

Должное внимание в уделено вопросам исследования жизненных циклов разработанных рабочих мест калибровщика средств измерения температуры.

На этапе планирования конкретного рабочего места была рассмотрена вся возможная совокупность параметров и требований, предъявляемых к его реализации при данных условиях применения, и выделенные ключевые (метрологические, эксплуатационные, технические, экономические и др.), определяющие его структуру.

Эти параметры легли в основу формирования следующего этапа жизненного цикла – разработки рабочего места, в результате чего было разработано его техническое описание с требуемыми характеристиками и материальное воплощение.

Важным этапом жизненного цикла предлагаемого рабочего места калибровщика является метрологическое подтверждение его пригодности к применению. При этом предлагаются модели подтверждения пригодности как методик калибровки, так и самого рабочего места.

Для поддержания рабочего места в рабочем состоянии в ходе эксплуатации необходимо осуществлять мониторинг его характеристик, что позволяет получать информацию о его текущем состоянии, в том числе информацию о потере заданных характеристик. В случае получения данных, показывающих ухудшение характеристик рабочего места и нарушении его нормального функционирования, следует провести анализ с целью выявления причин, приведших к несоответствию требованиям. В качестве инструмента анализа предлагается использовать дисперсионный анализ.

Решение рассмотренных вопросов позволит изменить подходы к методологии метрологиче-

ской оценки средств измерения температуры, поставить вопрос поверки и калибровки на более качественный уровень, обеспечить более эффективную работу калибровочных лабораторий, сэкономить затраты.

Литература

1. Дивин, А. Г. Средства измерения температуры, оптических и радиационных величин. Часть 3: учебное пособие / А. Г. Дивин, С. В. Пономарев. – Тамбов : ФБГОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 116 с.
2. Об утверждении Правил осуществления метрологической оценки в виде работ по калибровке средств измерений. Постановление государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 23 апреля 2021 г. № 42.
3. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Поверка средств измерений. Правила проведения работ : ТКП 8.003-2011 (03220).
4. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные положения и определения : СТБ ИСО 5725-1.
5. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений : СТБ ИСО 5725-2.
6. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода : СТБ ИСО 5725-3.
7. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений : СТБ ИСО 5725-4.
8. Системы менеджмента. Менеджмент измерений. Анализ измерительных систем : СТБ 2450-16.
9. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры : ГОСТ 8.558.
10. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Калибровка средств измерений. Организация и порядок проведения» : СТБ 8014.

УДК 539.533

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КЕРАМИКИ

Лапицкая В.А., Кузнецова Т.А., Чижик С.А., Хабарова А.В., Трухан Р.Э.

ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Описана методика определения вязкости разрушения для керамики, в том числе и для отдельных ее фаз, методом индентирования с визуализацией области деформации при помощи атомно-силового микроскопа. Обоснован выбор формул для расчета критического коэффициента интенсивности напряжений, характеризующего вязкость разрушения.

Ключевые слова: методика, вязкость разрушения, критический коэффициент интенсивности напряжений, керамика, атомно-силовая микроскопия, наноиндентирование.

METHOD FOR DETERMINING THE FRACTURE TOUGHNESS OF CERAMICS

Lapitskaya V., Kuznetsova T., Chizhik S., Habarova A., Trukhan R.

A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus
Minsk, Belarus

Abstract. A method for determining the fracture toughness for ceramics, including for its individual phases, by indentation with visualization of the deformation region using an atomic force microscope is described. The choice of formulas for calculating the critical stress intensity coefficient characterizing the fracture toughness is justified.

Key words: methodology, fracture toughness, critical stress intensity coefficient, ceramics, atomic force microscopy, nanoindentation.

Адрес для переписки: Лапцкая В.А., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Одним из параметров, характеризующих предельное состояние любого твердого материала, является трещиностойкость или вязкость разрушения, т.е. способность сопротивляться развитию трещин [1–5]. Данный параметр чрезвычайно актуален для различных видов керамик (карбидной, оксидной, нитридной) и покрытий [6] на их основе, сочетающих в себе особые физико-механические, теплофизические, биоинертные, антиокислительные и износостойкие свойства [1–5]. Количественно вязкость разрушения характеризуется критическим коэффициентом интенсивности разрушения K_{IC} . Существует множество способов для количественного определения данной характеристики. Все они различаются методами и схемами приложения нагрузки: изгиб, кручение, индентирование и др. [1].

Одним из методов, который будет рассматриваться в данной работе, является метод индентирования. Проблема в ограничении применимости данного метода заключается в использовании больших нагрузок (от 1 Н и более), которые невозможно применять к отдельным фазам материала или к покрытиям. А при применении меньших нагрузок (меньше 1 Н) стоит задача точно визуализировать область деформации и формирующиеся трещины, чего не могут обеспечить оптическая и сканирующая электронная микроскопии. Предлагаемый в данной работе метод атомно-силовой микроскопии для визуализации области деформации с высокой точностью позволит существенно расширить возможности применения метода индентирования для определения вязкости разрушения, вплоть до отдельных фаз в материале и отдельных элементов МЭМС.

Целью работы являлось разработать методику определения вязкости разрушения для керамики, в том числе и для отдельных ее фаз, методом индентирования с визуализацией области деформации при помощи атомно-силового микроскопа.

Разработанная методика вязкости разрушения керамики основана на методе индентирования алмазной пирамидой Виккерса в поверхность образцов под заданной нагрузкой [7]. Отпечатки индентирования на образцах выполняются с по-

мощью микротвердомера. В качестве индентора используется алмазный наконечник типа Виккерс. Нагрузка на индентор может изменяться от 0,01 до 5,0 Н в зависимости от материала и размера образца. Расстояние между отпечатками должно составлять не менее четырех диагоналей отпечатка. При каждой нагрузке требуется выполнять не менее трех отпечатков по схеме «3 сек. внедрение индентора – далее 10 сек. выдержка под нагрузкой – затем 3 сек. разгрузка».

Визуализация области деформации (отпечатка индентирования) проводится с помощью атомно-силового микроскопа. По полученным АСМ-изображениям определяют следующие параметры, требуемые для расчета K_{IC} : диагонали отпечатка d , длину трещин из центра отпечатка c , длину трещины возле отпечатка l . Длина полудиагонали a определялась как $d/2$.

Выбор правильного подхода и формулы расчета K_{IC} зависит от вида формирующихся трещин возле отпечатка индентирования и отношения длины трещины c , измеренной из центра отпечатка индентирования, к длине полудиагонали отпечатка a . Также значение K_{IC} существенно зависит от формулы, по которой проводятся расчеты.

В работе [8] установлено, что наиболее точными значения получаются по формулам, в которые входят параметры, как и самого отпечатка индентирования (длина диагоналей d) и длина образованных трещин l и c , так и параметры, характеризующие материал (микротвердость H_V и модуль упругости E). Наиболее подходящими являются формулы, полученные Ниихара К. [9]:

$$K_{IC} = 0.048 \left(\frac{l}{a}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{H_V}{E\Phi}\right)^{-\frac{2}{5}} \cdot \left(\frac{H_V a^2}{\Phi}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$K_{IC} = 0.129 \left(\frac{c}{a}\right)^{-\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{H_V}{E\Phi}\right)^{-\frac{2}{5}} \cdot \left(\frac{H_V a^2}{\Phi}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости, ГПа; H_V – твердость по Виккерсу, ГПа; P – нагрузка на индентор, Н; Φ – показатель реакции связи в кристаллической решетке ($\Phi \approx 3$); c – длина трещины из центра

отпечатка, m ; l – длина трещины возле отпечатка, m ; a – длина полудиagonали отпечатка, m .

Условие выбора формулы из приведенных выше зависит от отношения c/a : если $c/a < 2,5$, то в образце образуются трещины Палмквиста и расчет проводят по формуле (1), а если $c/a > 2,5$, то в образце образуются медианные трещины и расчет проводят по формулам (2) [9].

При определении величины K_{IC} наибольшую ошибку может внести погрешность при определении длины трещины. Неточность в длине трещины в 200 нм приводит к погрешности в K_{IC} на кремнии в 0,05–0,15 МПа·м^{1/2} (5–7 %). Если же пользоваться оптикой и не распознавать треть длины трещин при малых нагрузках, погрешность может составлять 30–35 % [6]. В данной работе критерием вершины трещины был профиль АСМ в ее окрестности. Началом трещины считалась точка на ее контуре, выявленном АСМ, в которой глубина профиля отличалась от профиля в недеформированной области.

Так как при индентировании Виккерсом в материале образуются трещины, то значения микротвердости по Виккерсу H_V (используемые для определения K_{IC}) не совсем верные. При индентировании часть энергии тратится на образование трещины и таким образом вносит погрешность в определении микротвердости по Виккерсу H_V . Следовательно, при расчетах K_{IC} нужно использовать значения H , полученные при помощи наноиндентора с алмазным наконечником типа Беркович и нагрузки не более 10 мН, при которых гарантированно не образуются трещины в материале. Такой подход представляется более корректным.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке и в рамках задания 2.3 ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии» на 2021–2023 годы.

УДК 53.084

ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ SO₂ В ВУЛКАНИЧЕСКИХ ВЫБРОСАХ

Литвинович Г.С., Бручковский И.И.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлена конструкция инструмента для полевых измерений SO₂ в вулканических выбросах.

Ключевые слова: ДОАС, УФ-спектрометр для полевых измерений, вулканические выбросы.

INSTRUMENT FOR SO₂ MEASUREMENTS IN VOLCANIC EMISSIONS

Litvinovich H., Bruchkouski I.

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems BSU
Minsk, Belarus*

Abstract. The paper is dedicated to the instrument design for field measurements of SO₂ in volcanic emissions.

Key words: DOAS, UV-spectrometer for field measurements, volcanic emissions.

*Адрес для переписки: Бручковский И.И., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: bruchkovsky2010@yandex.by*

Литература

1. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем / В. В. Москвичев [и др.]. – Новосибирск : Наука, 2002. – 334 с.
2. Третьяков, Ю. Д. Керамика в прошлом, настоящем и будущем / Ю. Д. Третьяков // Соровский образовательный журнал. – 1998. – № 6. – С. 53–59.
3. Карбид кремния: технологии, свойства, применение / Агеев О. А. [и др.]; под ред. А. Е. Беляева и Р. В. Конаковой. – Харьков : ИСМА, 2010. – 532 с.
4. Гринчук, П. С. Получение плотной реакционно-связанной керамики на основе карбида кремния / П. С. Гринчук [и др.] // Тепло- и массообмен – 2017 : сборник научных трудов. – Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси ; редкол.: О. Г. Пенязьков. – Минск, 2017. – С. 56–68.
5. Башта, А. В. Определение твердости и трещиностойкости конструкций керамики методом индентирования / А. В. Башта // Вестник НТУ “ХПИ” ; редкол.: М. И. Рыщенко. – Харьков, 2010. – С. 106–113.
6. Механические и триботехнические свойства нитридных и оксинитридных покрытий на основе хрома и циркония, полученных электродуговым испарением / Вархолински Б. [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 2. – С. 209–217.
7. Определение трещиностойкости с использованием АСМ / Лапицкая В.А. [и др.] // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии : сборник докладов 13 международной конференции, Минск, 16–19 окт. 2018 г. / Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси ; редкол.: С. А. Чижик – Минск, 2018. – С. 260–266.
8. Influence of polishing technique on crack resistance of quartz plates / V. A. Lapitskaya [et al.] // International Journal of Fracture – 2021. – Vol. 231. – P. 61–77.
9. Niihara, K. A fracture mechanics analysis of indentation-induced Palmqvist crack in ceramics / K. Niihara // J Mater Sci Lett. – 1983. – Vol. 2. – P. 221–223.