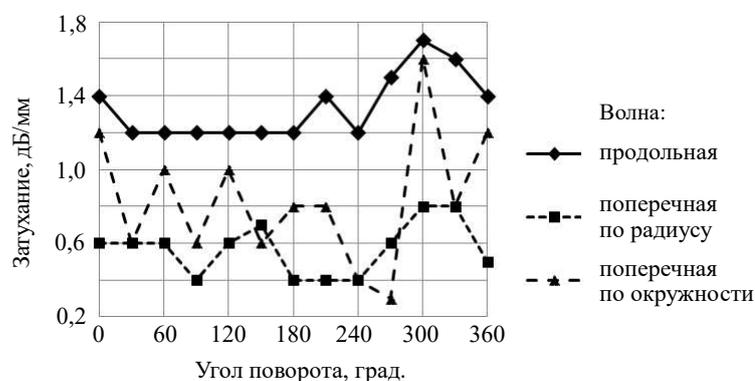


Рис. 4. Затухание упругих волн по окружности подшипника

Результаты измерения скоростей продольных упругих волн показали, что наибольшую неоднородность свойств по окружности рабочей поверхности имеет подшипник, изготовленный из материала ПРОГ-2400, наименьшую – из материала СПП-0,5. При этом отличие величин скоростей поперечных упругих волн, поляризованных вдоль радиуса и вдоль окружности поверхности пары трения в зоне повышенной неоднородности материала (300 °С для подшипника из материала ПРОГ-2400), составило 50%, в то время как это отличие в других участках этого же изделия не превышало 20%. Последнее свидетельствует о том, что причиной анизотропии акустических свойств силицированного графита является не только, как было отмечено выше, форма включений карбида кремния, но и большие внутренние напряжения.

Следует отметить, что при проведении анализа волновых явлений на предмет практической ценности нужно учитывать, что применение упругих волн для зондирования объекта усложняется при работе с изделиями с плохим качеством поверхности из-за трудностей, связанных с высокочастотными колебаниями. Вихретоковый контроль основан на анализе взаимодействия электромагнитного поля внешнего источника (обмотка возбуждения вихретокового преобразователя) с электромагнитным полем вихревых токов, возбуждаемых в объекте контроля переменным магнитным полем преобразователя. Достоинством метода вихретокового контроля

по сравнению с акустическими методами является то, что его можно проводить при отсутствии контакта между преобразователем и исследуемым изделием. Результаты измерения электропроводности материала исследуемых образцов в относительных единицах (см. таблицу 1) позволили установить связь между электропроводностью, скоростью и затуханием упругих волн, которая представлена на рис. 5.

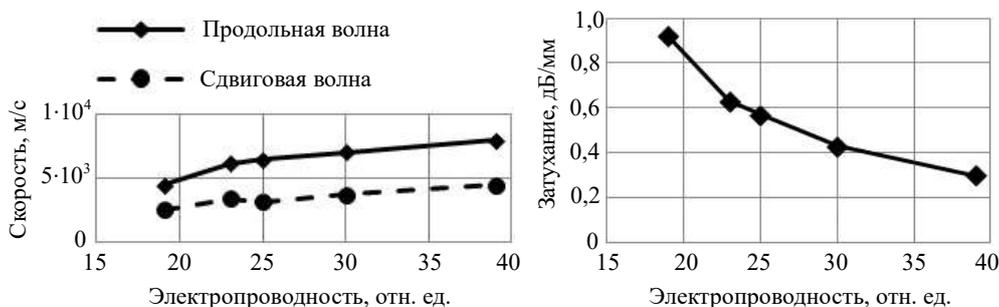


Рис. 5. Влияние электропроводности силицированного графита на скорость и затухание упругих волн

При возрастании электропроводности силицированного графита марок СГП-0,5, СГП-0,5П и ПРОГ-2400 скорость продольных и поперечных волн возрастает, а затухание убывает. Измерения электропроводности и затухания продольной волны по длине рабочей поверхности пары трения подшипника из материала ПРОГ-2400 (рис. 6) показали, что при отклонении максимального значения затухания продольных волн от его среднего значения в 27% отклонение минимального значения электропроводности от среднего значения составило 38%.

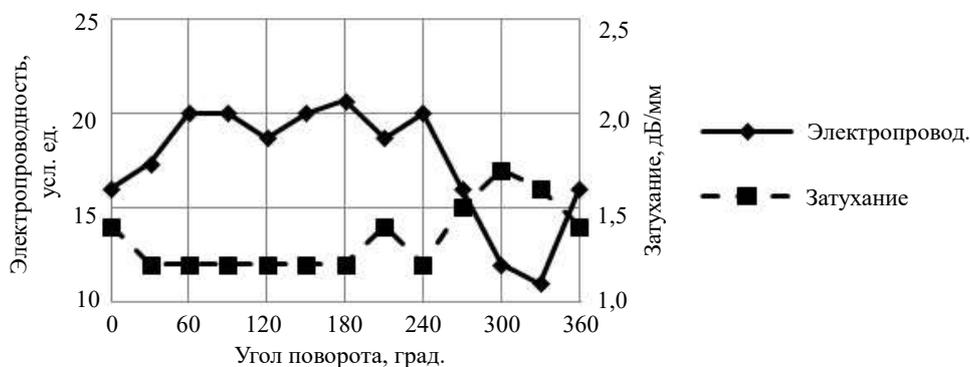


Рис. 6. Изменение электропроводности и затухания по рабочей поверхности пары трения

После проведения измерений электропроводности, скорости и затухания продольных волн все кольца были подвергнуты десяти циклам провоцирующих испытаний при давлении 180 кг/см<sup>2</sup> и температуре 150 °С. Каждый цикл включал в себя разогрев до 150 °С, выдержку при этой температуре в течение одного часа и расхолаживание до 40–50 °С. По завершении провоцирующих испытаний на рабочей поверхности кольца ПРОГ-2400 в зоне участка зафиксированных повышенных напряжений обнаружено вспучивание рабочей поверхности подшипника с растрескиванием (рис. 7).



Рис. 7. Дефект на рабочей поверхности подшипника после проведения провоцирующих испытаний

### Заключение

Проведено исследование структуры и свойств силицированного графита марок СГП-0,5, СГП-0,5П и ПРОГ-2400. Исследование показало, что основной структуры силицированного графита является структура пористой углеродной основы.

Скорость распространения и затухание продольной и поперечных волн зависит от размеров и формы ликваций карбида кремния. Если для материалов СГП-0,5 и СГП-0,5П увеличение размеров равномерно распределенных ликваций карбида кремния приводит к увеличению скорости упругой волны и снижению затухания, то у материала ПРОГ-2400 анизотропия структуры приводит к снижению скорости и увеличению затухания при увеличении площади и периметра ликваций карбида кремния.

Установлено, что причиной разрушения поверхностного слоя рабочей зоны подшипников является присутствие в материале силицированного графита значительных внутренних напряжений, наличие которых может быть установлено акустическим или токовихревым методом контроля.

Показано, что наиболее вероятным местом разрушения являются области образцов, в которых отклонение от средних значений скорости ультразвука достигает 30% и показаний вихретокового дефектоскопа – 40%.

### Список литературы

1. Курлов В.Н., Шикунов С.Л. Получение композиционных материалов на основе карбида кремния силицированием углеродных матриц. *Журнал технической физики*. 2017. Т. 87. №12. С. 1871–1878. DOI: 10.21883/JTF.2017.12.45212.2291.
2. Шикунов С.Л., Филонов К.Н., Ершов А.Е., Классен Н.В., Курлов В.Н. Получение и использование новых карбидокремниевых материалов для различных применений. *Материаловедение*. 2012. №5. С. 51–57.
3. Dezellus O., Jacques S., Hodaj F., Eustathopoulos N. Wetting and infiltration of carbon by liquid silicon. *Journal of Materials Science*. 2005. Vol. 40. Iss. 9-10. P. 2307–2311. DOI: 10.1007/S10853-005-1950-7.
4. Ефимов И.М. Современное оборудование для ультразвукового контроля сварных соединений. *В мире неразрушающего контроля*. 2019. Т. 22. №3. С. 36–42. DOI: 10.12737/article\_5d5fd14cb04e89.60292443.
5. Буйло С.И., Верескун В.Д., Колесников В.И. и др. Определение коэффициента трения на стадии приработки и диагностика точки перехода к стационарной фазе по сигналам акустической эмиссии. *Дефектоскопия*. 2020. №1. С. 44–45. DOI: 10.31857/S0130308220010054.
6. Zhao W., Zhou W. Cluster analysis of acoustic emission signals and tensile properties of carbon/glass fiber reinforced hybrid composites. *Structural Health Monitoring*. 2019. Vol. 18. P. 1686–1697. DOI: 10.1177/1475921719833467.

7. Елисеев Д.П., Леонова Т.Г., Федорович С.Н. и др. Применение методов рентгенографии для анализа качества сварного соединения бериллиевых деталей. *В мире неразрушающего контроля*. 2020. Т. 23. №1. С. 72–76. DOI: 10.12737/1609-3178-2020-68-72.
8. Ларин А.А., Федотов М.Ю., Будадин О.Н. и др. Исследования возможности оценки повреждений трехслойных конструкций при ударном воздействии методом компьютерной рентгеновской томографии. *Контроль. Диагностика*. 2020. Т. 23. №10(268). С. 20–28. DOI: 10.14489/td.2020.10.pp.020-028.
9. Шугуров А.Р., Кузьминов Е.Д., Панин С.В. Применение методов анализа оптических изображений поверхностей трения на основе Ti-Al-N для оценки накопления повреждений и диагностики разрушения при трибологических испытаниях. *Дефектоскопия*. 2020. №8. С. 22–34. DOI: 10.31857/S0130308220080035.
10. Мусихин А.С., Сясько В.А. Электроискровой контроль сплошности защитных лакокрасочных покрытий. *В мире неразрушающего контроля*. 2018. Т. 21. №2. С. 42–45. DOI: 10.12737/article\_5b279fdf2b2da1.00411404.
11. Бусько В.Н., Осипов А.А. Исследование и оценка механической анизотропии сталей и сплавов магнитошумовым методом. *В мире неразрушающего контроля*. 2020. Т. 23. №3(89). С. 50–57. DOI: 10.12737/1609-3178-2020-50-56.
12. Ronggao C., Li Sh., Wang Z., Wang X. A modified residual stress dependent Jile-Atherton hysteresis model. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018. Vol. 465. P. 578–584. DOI: 10.1016/J.JMMM.2018.06.021.
13. Бызов А.В., Ксенофонтов Д.Г., Костин В.Н., Василенко О.Н. Селективный магнитный контроль толщины и степени упрочнения поверхностных слоев на стальных объектах. *Дефектоскопия*. 2021. №12. С. 39–45. DOI: 10.31857/S0130308221120046.
14. Чичигин Б.А., Клещук С.М., Спиридонов П.В. и др. Опыт вихретокового контроля труб теплообменного оборудования АЭС. *В мире неразрушающего контроля*. 2021. Т. 24. №1(91). С. 14–18. DOI: 10.12737/1609-3178-2021-14-18.
15. 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 геля. *Вопросы материаловедения*. 2012. №4(72). С. 388–393.
16. Pyakhinskii I.A., Bugreev A.V., Ilyakhinskii A.V., Rodyushkin V.M. Acoustic nondestructive testing of silicon carbide/graphite composite. *Atomic Energy*. 2016. Vol. 119. No 6. P. 414–418. DOI: 10.1007/s10512-016-0083-1.
17. Khlybov A.A. Studying the effect of microscopic medium inhomogeneity on the propagation of surface waves. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. Vol. 54. Iss. 6. P. 385–393. DOI: 10.1134/S1061830918060049.
18. Хлыбов А.А., Иляхинский И.А. Неразрушающий контроль изделий из карбидокремниевых материалов. *Дефектоскопия*. 2019. №1. С. 39–43. DOI: 10.1134/S01303082190100068.
19. Kiyashko M.V., Grinchuk P.S., Kuznetsova T.A., Kren A.P., Abuhimd H.M. Determination of elastic modulus of sic-based composite ceramics. *Technical Physics Letters*. 2021. Vol. 47. Iss. 2. P. 150–153. <https://doi.org/10.1134/S1063785021020073>.
20. Гринчук П.С., Абухимд Х., Акулич А.В. и др. Высокотеплопроводная карбидокремниевая керамика для крупногабаритной космической оптики. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2019. Т. 63. №2. С. 223–234. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-223-234>.

#### References

1. Kurlov V.N., Shikunov S.L. Poluchenie kompozitsionnykh materialov na osnove karbida kremniya silitsirovaniem uglerodnykh matrirts [Obtaining composite materials based on silicon carbide by siliconization of carbon matrices]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics]*. 2017. T. 87. No 12. P. 1871–1878 (In Russian).
2. Shikunov S.L., Filonov K.N., Ershov A.E., Klassen N.V., Kurlov V.N. Poluchenie i ispolzovanie novykh karbidokremnievykh materialov dlya razlichnykh primeneniy [Obtaining and using new silicon carbide materials for various applications]. *Materialovedenie [Materials Science Journal]*. 2012. No 5. P. 51–57 (In Russian).

3. Dezellus O., Jacques S., Hodaj F., Eustathopoulos N. Wetting and infiltration of carbon by liquid silicon. *J. Mater. Sci.* 2005. Vol. 40. Iss. 9-10. P. 2307–2311. DOI:10.1007/S10853-005-1950-7.
4. Efimov I.M. Sovremennoe oborudovanie dlya ultrazvukovogo kontrolya svarnykh soedineniy [Modern equipment for ultrasonic inspection of welded joints]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [*NDT World*]. 2019. Vol. 22. No 3. P. 36–42 (In Russian).
5. Builo S.I., Vereskun V.D., Kolesnikov V.I. et al. Determining friction coefficient at run-in stage and diagnosing the point of transition to steady-state phase based on acoustic emission signals. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. Vol. 56. Iss. 1. P. 41–48. DOI: 10.1134/S1061830920010039.
6. Zhao W., Zhou W. Cluster analysis of acoustic emission signals and tensile properties of carbon/glass fiber reinforced hybrid composites. *Struct. Health. Monit.* 2019. Vol. 18. P. 1686–1697. DOI: 10.1177/1475921719833467.
7. Eliseev D.P., Leonova T.G., Fedorovich S.N. et al. Primenenie metodov rentgenografii dlya analiza kachestva svarnogo soedineniya berillievyykh detaley [Use of radiography techniques to analyze the quality of beryllium parts welding]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [*NDT World*]. 2020. Vol. 23. No 1. P. 72–76 (In Russian).
8. Larin A.A., Fedotov M.Yu., Budadin O.N. et al. Issledovaniya vozmozhnosti otsenki povrezhdeniy trekhslonnykh konstruksiy pri udarnom vozdeystvii metodom kompyuternoy rentgenovskoy tomografii [Researches of the possibility of assessing damage to three-layer structures by impact damage by method of computed X-ray tomography]. *Kontrol. Diagnostika* [*Testing. Diagnostics*]. 2020. Vol. 23. No 10(268). P. 20–28 (In Russian).
9. Shugurov A.R., Kuz'minov E.D., Panin S.V. Using methods of analysis of optical images of friction surfaces of Ti-AL-N based coatings for assessing accumulation of damage and diagnostics of failure in tribological tests. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. Vol. 56. No 8. P. 635–646. DOI: 10.1134/S1061830920080100.
10. Musikhin A.S., Syasko V.A. Elektroiskrovoy kontrol sploshnosti zashchitnykh lakokrasochnykh pokrytiy [High-voltage spark testing of protective refinish coatings continuity]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [*NDT World*]. 2018. Vol. 21. No 2. P. 42–45 (In Russian).
11. Busko V.N., Osipov A.A. Issledovanie i otsenka mekhanicheskoy anizotropii staley i splavov magnitoshumovym metodom [Research and evaluation of the mechanical anisotropy of steel and alloys by the magnetic noise method]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [*NDT World*]. 2020. Vol. 23. No 3(89). P. 50–57 (In Russian).
12. Ronggao C., Li Sh., Wang Z., Wang X. A modified residual stress dependent Jile-Atherton hysteresis model. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018. Vol. 465. P. 578–584. DOI: 10.1016/J.JMMM.2018.06.021.
13. Byzov A.V., Ksenofontov D.G., Kostin V.N., Vasilenko O.N. Selektivnyy magnitnyy kontrol tolshchiny i stepeni uprochneniya poverkhnostnykh sloev na stalnykh ob'ektakh [Selective magnetic testing of thickness and degree of hardening of surface layers of steel objects]. *Defektoskopiya* [*Russian Journal of Nondestructive Testing*]. 2021. No 12. P. 39–45 (In Russian).
14. Chichigin B.A., Kleshchuk S.M., Spiridonov P.V. et al. Opyt vikhretkovogo kontrolya trub teploobmennogo oborudovaniya AES [Eddy current experience of pipe NPP heat exchange equipment testing]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [*NDT World*]. 2021. Vol. 24. No 1(91). P. 14–18 (In Russian).
15. Borovkov M.N., Bugreev A.V., Ilyakhinsky I.A., Kuritsyn V.S., Shishkin V.A. Issledovanie iznosostoykosti materialov par treniya podshipnikov skolzheniya i opredelenie ikh tribotekhnicheskikh kharakteristik pri sukhom trenii v srede geliya [Study of wear resistance of material couples of slide bearings and determination of its tribological characteristics under dry friction conditions in the helium]. *Voprosy materialovedeniya* [*Voprosy Materialovedeniya*]. 2012. No 4(72) P. 388–393 (In Russian).
16. Ilyakhinskii I.A., Bugreev A.V., Ilyakhinskii A.V., Rodyushkin V.M. Acoustic nondestructive testing of silicon carbide/graphite composite. *At. Energy*. 2016. Vol. 119. No 6. P. 414–418. DOI: 10.1007/s10512-016-0083-1.
17. Khlybov A.A. Studying the effect of microscopic medium inhomogeneity on the propagation

of surface waves. *Russ. J. Nondestr. Test.* 2018. Vol. 54. Iss. 6. P. 385–393. DOI: 10.1134/S1061830918060049.

18. Khlybov A.A., Ilyakhinskii I.A. Nerazrushayushchiy kontrol' izdeliy iz karbidokremnievykh materialov [Non-destructive testing of products made of silicon carbide materials]. *Defektoskopiya [Russian Journal of Nondestructive Testing]*. 2019. No 1. P. 39–43 (In Russian).

19. Kiyashko M.V., Grinchuk P.S., Kuznetsova T.A., Kren A.P., Abuhimd H.M. Determination of elastic modulus of sic-based composite ceramics. *Tech. Phys. Lett.* 2021. Vol. 47. Iss. 2. P. 150–153. <https://doi.org/10.1134/S1063785021020073>.

20. Grinchuk P.S., Abuhimd H., Akulich A.V. et al. Vysokoteploprovodnaya karbidokremnievaya keramika dlya krupnogabaritnoy kosmicheskoy optiki [High thermal conductivity silicon-carbide ceramics for large-size space optics]. *Doklady Natsionalnoy akademii nauk Belarusi [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus]*. 2019. Vol. 63. No 2. P. 223–234 (In Russian).

## NON-DESTRUCTIVE TESTING OF MATERIAL CONDITION FRICTION STEAM OF WWER PUMPS

**Erofeev V.I.<sup>1</sup>, Ilyakhinskii A.V.<sup>1</sup>, Rodyushkin V.M.<sup>1</sup>,  
Ilyakhinskii I.A.<sup>2</sup>, Pichkov S.N.<sup>2,3</sup>, Khlybov A.A.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences –  
Branch of Federal Research Center “Institute of Applied Physics of the RAS”,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

<sup>2</sup>*JSC “OKBM Afrikantov”, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

The possibility of using non-destructive methods for monitoring the state of silicon carbide materials in friction pairs of pumps of WWER installations has been experimentally demonstrated which makes it possible to identify potential sites of future possible destruction on the working surface of bearings. The paper describes the methodology for studying the acoustic properties and electrical conductivity of products made of silicon carbide composite. The relationship between the electrical conductivity and acoustic parameters of the material of friction pairs of WWER installations with the characteristics of the microstructure of the material under study has been experimentally established. As the hardware part of the emission and reception of acoustic pulses Krautkramer USN 52 device certified by the State Standard of Russia with emitters and receivers of longitudinal and transverse waves was used. To assess the electrical conductivity a VT2 eddy current electrical conductivity meter with a 5 kHz clamp-on transducer was used which has a pointer transducer with a uniform scale not graduated in electrical conductivity units as an indicator device. Measurements of the electrical conductivity and velocity of longitudinal and transverse waves polarized along the radius at the same points of the working surface of the bearing showed the coincidence of the nature of the change in the measurement results. In this case, if the excess of the value of the velocity of longitudinal waves in the fracture zone over the average value for the entire working surface of the bearing is up to 30%, then for electrical conductivity it is 40%. By measuring the velocities of transverse waves with polarization parallel and perpendicular to the radius, the presence in the material of bearings that have not passed tests under conditions of high pressure and temperature of significant internal stresses provoking the appearance of destruction (chips) on the working surface has been established.

**Keywords:** silicon carbide material, electrical conductivity, elastic waves, velocity, attenuation, eddy currents, microstructure.