

Методики оценки напряженно-деформированных состояний хрупкими тензочувствительными покрытиями

В. Н. Пермяков¹, Н. А. Махутов², В. Л. Мартынович³,
С. А. Еренчинов¹, Л. А. Казанцева^{1*}

¹Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

²Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук,
Москва, Россия

³Институт прикладных исследований газовой промышленности, Тюмень, Россия

*kazantsevala@tyuiu.ru

Аннотация. Раннее предсказание аварийной ситуации имеет большое значение, особенно для объектов с высокой ценой аварии. Это связано с тем, что по сигналам ранней диагностики оказывается возможным прекратить процесс развития аварийной ситуации до перехода ее в необратимую фазу, когда уже приходится рассматривать последствия аварии. Здесь важны два аспекта. Во-первых, своевременная фиксация сигнала о начале развития нештатной работы оборудования; во-вторых, необходимо четко отфильтровывать ложные сигналы, так как они могут привести к немотивированной остановке оборудования и к экономическим потерям.

Выход из этой ситуации видится в комплексировании различных методов, с тем чтобы различные помехи, принципиальные для одного метода, оказывали слабое влияние на результаты, даваемые другим методом. Такой подход в совокупности с адекватной обработкой результатов позволит выдавать надежные данные в начале аварийного развития процесса.

Рассматриваются высокочувствительные методы ранней диагностики с целью определения времени безопасной работы оборудования при обнаружении сигнала о начале аварийного процесса. Это дает возможность при наличии модели развития аварийной ситуации принять обоснованное решение: немедленно останавливать работу либо без серьезной опасности продолжать работу оборудования до следующего планового ремонта.

В работе исследуются комбинированные методы диагностики: хрупкие тензочувствительные покрытия, акустическая эмиссия, генерация аэрозольных частиц и техническое зрение.

Методологическая оценка физико-механических свойств покрытий, связи величин напряжений и деформаций с параметрами выходных сигналов приборов в лабораторных условиях проводилась на балках различного профиля, что позволило повысить точность измерений и качества новых тензочувствительных покрытий.

Ключевые слова: хрупкие покрытия, деформация, напряжение, неразрушающий контроль

Для цитирования: Методики оценки напряженно-деформированных состояний хрупкими тензочувствительными покрытиями / В. Н. Пермяков, Н. А. Махутов, В. Л. Мартынович [и др.]. – DOI 10.31660/0445-0108-2023-2-116-128 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2023. – № 2. – С. 116–128.

Methods for assessing stress-strain states of brittle strain sensitive coatings

**Vladimir N. Permyakov¹, Nikolay A. Makhutov²,
Vladimir L. Martynovich³, Sergey A. Erenchinov¹,
Lyudmila A. Kazantseva^{1*}**

¹*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia*

²*Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Institute for Applied Research of the Gas Industry, Tyumen, Russia*

*kazantsevala@tyuiu.ru

Abstract. Early prediction of an emergency situation is of great importance, especially for objects with high accident costs. This is due to the fact that, according to the signals of early diagnosis, it is possible to stop the development of an emergency before it enters an irreversible phase, when it is already necessary to consider the consequences of the accident. There are two important aspects to this work. Firstly, the timely detection of the signal at the beginning of the development of abnormal operation of the equipment; secondly, it is necessary to clearly filter out false signals, since they can lead to unmotivated shutdown of the equipment and economic losses.

The way out of this situation is seen in the combination of different methods, so that different interferences, which are fundamental for one method, have little effect on the results given by another method. This approach, together with appropriate processing of the results, will provide reliable data at the beginning of the emergency development of the process.

This article discusses highly sensitive methods of early diagnosis to determine the time of safe operation of equipment when a signal of the onset of an emergency process is detected. This allows an informed decision to be made in the presence of an emergency development model: to stop work immediately or to continue operating the equipment without serious risk until the next scheduled repair.

The article considers combined methods of diagnosis: fragile strain-sensitive coatings, acoustic emission and aerosol particle generation, technical vision.

A methodological evaluation of the physical and mechanical properties of the coatings, the relationship between the stress and strain values and the parameters of the output signals of the devices under laboratory conditions was carried out on beams of various profiles, which made it possible to improve the accuracy of the measurements and the quality of the new strain-sensitive coatings.

Keywords: brittle coatings, deformation, stress, non-destructive testing

For citation: Permyakov, V. N., Makhutov, N. A., Martynovich, V. L., Erenchinov, S. A., & Kazantseva, L. A. (2023). Methods for assessing stress-strain states of brittle strain sensitive coatings. *Oil and Gas Studies*, (2), pp. 116-128. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2023-2-116-128

Введение

Первые искусственные покрытия для определения напряжений и деформаций стали применять в середине 20-х годов прошлого века. При нанесении такого покрытия образовывались трещины материалов и конструкций при незначительных деформациях.

Метод хрупких покрытий обладает приемлемой погрешностью и высокой информативностью на больших площадях общей и локальной поверхности.

Хрупкие тензочувствительные покрытия являются пассивным методом неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния материалов и конструкций [1].

Объект и методы исследования

В Институте машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) [1–9] тензочувствительность хрупких покрытий определяли на тарировочной балке, представляющей собой прямоугольный объект, один конец которой закреплен неподвижно, другой конец нагружается определенной силой. На балку наносили хрупкое покрытие, деформация которого измерялась в разных точках с помощью тензодатчиков (рис. 1).

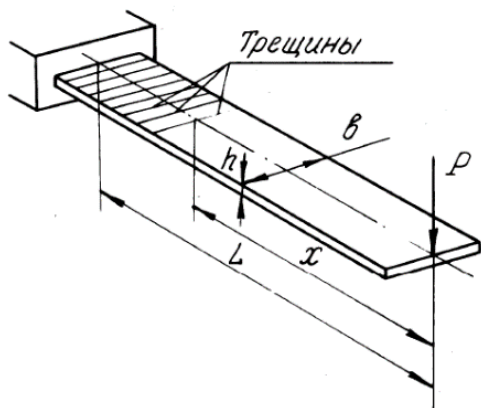


Рис. 1. Определение тензочувствительности хрупкого покрытия по методике ИМАШ

Для определения характеристик тензочувствительности хрупкого покрытия рассматривались напряженные состояния, возникающие в покрытии на поверхности тарировочной балки (рис. 2) при ее консольном изгибе.

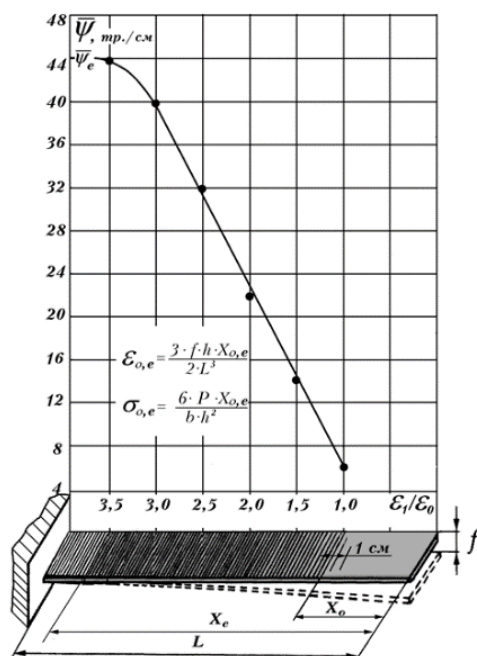


Рис. 2. Определение характеристик тензочувствительности хрупких покрытий на тарировочных балках: $\epsilon_0(\sigma_0)$ — пороговая деформация (напряжение) образования трещин в покрытии; $\epsilon_e(\sigma_e)$ — пороговая деформация (напряжение) отслаивания покрытия; ψ — средняя численность трещин в покрытии на базе 1 см; ψ_e — численность трещин, соответствующая деформации отслаивания

Для исследования новых покрытий [10–12] и методов тарировки, оценки характеристик покрытий (рис. 3) эксперименты проводили на балке равного сопротивления [13].

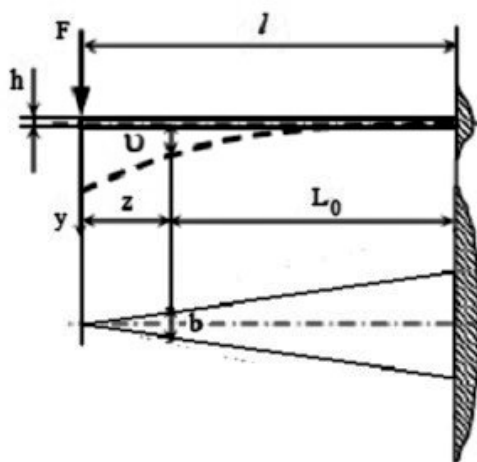


Рис. 3. Схема балки равного сопротивления (вид сверху):
b — ширина балки; h — высота сечения балки; l — длина балки

Критическое значение напряжения при испытаниях на балке, которое действует перпендикулярно к образующимся трещинам, вычисляют по закону Гука (формула 1)

$$\sigma^M = E^M \cdot \varepsilon^* = \sigma^*, \quad (1)$$

где E^M — модуль упругости исследуемого объекта.

Интерпретировать полученные результаты лучше по упрощенной формуле 2

$$\sigma_1^M = E^M \cdot \varepsilon^* = \frac{E^M}{E^{\pi}} \cdot \sigma^*. \quad (2)$$

Грузы задавали величину прогиба (v_0), с помощью индикатора часового типа определялось отклонение балки от положения равновесия.

Определяем напряжение на консольной балке (σ) по формуле 3

$$\sigma = \frac{6 \cdot F}{h^2 \cdot \alpha}, \quad (3)$$

где α — коэффициент, зависящий от длины и наибольшей ширины балки, $\alpha = \frac{b(l)}{l}$; F — сила тяжести, которая рассчитывается по формуле 4

$$F = m \cdot 9,81. \quad (4)$$

Далее замерялось расстояние от центра нагрузки до первой трещины, полученной при нагрузке балки.

По снятым значениям вычисляли деформацию (ε) по формуле 5

$$\varepsilon = \frac{h \cdot v_0}{l_0^2}, \quad (5)$$

где h — толщина балки, мм; v_0 — отклонение балки от начального положения, мм; l_0 — расстояние от начала балки до первой трещины.

Одним из наиболее привлекательных и относительно новых методов неразрушающего контроля и технической диагностики (НК и ТД) является метод акустической эмиссии (АЭ). В его основе регистрация звуковых сигналов, излучающихся при пластической деформации твердых сред, развитии дефектов, трении, прохождении жидких и газообразных сред через узкие отверстия — сквозные дефекты. Метод АЭ обладает рядом достоинств, благодаря которым существенно расширяются возможности ТД и НК [14, 15].

Метод АЭ как метод неразрушающего контроля и технической диагностики есть совокупность научных моделей, специализированных технических средств, промышленных методик, технологий и подходов, применение которых предоставляет возможность предотвратить катастрофическое разрушение объекта.

Кроме того, метод АЭ обладает также потенциалом мощного инструмента исследования различных процессов в реальном времени, то есть позволяет наблюдать и изучать динамику этих процессов.

Применяя метод АЭ, можно детально изучать в реальном времени процессы деформации, разрушения, перестройки структуры, химических реакций, взаимодействия излучения с веществом и т. д.

Метод АЭ основан на регистрации и анализе акустических волн, возникающих в процессе пластической деформации и разрушения (роста трещин) контролируемых объектов. Это позволяет формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки состояния объекта, основанные на реальном влиянии дефекта на объект. Другим источником АЭ-контроля является истечение рабочего тела (жидкости или газа) через сквозные отверстия в контролируемом объекте.

Характерными особенностями метода АЭ-контроля, определяющими его возможности и область применения, являются следующие:

- метод АЭ-контроля обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности;
- метод АЭ-контроля обладает весьма высокой чувствительностью к растущим дефектам — позволяет выявить в рабочих условиях приращение трещины порядка долей мм. Предельная чувствительность акустико-эмиссионной аппаратуры по теоретическим оценкам составляет

порядка $1 \cdot 10^{-6}$ мм², что соответствует выявлению скачка трещины протяженностью 1 мкм на величину 1 мкм;

- свойство интегральности метода АЭ-контроля обеспечивает контроль всего объекта с использованием одного или нескольких преобразователей АЭ-контроля, неподвижно установленных на поверхности объекта;
- метод АЭ позволяет проводить контроль различных технологических процессов и процессов изменения свойств и состояния материалов;
- положение и ориентация объекта не влияют на выявляемость дефектов;
- метод АЭ имеет меньше ограничений, связанных со свойствами и структурой материалов;
- особенностью метода АЭ, ограничивающей его применение, является в ряде случаев трудность выделения сигналов АЭ из помех. Это объясняется тем, что сигналы АЭ являются шумоподобными, поскольку АЭ есть стохастический импульсный процесс. Поэтому, когда сигналы АЭ малы по амплитуде, выделение полезного сигнала из помех представляет собой сложную задачу.

При развитии дефекта, когда его размеры приближаются к критическому значению, амплитуда сигналов АЭ и темп их генерации резко увеличиваются, что приводит к значительному возрастанию вероятности обнаружения такого источника АЭ.

Метод АЭ может быть использован для контроля объектов при их изготовлении, в процессе приемочных испытаний, при периодических технических обследованиях, в процессе эксплуатации.

Целью АЭ-контроля является обнаружение, определение координат и слежение (мониторинг) за источниками акустической эмиссии, связанными с несплошностями на поверхности или в объеме стенки объекта контроля, сварного соединения и изготовленных частей и компонентов. Все индикации, вызванные источниками АЭ, должны быть при наличии технической возможности оценены другими методами неразрушающего контроля.

АЭ-метод может быть использован также для оценки скорости развития дефекта в целях заблаговременного прекращения испытаний и предотвращения разрушения изделия. Регистрация АЭ позволяет определить образование свищей, сквозных трещин, протечек в уплотнениях, заглушках и фланцевых соединениях.

АЭ-контроль технического состояния обследуемых объектов проводится только при создании в конструкции напряженного состояния, инициирующего в материале объекта работу источников АЭ. Для этого объект подвергается нагружению силой, давлением, температурным полем и т. д. Выбор вида нагрузки определяется конструкцией объекта и условиями его работы, характером испытаний.

На рисунке 4 представлены экспериментальные акустико-эмиссионные исследования, график «Длительность, мкс/Амплитуда, дБ» по временным интервалам нагружения [12, 16].

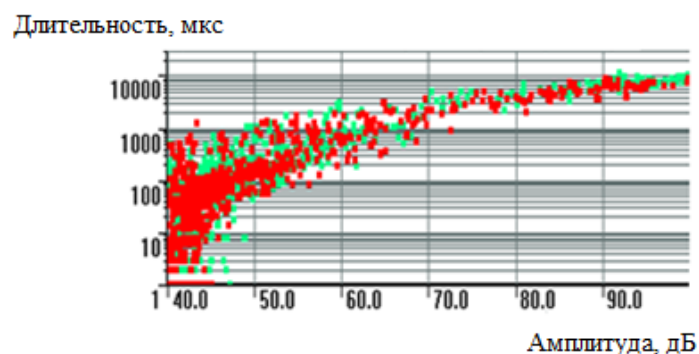


Рис. 4. Акустические сигналы при разрушении тензочувствительных покрытий

Свойства аэрозолей существенным образом зависят от количества взвешенных частиц. В технике чистых помещений основной характеристикой, описывающей количество частиц, является счетная концентрация частиц — среднестатистическое количество отдельных аэрозольных частиц определенного размера, содержащееся в единице объема воздуха.

Задачи механики аэрозолей — разработка адекватных физико-математических моделей процессов и явлений эволюции аэрозолей и создание эффективных экспериментальных методик их исследования, которые не только верифицируют теоретические предсказания, но и открывают новые стороны явлений и процессов. В результате мы должны объяснить существующие факты в данной научной области, а также получить возможность предсказывать с необходимой точностью ход процессов [7, 12, 16–18].

Результаты и обсуждение

Исследования проводились в лаборатории с нормальными параметрами микроклимата, влажность составляла 45 %, температура воздуха — 21 °С.

В проведенных исследованиях использовалось хрупкое покрытие на основе канифоли. Канифоль измельчалась до состояния порошка, затем наносилась на тарировочную балку. Перед нанесением хрупкого покрытия балка тщательно зачищалась мелкой наждачной бумагой, затем обезжиривалась спиртом или ацетоннитритом.

На всю длину балки наносилась подложка из пластификатора, растворенного до жидкого состояния. Толщина слоя составляла 0,1 мм.

Время высыхания подложки составляло около 20 минут, чем тоньше слой, тем меньше времени, затрачивалось на высыхание слоя подложки.

После на балку наносится слой порошкообразной канифоли, толщина которого составляла 1–1,5 мм, по длине всей балки. Измерение толщины слоя нанесенного покрытия проводили с помощью толщиномера.

Далее балка нагревается при помощи нагревательного прибора до температуры 84 °С. При такой температуре нанесенный слой плавится, об-

разу тонкое хрупкое покрытие, состояние которого должно быть прозрачным и однородным.

После образования тонкого прозрачного покрытия испытуемая балка охлаждалась до комнатной температуры. Время охлаждения составляет около 60 минут.

Для получения наиболее достоверной информации эксперимент проводился при равномерной сушке покрытия, так как изменение температуры или влажности могли привести к изменению характеристик покрытия.

Следующий этап проведения эксперимента — это нагружение балки и определение деформации.

Нагружение балки с нанесенным покрытием проводим ступенчато, при этом каждая последующая нагрузка проводится через 20 секунд, за это время снимаются визуальные показания трещин.

Форма трещин представляет собой V-образные профили, глубина которых будет равна толщине нанесенного слоя, раскрытие трещин — 0,05 мм.

Визуально снимаем показания образования трещин на хрупком покрытии после каждой ступени нагружения. Чем больше нагружается балка (1–5), тем больше образуется трещин, которые показывают напряжение и деформации самой балки (рис. 5).

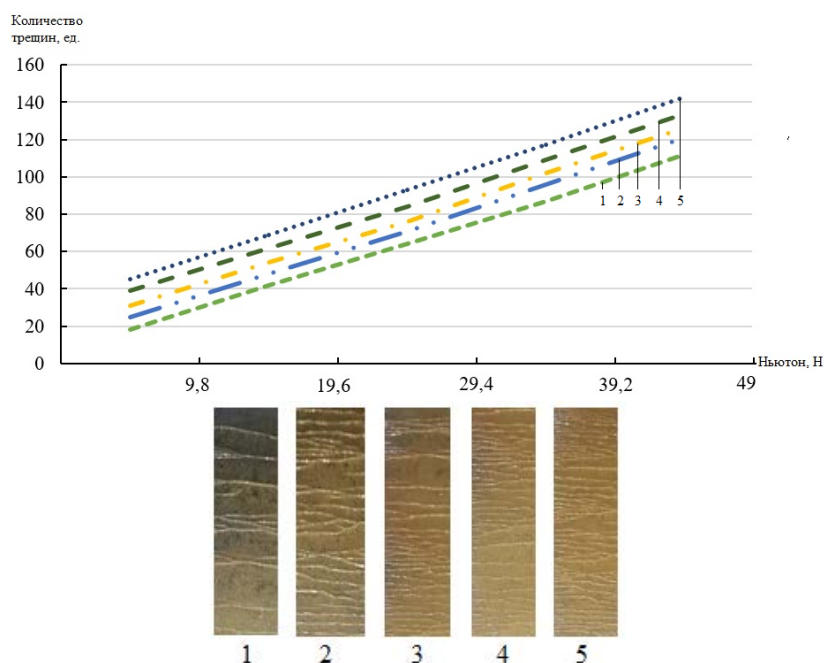


Рис. 5. Зависимость числа трещин от приложенной нагрузки

Эксперимент проводился при растягивающей нагрузке.

При повышении уровня растягивающей нагрузки до $P = 43$ МПа происходит разрушение образца.

На рисунке 6 приведены графики изменения счетной концентрации микрочастиц, зарегистрированные в ходе нагружения образца с применением лазерного счетчика Lighthouse Handheld 3016 [16].

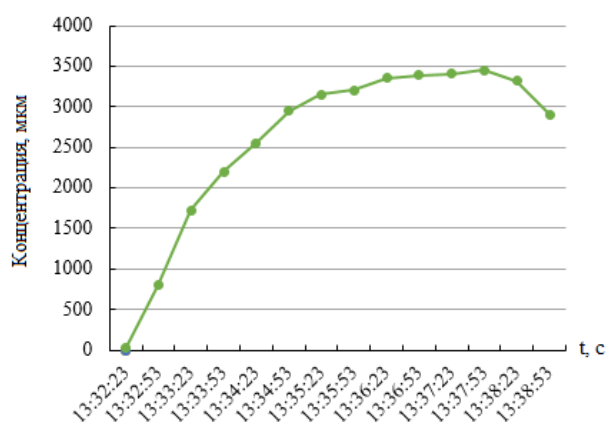


Рис. 6. **Диаграмма счета аэрозольных частиц**

С целью упрощения регистрации трещин, повышения точности измерений и повышения безопасности при воздействии статических и циклических нагрузок возможно применение классических и комбинированных методов диагностики (рис. 7) [10–12].

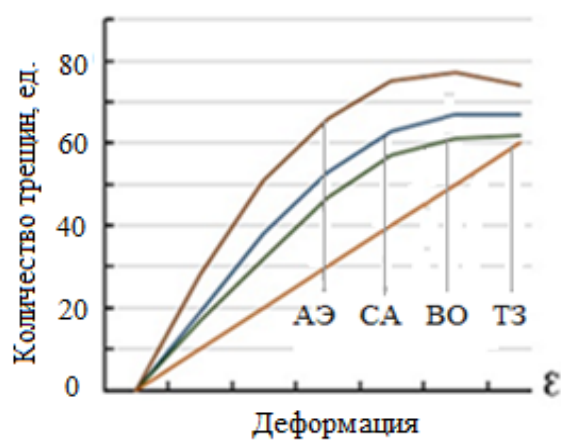


Рис. 7. **Оценка количества трещин различными методами диагностики при нагружении равнопрочной балки: АЭ — акустическая эмиссия; СА — счетчик аэрозолей; ВО — визуально-оптический метод; ТЗ — техническое зрение**

Выводы

Таким образом, в лабораторном и промышленном эксперименте по оценке деформаций в балках различного типа и напряженно-

деформированного состояния конструкций применялась комбинированная диагностика, что позволило определить новые зависимости свойств хрупких тензочувствительных покрытий в принципиально разных условиях нагружения и деформирования, характерные фазы свойств хрупких тензочувствительных покрытий и реальные уровни деформаций и напряжений.

Список источников

1. Махутов, Н. А. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов : монография / Н. А. Махутов, В. Н. Пермьяков ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Тюменский государственный нефтегазовый ун-т. – Новосибирск : Наука – 2005. – 516 с. – Текст : непосредственный.
2. Аппен, А. А. Температурустойчивые неорганические покрытия / А. А. Аппен. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Химия, 1976. – 295 с. – Текст : непосредственный.
3. Васильев, И. Е. Определение напряжений в экстремальных условиях методом хрупких тензочувствительных покрытий : специальность 05.02.19 «Экспериментальная механика машин» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Васильев Игорь Евгеньевич. – Москва, 1999. – 222 с. – Текст : непосредственный.
4. Голубев, А. И. Анодное окисление алюминиевых сплавов / А. И. Голубев. – Москва : Изд-во АН СССР, 1961. – 200 с. – Текст : непосредственный.
5. Durelli, A. Introduction to the theoretical and experimental analysis of stress and strain / A. Durelli, E. Phillips, C. Tsao. – New York : McCraw Hill Book Comp., 1958. – 498 p. – Direct text.
6. Пригоровский, Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений : справочник / Н. И. Пригоровский. – Москва : Машиностроение, 1983. – 248 с. – Текст : непосредственный.
7. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию / П. Райст ; перевод с английского Б. И. Огородникова, А. Б. Садовского, А. К. Будыка ; под редакцией Б. Ф. Садовского. – Москва : Мир, 1987. – 278 с. – Перевод изд.: Introduction to aerosol science / P. C. Reist. London, 1984. – Текст : непосредственный.
8. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике : справочник / Под редакцией Б. Е. Неймарк. – Москва – Ленинград : Энергия, 1967. – 240 с. – Текст : непосредственный.
9. Handbook on experimental mechanics / Edited by A. S. Kobayashi. – Prentice-Hall : Society for Experimental Mechanics, Inc. 1987. – 1002 p. – Direct text.
10. Патент № 2609185 Российская Федерация, МПК G01B 7/16 G01B 17/04. Способ исследования деформаций и напряжений с помощью газоанализатора : заявл. 23.09.2015 : опубл. 30.01.2017, Бюл. № 1 / Пермьяков В. Н., Махутов В. Н., Сидельников С. Н. : патентообладатель Тюменский индустриальный университет. – Текст : непосредственный.
11. Патент № 2712758 Российская Федерация, МПК G01N 21/88 G06T 7/181 G01B 11/16. Способ исследования деформаций и напряжений методом технического зрения : заявл. 07.06.19 : опубл. 31.01.20, Бюл. № 4 / Пермьяков В. Н., Гордеев Д. В. : патентообладатель Тюменский индустриальный университет. – Текст : непосредственный.

12. Патент № 2505779 Российская Федерация, МПК G01B 5/30. Способ регистрации трещин в хрупких тензоиндикаторах : заявл. 17.07.2012 : опубл. 27.01.2014, Бюл. № 3 / Махутов Н. А., Пермяков В. Н., Александров П. А., Иванов В. И. Новоселов В. В. : патентообладатель Тюменский индустриальный университет. – Текст : непосредственный.
13. Сопротивление материалов / А. Ф. Смирнов, А. В. Александров, Н. И. Монахов [и др.] ; под общей редакцией А. Ф. Смирнова. – 2-е изд., перераб. – Москва : Высшая школа, 1969. – 595 с. – Текст : непосредственный.
14. Иванов, В. И. Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль : справочник. В 7 т. / В. И. Иванов, И. Э. Власов ; под редакцией В. В. Клюева. – Москва : Машиностроение, 2005. – Т. 7. Кн. 1. – 340 с.
15. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев [и др.] ; под редакцией В. В. Клюева. – 2-е изд. – Москва : Машиностроение, 2003. – 656 с. – Текст : непосредственный.
16. Многоуровневая диагностика штатных и опасных состояний технических объектов : электронное учебное пособие / В. Н. Пермяков, Н. А. Махутов, П. А. Александров, В. И. Иванов. – Свидетельство о госуд. регистрации № 2014620296, правообладатель Тюменский государственный нефтегазовый ун-т ; заявка № 2013621807, заявл.: 30.12.2013 ; зарегистр.: 17.02.2014. – Текст : электронный.
17. Раннее предупреждение аварийных ситуаций по мониторингу микрочастиц / П. А. Александров, В. И. Калечиц, Р. С. Лысов [и др.]. – Текст : непосредственный // Машиностроение и инженерное образование. – 2005. – № 4 (5). – С. 2–18.
18. Александров, П. А. Исследование влияния усталостных повреждений на генерацию частиц металла при механических воздействиях / П. А. Александров, М. Н. Шахов. – Текст : непосредственный // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 2. – С. 32–35.

References

1. Makhutov, N. A., & Permyakov, V. N. (2005). Resurs bezopasnoy eksploatacii sosudov i truboprovodov. Novosibirsk, Nauka Publ., 516 p. (In Russian).
2. Appen, A. A. (1976). Temperaturoustoychivye neorganicheskie pokrytiya. Leningrad, Khimiya Publ., 295 p. (In Russian).
3. Vasil'ev, I. E. (1999). Opredelenie napryazheniy v ekstremal'nykh usloviyakh metodom khrupkikh tenzochuvstvitel'nykh pokrytiy. Diss. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 222 p. (In Russian).
4. Golubev, A. I. (1961). Anodnoe okislenie alyuminievykh splavov. Moscow, Izd-vo AN SSSR Publ., 200 p. (In Russian).
5. Durelli, A., Phillips, E., Tsao, C. (1958). Introduction to the theoretical and experimental analysis of stress and strain. New York, McCraw Hill Book Comp., 498 p. (In English).
6. Prigorovskiy, N. I. (1983). Metody i sredstva opredeleniya poley deformatsiy i napryazheniy: spravochnik. Moscow, Mashinostroenie Publ., 248 p. (In Russian).
7. Reist, P. C. (1984). Introduction to aerosol science. London, MacMillan Publ. Co., 299 p. (In English).

8. Neymark, B. E. (Ed.) (1967). Fizicheskie svoystva staley i splavov, primenyaemykh v energetike. Moscow-Leningrad, Energiya Publ., 240 p. (In Russian).
9. Kobayashi, A. S. (1987). Handbook on experimental mechanics. Prentice-Hall, Society for Experimental Mechanics, Inc., 1002 p. (In English).
10. Permyakov, V. N., Makhutov, V. N., & Sidel'nikov, S. N. Sposob issledovaniya deformatsiy i napryazheniy s pomoshch'yu gazoanalizatora. Pat. RF 2609185. MPK G01B 7/16 G01B 17/04. Applied: 23.09.15. Published: 30.01.17. Bulletin No 1. (In Russian).
11. Permyakov, V. N., & Gordeev, D. V. Sposob issledovaniya deformatsiy i napryazheniy metodom tekhnicheskogo zreniya. Pat. RF 2712758. Applied: 07.06.19. Published: 31.01.20. Bulletin No 4. (In Russian).
12. Makhutov, N. A., Permyakov, V. N., Aleksandrov, P. A., Ivanov, V. I. & Novoselov, V. V. Sposob registratsii treshchin v khrupkikh tenzoidikatorakh. Pat. RF 2505779. Applied: 17.07.12. Published: 27.01.14. Bulletin No 3. (In Russian).
13. Smirnov, A. F., Aleksandrov, A. V., Monakhov, N. I., Parfenov, D. F., Potapov, V. D., Skryabin, A. I.,... Kholchev, V. V. (1969). Soprotivlenie materialov. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 595 p. (In Russian).
14. Ivanov, V. I., & Vlasov, I. E. (2005). Metod akusticheskoy emissii. Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik. V 7 tomakh. Tom 7, Kniga 1. Moscow, Mashinostroenie Publ., 340 p. (In Russian).
15. Klyuev, V. V., Sosnin, F. R., Kovalev, A. V., Filinov, V. N., Aerts, V., Babadzhanyan, L. S.,... Yansens, V. (2003). Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika. 2nd edition. Moscow, Mashinostroenie Publ., 656 p. (In Russian).
16. Permyakov, V. N., Makhutov, N. A., Aleksandrov, P. A., & Ivanov, V. I. Mnogourovnevaya diagnostika shtatnykh i opasnykh sostoyaniy tekhnicheskikh ob"ektov: elektronnoe uchebnoe posobie. Svidetel'stvo o gosud. registratsii No 2014620296, zayavka No 2013621807. Applied: 30.12.13. Registered: 17.02.14. (In Russian).
17. Aleksandrov, P. A., Kalechits, V. I., Lysov, R. S., Maslakov, O. Yu., Hozyasheva E. S., Chechuev, A. P.,... Shakhov, M. N. (2005). Rannee preduprezhdenie avariynykh situatsiy po monitoringu mikrochastits. Mechanical engineering and engineering education, (4(5)), pp. 2-18. (In Russian).
18. Aleksandrov, P. A., & Shakhov, M. N. (2005). Issledovanie vliyaniya ustalostnykh povrezhdeniy na generatsiyu chastits metalla pri mekhanicheskikh vozdeystviyakh. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin, (2), pp. 32-35. (In Russian).

Информация об авторах

Information about the authors

Пермяков Владимир Николаевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры техносферной безопасности,
Тюменский индустриальный универси-
тет, г. Тюмень

Vladimir N. Permyakov, Doctor of
Engineering, Professor at the Department
of Technosphere Safety, Industrial Univer-
sity of Tyumen

Махутов Николай Андреевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва

Мартынович Владимир Леонидович, кандидат технических наук, начальник отдела ООС, ПБ, ГО и ЧС, Институт прикладных исследований газовой промышленности, г. Тюмень

Еренчинов Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Казанцева Людмила Анатольевна, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией кафедры техносферной безопасности, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, kazantsevala@tyuiu.ru

Nikolay A. Makhutov, Doctor of Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Vladimir L. Martynovich, Candidate of Engineering, Head of the Department of Environmental Protection, Safety, Civil Defense and Emergencies, Institute for Applied Research of the Gas Industry, Tyumen

Sergey A. Erenchinov, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen

Lyudmila A. Kazantseva, Candidate of Geology, Head of the Laboratory of the Department of Technosphere Safety, Industrial University of Tyumen, kazantsevala@tyuiu.ru

Статья поступила в редакцию 22.03.2023; одобрена после рецензирования 29.03.2023; принята к публикации 31.03.2023.

The article was submitted 22.03.2023; approved after reviewing 29.03.2023; accepted for publication 31.03.2023.