

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ: ИСТОРИЯ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ (К 80-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА МАШИНОВЕДЕНИЯ ИМ. А.А. БЛАГОНРАВОВА РАН)\*

И.А. Разумовский

*В статье содержится анализ современных проблем и перспектив развития и эффективного применения на практике экспериментальных методов анализа напряженно-деформированного состояния, а также процессов накопления повреждения и разрушения машин и конструкций. Особое место уделено разработке комплексных подходов, включающих регистрацию значительных объемов экспериментальной информации непосредственно в цифровом виде, в сочетании с математическими методами ее обработки и компьютерными технологиями.*

**Ключевые слова:** экспериментальная механика, электронная цифровая спекл-интерферометрия, метод корреляции цифровых изображений, хрупкие тензочувствительные покрытия, акустическая эмиссия, метод конечных элементов, обратные задачи механики.

## EXPERIMENTAL METHODS OF STUDYING THE STRESS-STRAIN STATE: HISTORY, PROBLEMS, PROSPECTS FOR DEVELOPMENT (TO THE 80TH ANNIVERSARY OF THE MECHANICAL ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE NAMED AFTER A.A. BLAGONRAVOV OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES)

I.A. Razumovsky

*The article contains an analysis of current problems and prospects for the development and effective application of experimental methods for analyzing the stress-strain state, as well as the damage and destruction accumulation of machines and structures. A special place is given to the development of complex methods, including the registration of significant volumes of experimental information directly in digital form, in combination with mathematical methods of its processing and computer technologies.*

**Keywords:** experimental mechanics, electronic digital speckle interferometry, digital image correlation method, brittle tensosensitive coatings, acoustic emission, finite element method, inverse problems of mechanics.

### Введение

Неотъемлемой составляющей комплексного исследования, связанного с оценкой прочности, надежности и остаточного ресурса конструкций, является экспериментальный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) наиболее нагруженных элементов и узлов.

Открывшиеся в последние десятилетия, благодаря бурному развитию вычислительной техники, возможности практического применения численных методов решения задач механики (в первую очередь, метода конечного элемента – МКЭ) позволили вывести на принципиально новый уровень расчеты НДС эле-

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-58-48008 ИНД\_оми.

ментов и узлов с учетом не только их реальных конструктивных особенностей и свойств материалов, но также и процессов накопления повреждения и разрушения наиболее опасных зон. Они также оказали существенное влияние на область эффективного применения методов экспериментальной механики. В частности, методы экспериментального исследования НДС с применением физического моделирования (фотоупругость, тензометрические модели из полимерных материалов) не выдержали конкуренции с расчетным анализом на основе МКЭ и утратили практическое значение.

С другой стороны, в связи с постоянно растущими требованиями к повышению прочности и надежности машин и конструкций (в первую очередь, атомной и тепловой энергетики, авиационной и космической техники) активно развиваются технологии, обеспечивающие регистрацию состояния технических объектов на всех стадиях жизненного цикла. В соответствии с указанными тенденциями проводятся разработки, связанные с созданием систем мониторинга силовой и тепловой нагруженности, возникновения дефектов и установления зоны их локализации. Это обусловило необходимость разработки новых и дальнейшее развитие «классических» методов экспериментального анализа напряженного состояния. Принципиальную роль в этих разработках играют именно компьютерные технологии, активно применяющиеся как при регистрации экспериментальной информации, так и в области интерпретации ее результатов.

На протяжении многих десятилетий (фактически, со времени организации Института машиноведения РАН) фундаментальные разработки специалистов института в рассматриваемой области всегда были непосредственно связаны с созданием новых перспективных методов и средств экспериментального анализа НДС машин и конструкций на стадии проектирования и эксплуатации. Это направление неразрывно связано с именем заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора Н.И. Пригоровского, который работал в институте с 1940 по 1988 г. Ему принадлежит ведущая роль в разработке и внедрении в практику ведущих научно-исследовательских и проектных организаций страны экспериментальных методов и средств для определения перемещений, деформаций, напряжений, усилий и нагрузок в сложных конструкциях: натурной

тензометрии в экстремальных условиях, поляризационно-оптических и голографических методов регистрации полей деформаций и перемещений, метода хрупких покрытий. Специалистами его научной школы были, с одной стороны, созданы теоретические основы моделирования и измерений параметров НДС, методов обработки и анализа экспериментальных данных, оценки точности получаемых результатов, с другой – разработаны методики, материалы, приборы и оборудование для проведения измерений в лабораторных и натурных условиях. Параллельно в лаборатории ИМАШ РАН, возглавляемой академиком С.В. Серенсеном, успешно развивались и использовались для анализа процессов пластического деформирования, накопления и развития повреждений в металлах методы оптически-чувствительных покрытий, муара и сеток. Научные основы этих разработок, а также результаты их успешного применения для оценки нагруженности, прочности и ресурса нашли отражение в публикациях специалистов ИМАШ РАН ([1–9] и др.).

Последние два десятилетия характеризуются развитием методов экспериментального анализа НДС на основе новых подходов, базирующихся на сочетании бесконтактных оптико-интерференционных способов получения первичной экспериментальной информации практически неограниченного объема с компьютерными технологиями. К ним, в первую очередь, относятся, электронная цифровая спекл-интерферометрия (ЭЦСИ), метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) и цифровая голография (ЦГ), позволяющие осуществлять регистрацию полей перемещений в реальном режиме времени [10–12]. Эти подходы открывают возможности решения принципиально новых задач.

Цель данной работы состоит в представлении результатов выполненных специалистами ИМАШ РАН в последние годы разработок новых подходов к решению задач анализа НДС, поврежденности и дефектности элементов конструкций, основанных на совместном применении современных экспериментальных методов и численных расчетов задач механики.

### **Методы определения параметров механики разрушения**

Одним из наиболее перспективных направлений развития механики разрушения является использование для оценки трещиностойкости двухпараметрических моделей

и критериев, в которых дополнительно к сингулярным составляющим поля напряжений у вершины трещины (коэффициентам интенсивности напряжений  $K_I, K_{II}, K_{III}$  – КИН), вводят в рассмотрение также и несингулярные  $T$ -напряжения [13]. Результаты исследований конструкционных материалов свидетельствуют о значительном влиянии геометрии, размеров и схем нагружения образцов на характеристики трещиностойкости, что позволяет сделать вывод о существенном влиянии параметров локального стеснения деформаций (то есть несингулярных составляющих поля напряжений).

Таким образом знание несингулярных напряжений является необходимой составляющей расчета на трещиностойкость на основе двухпараметрических подходов и критериев. С учетом возможностей экспериментальной информации, получаемой методами ЭЦСИ и КЦИ, в работе [14] разработана методика и программа для определения сингулярных и несингулярных членов асимптотического представления для напряжений в зоне вершины трещины на основе математической обработки полей тангенциальных перемещений.

Поля перемещений  $u, v$  в окрестности вершины трещины I-го и II-го типов (рис. 1, а) представляются в виде известного разложения Вильямса

$$\begin{aligned} u'(r, \theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2G} a_n \left\{ \left[ \kappa + \frac{n}{2} + (-1)^n \right] \times \right. \\ &\quad \times \cos \frac{n\theta}{2} - \frac{n}{2} \cos \frac{(n-4)\theta}{2} \Bigg\}, \\ v'(r, \theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2G} a_n \left\{ \left[ \kappa - \frac{n}{2} - (-1)^n \right] \times \right. \\ &\quad \times \sin \frac{n\theta}{2} + \frac{n}{2} \sin \frac{(n-4)\theta}{2} \Bigg\}, \\ u''(r, \theta) &= - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2G} b_n \left\{ \left[ \kappa + \frac{n}{2} - (-1)^n \right] \times \right. \\ &\quad \times \sin \frac{n\theta}{2} - \frac{n}{2} \cos \frac{(n-4)\theta}{2} \Bigg\}, \\ v''(r, \theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2G} b_n \left\{ \left[ \kappa - \frac{n}{2} + (-1)^n \right] \times \right. \\ &\quad \times \cos \frac{n\theta}{2} + \frac{n}{2} \cos \frac{(n-4)\theta}{2} \Bigg\}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$a_1 = K_I / \sqrt{2\pi}, b_1 = K_{II} / \sqrt{2\pi}, a_2 = T/4,$$

$$\kappa = (3 - \nu) / (1 + \nu);$$

где  $r, \theta$  – полярные координаты, связанные с вершиной трещины;  $G$  и  $\nu$  – модуль сдвига и коэффициент Пуассона материала;  $T$  – несингулярные  $T$ -напряжения, действующие в плоскости  $xOy$  [15].

Для расчета коэффициентов  $a_n, b_n$  (и, следовательно,  $K_I, K_{II}$  и  $T$ -напряжений для поверхностной трещины по экспериментально зарегистрированным полям тангенциальных перемещений в  $M$  точках  $u^* = \{u_1^*, u_2^*, \dots, u_m^*, \dots, u_M^*\}^T$ .  $v^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_m^*, \dots, v_M^*\}^T$  используется следующий подход.

Величины коэффициентов  $a_n, b_n$  определяются из условия минимума общей невязки  $\Delta$  между перемещениями  $u_i^*, u_i$  и  $v_i^*, v_i$  в области  $\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}, -\theta_1 \leq \theta_2$ , и их величинами, соответствующими аналитическому представлению (1). В качестве меры расхождения перемещений может быть принято среднее квадратическое отклонение

$$\Delta = \sqrt{\sum_{m=1}^M (u_i^* - u_i)^2 + \sum_{m=1}^M (v_i^* - v_i)^2}. \quad (2)$$

Изложенный подход реализован в среде *MatLab* в виде программы с графическим интерфейсом.

Разработанная программа позволяет выполнять следующие операции.

1. Загружать результаты экспериментальных (или, при необходимости, расчетных) данных – величины  $u^*, v^*$ . Предусмотрена возможность визуализации полей перемещений с использованием интерполяции данных эксперимента.

2. Формировать координаты  $r^*, \theta^*$ , распределенных по области точек измерения.

3. Из имеющихся массивов точек измерений осуществлять выборку массивов  $r^*, \theta^*$  и  $u^*, v^*$ , которые будут использоваться при решении задачи. Это обеспечивает возможность оценки влияния зоны локализации точек измерений на точность и сходимость процесса решения.

4. Проводить определение коэффициентов разложения (1) в соответствии с выбранным критерием завершения расчетов. При этом методика включает процедуру определения оптимального количества учитываемых членов  $N$  разложения (1).

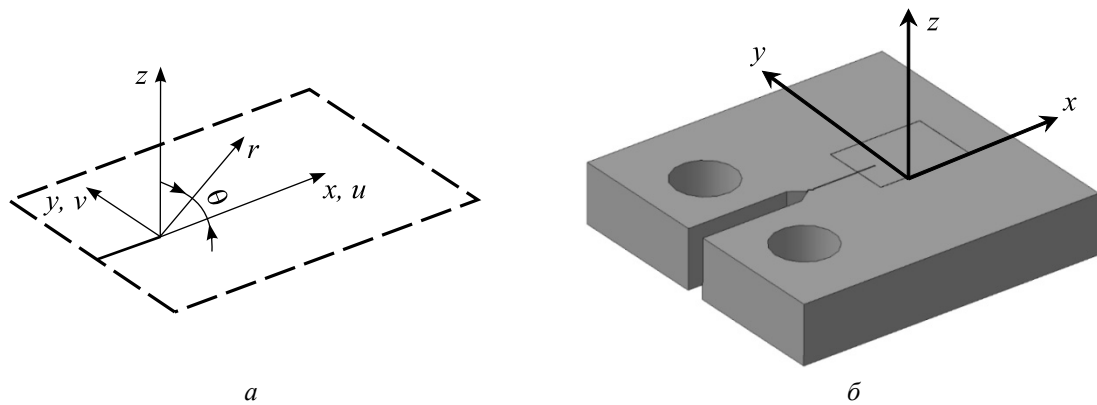


Рис. 1. Окрестность вершины трещины (а) и схема компактного образца для испытаний на трещиностойкость (б)

5. Визуализировать расчетные поля перемещений, соответствующие найденным значениям коэффициентов разложения (1). Графическое сопоставление данных полей с исходными позволяет судить о корректности полученного решения, как в целом, так и в частности – в определенных областях в зоне вершины трещины.

При практическом применении методов ЭЦСИ и КЦИ, как правило, возникает необходимость корректировки результатов регистрации полученных полей перемещений, связанных со смещениями исследуемого объекта как жесткого. Вследствие высокой чувствительности указанных методов (для ЭЦСИ она составляет величины порядка  $\sim 0,1$  мкм на полосу интерференции) это может приводить к значительным погрешностям результатов. Кроме того, при исследовании образцов с реальными трещинами (как правило, рассматриваемыми в механике разрушения как математические разрезы) может возникать проблема определения фактического положения вершины трещины [12]. Методика математической обработки и соответствующий алгоритм численной корректировки экспериментальных полей перемещений, позволяющие исключить влияние указанных обстоятельств на точность результатов, предложены в работе [16]. Задача определения КИН,  $T$ -напряжений, а также других параметров задачи представлена как задача многопараметрической минимизации целевой функции  $I$  (в качестве которой принимается среднеквадратическое или максимальное отклонение  $I$  между экспериментальными и расчетными данными):

$$K^*, T^*, X_0^*, Y_0^*, \alpha^*, A^*, B^*, \varphi^* = \arg \min_{\substack{K \in \bar{K}, \\ T \in \bar{T}, \\ \dots, \\ \varphi \in \bar{\varphi}}} (I(K, T, A, B, \varphi, \Delta x, \Delta y, \alpha)),$$

где  $A, B, \varphi$  – линейные смещения и повороты связанной с вершиной трещины локальной системы координат (ЛСК) –  $A, B, \varphi$  (см. рис. 1) по отношению к глобальной системе координат (ГСК), соответствующей системе регистрации экспериментальных данных;  $\Delta x, \Delta y, \alpha$  – поправки, позволяющие уточнить положение ЛСК (априори неизвестной), соответствующее экспериментальным распределениям  $u_i^*(x, y), v_i^*(x, y)$ , полученным после нагружения исследуемого объекта.

Для решения задачи минимизации целевой функции  $I$  используется метод Нелдера – Мида. Так как поиск решения осуществляется на основе соответствия совокупности искоемых параметров значительному массиву исходной экспериментальной информации, отражающей реальное состояние исследуемого объекта в достаточно большой (сравнимой с размерами трещины) области, никаких дополнительных (кроме физически адекватных) ограничений на величины искоемых параметров состояния не имеется.

Для практического применения изложенного подхода авторами работы [16] разработана программа в среде *MatLab* с графическим интерфейсом.

На примере экспериментального исследования компактного образца для испытаний на трещиностойкость (см. рис. 1, б) показано успешное применение предложенного подхода с применением метода КЦИ для определения КИН и распределения  $T$ -напряжений вдоль фронта трещины.

### Оценка размеров зоны неупругого деформирования и повреждений в окрестности вершины трещины

Методы математической обработки значительных объемов экспериментальной информации открывают возможность решения

задачи об оценке размеров так называемой зоны повреждения, под которой понимается область, где НДС из-за возникновения пластических деформаций или накопления повреждения отлично от упругого. Очевидно, что в этом случае НДС в окрестности вершины трещины не может быть описано решением Вильямса (1).

Предложенная в работах [14, 17] процедура оценки размеров зоны поврежденного материала по данным обработки экспериментально полученных полей перемещений в зоне вершины трещины основана на следующем обстоятельстве. В случае, когда НДС в зоне вершины трещины, используемой для определения коэффициентов функции Вильямса  $a_n, b_n$ , близко к упругому, выбор зоны локализации экспериментально зарегистрированных полей перемещений  $u(x, y), v(x, y)$  —  $\varrho_{\min} \leq \varrho \leq \varrho_{\max}$ , используемых для решения задачи (рис. 2), не будет оказывать влияния на получаемые результаты. С другой стороны, при возникновении в окрестности вершины трещины существенных пластических деформаций и других «повреждений» эта процедура станет неустойчивой. Можно ожидать, что начиная с некоторой величины  $\rho > \rho^*$  при дальнейшем увеличении  $\rho$  значения искомых параметров не будут изменяться. Тогда величину  $\rho = \rho^*$  можно приближенно считать радиусом зоны, где имеют место существенные погрешности моделирования задачи, что связано с наличием пластических деформаций или повреждений материала другого типа.

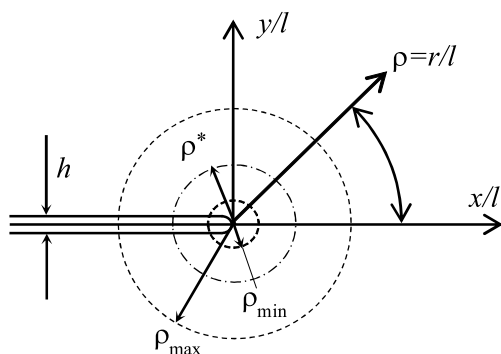


Рис. 2. Окрестность вершины трещины и области локализации точек, используемых при получении аналитического представления полей перемещений в зоне трещины

Процедура оценки размеров «поврежденной зоны» иллюстрируется на примере расчета модельной задачи о НДС в зоне внутренней трещины длиной  $2l$  в пластине неограниченных

размеров из алюминиевого сплава Д16Т, возникающих при двухосном растяжении ( $\sigma_y = 0,45\sigma_T = 150$  МПа,  $\sigma_x = 0,5\sigma_y$ ). На основе результатов расчетов полей перемещений  $u(r, \theta)$  и  $v(r, \theta)$ , локализованных в области  $\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$ , выполняется серия расчетов коэффициентов разложения Вильямса для постоянного значения  $\rho_{\max}$  и последовательном увеличении значения  $\rho_{\min}$ . Так в качестве зоны локализации точек «измерений» использовалась в ряде расчетов существенно удаленная от вершины трещины зона, количество учитываемых членов разложения Вильямса  $N$  принималось равным 15.

Для каждого последующего расчета величина  $\rho_{\min}$  увеличивается до тех пор, пока не достигаются устойчивые значения искомых параметров ( $K_I$  и  $T$ -напряжений). Соответствующую этому состоянию величину безразмерного радиуса обозначим  $\rho_{\min}^*$ . Точку  $\rho = \rho^*$  кривой  $K_I = K_I(\rho_{\min})$ , после которой значение  $K_I$  становится стабильным ( $dK_I / d\rho_{\min} \rightarrow 0$ ), можно считать границей зоны, где имеет место неупругое поведение материала. Очевидно, что найденное при использовании в качестве зоны локализации исходных данных области  $\rho^* \leq \rho \leq \rho_{\max}^*$  аналитическое представление поля перемещений в виде разложения по функциям Вильямса позволяет корректно описать НДС в этой области.

Для оценки влияния погрешностей исходных данных в работе [14] были выполнены также выполнены расчеты задачи, в которых моделировалась погрешность экспериментальных данных. После проведения расчетов НДС в найденные «точные» значения перемещений  $u, v$  с помощью датчика случайных чисел вносились погрешность (с заданным диапазоном разброса относительной погрешности  $\delta u, \delta v$ ). Результаты указанных расчетов показывают, что даже при диапазоне разброса относительных погрешностей  $\delta u_{\max}, \delta v_{\max} \leq 15\%$  они не оказывают существенного влияния на точность результатов (относительная ошибка определения  $K_I$  по крайней мере в 2 раза меньше  $\delta u_{\max}, \delta v_{\max}$ ).

Сходимость процесса оценки размера «поврежденной зоны» иллюстрируется представленными на рис. 3 зависимостями величины среднего квадратичного отклонения  $\Delta$  от  $\rho_{\min}$  при различных значениях  $\rho_{\max}$ , полученных на основе соотношения (2).

Таким образом, предложенный подход открывает возможность уточненного анализа

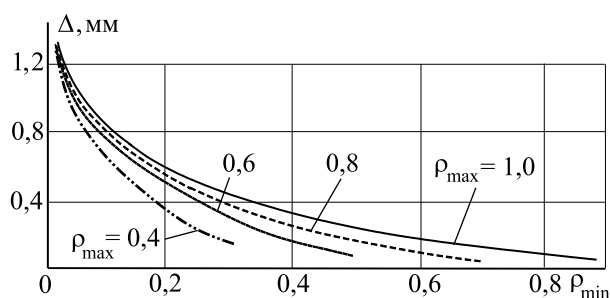


Рис. 3. Расчетные зависимости среднего квадратичного отклонения  $\Delta$  от величины  $\rho_{\min}$  при различных значениях  $\rho_{\max}$

поведения трещины на основе экспериментальных данных о полях перемещений, зарегистрированных современными оптико-интерференционными методами.

### Общий экспериментально-расчетный метод определения параметров НДС и дефектности натуральных конструкций

Как правило, методы определения параметров, необходимых для оценки прочности и ресурса элементов конструкций (параметров нагруженности, остаточных или начальных напряжений, зон локализации и размеров дефектов, деградации свойств материалов) базируются на методических подходах, основанных на известных априори зависимостях между искомыми параметрами и результатами экспериментальных исследований. Используемые для определения искоемых параметров расчетные соотношения основываются на результатах аналитических или численных решений близких по постановке краевых задач. Очевидно, что соответствующие методики имеют ограниченную область применения и могут содержать определенные погрешности построения модели при решении конкретных задач, особенно в случае исследования натуральных элементов конструкций. В связи с этим, специалистами ИМАШ РАН предложен новый подход [18–21], который в отличие от традиционных не имеет принципиальных ограничений на типы искоемых силовых факторов и других параметров задачи.

В основе метода определения нагрузок, напряжений, размеров дефектов и других характеристик (искоемых параметров  $P_j$ ) лежит решение задачи минимизации целевой функции  $I$ , которая комплексно отражает расхождение между зарегистрированным экспериментально массивом

деформационных откликов  $e_i^*$  (во множестве точек измерений  $i$ ) и массивом  $e_i$ , получаемым на основе решения с использованием МКЭ соответствующей модельной краевой задачи при текущих значениях искоемых параметров  $P_j$ . При этом параметры  $P_j$  могут быть как конкретными физическими или геометрическими величинами, так и характеризовать законы распределения физических полей по области или геометрическую конфигурацию объекта, дефекта. Необходимым условием практической реализации такого подхода, обеспечивающего получение надежного результата, является использование значительных объемов экспериментальной информации в виде полей перемещений или деформаций на поверхности исследуемой области объекта. Деформационные отклики, используемые для обработки, могут регистрироваться как вследствие непосредственного нагружения (догружения) исследуемого объекта, так и дополнительного воздействия: удаление материала, нагрев и т.п.

Метод реализован в «гибком» вычислительном комплексе (ВК), в который входят следующие управляющие программы с графическим интерфейсом (рис. 4), реализованные в программном комплексе (ПК) *MatLab*:

- программа формирования массива экспериментальных данных (ПЭД)  $e_i^*$ ;
- программа решения прямой задачи (ПРПЗ), заключающейся в расчете величин деформационных откликов ( $e_i$ ), обусловленных нагружением исследуемой области или другим типом воздействия, в точках измерений (ТИ) при произвольно заданных значениях параметров  $P_j$  с помощью высокопараметризованных и адаптивных моделей исследуемых объектов и алгоритмов решения (в ПК *ANSYS*);
- программа формирования и использования (ПБО) так называемого банка откликов, который представляет собой совокупность параметров сплайновых гиперповерхностей или нейронных сетей прямого распространения, аппроксимирующих зависимость  $e_i = F(P)$ , на основе серии расчетов соответствующих прямых задач;
- программа решения обратной задачи (ПОЗ) – определения параметров  $P_j$ , которая реализует решение задачи минимизации целевой функции  $I(e_i^*, e_i)$ , при различных настройках и условиях;
- программа, позволяющая оценивать влияние погрешностей эксперимента на получаемые результаты (ПВО), а также устойчивость

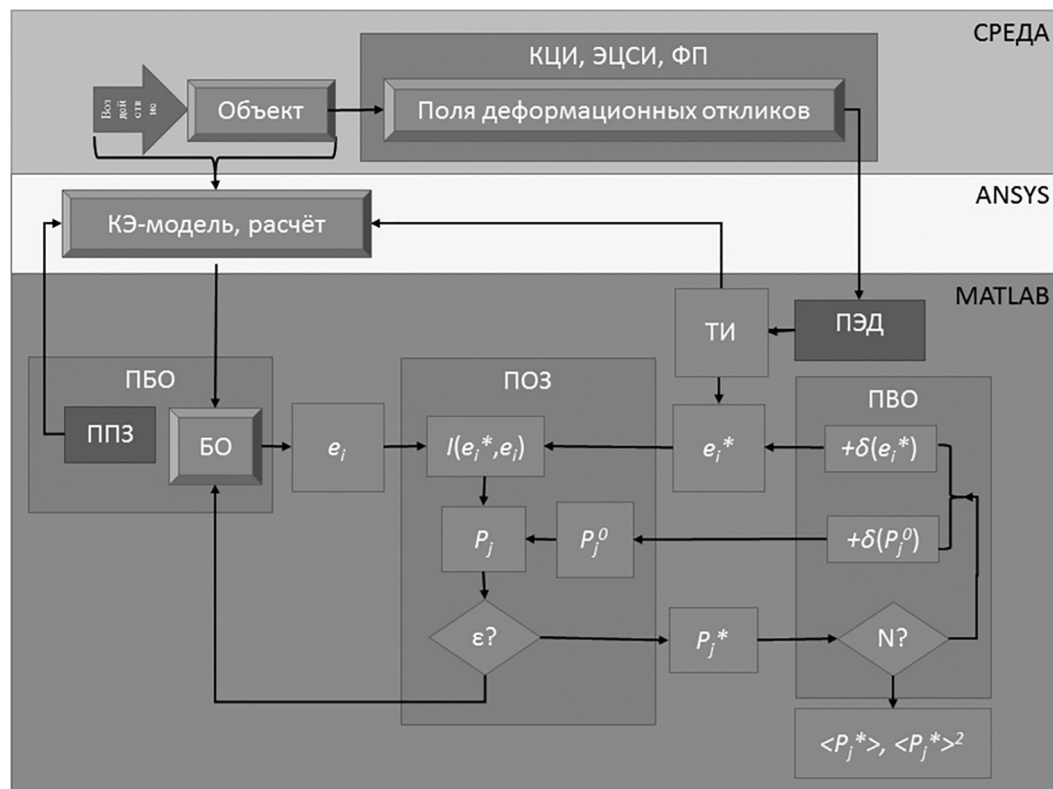


Рис. 4. Принципиальная блок-схема определения параметров НДС, дефектности и деградации свойств материалов на основе математической обработки экспериментальных данных

решения – при варьировании количества и зон локализации точек измерений.

Таким образом, ВК охватывает все этапы решения реальных прикладных задач с высокой степенью автоматизации этапов, которая обеспечивается благодаря разработанному алгоритму непрерывного обмена данными между программными средами *ANSYS* и *MatLab*.

В работах [20–24] представлены результаты применения методики для решения следующих задач (рис. 5):

- оценка нагруженности тонкостенных конструкций с привлечением метода сверления отверстия [21];

- комплексный анализ элементов конструкций с поверхностными трещинами, заключающийся в одновременном определении глубины трещины  $b$  и приложенных нагрузок  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  на основе обработки полей перемещений, зарегистрированных на поверхности и обусловленных высверливанием малого отверстия в зоне выхода трещины на поверхность ([22], см. рис. 5 а, б);

- исследование распределения по глубине пространственной детали неоднородных полей остаточных напряжений (ОН) способом последовательно углубляемого дискового разреза ([24], см. рис. 5 в, г,  $2R$  – диаметр дисковой

фрезы);

- исследование распределения по глубине  $z$  пространственной детали существенно неоднородных ОН –  $\sigma_x^{OH}(z)$ ,  $\sigma_y^{OH}(z)$  (включая скачкообразное поле ОН в биметалле) способом сверления последовательно углубляемого отверстия ([25], см. рис. 5, д);

- оценка размеров  $a$ ,  $b$  полуэллиптической трещины на внутренней поверхности детали на основе обработки экспериментальных данных, зарегистрированных на наружной (доступной) поверхности исследуемого объекта и обусловленных изменением внешних нагрузок (например давления в трубопроводе ([21, 22], см. рис. 5, е);

- определение нагруженности детали (активных или остаточных напряжений на поверхности), предела текучести материала, а также одновременного определения предела текучести материала и поверхностных напряжений на основе обработки полей остаточных перемещений, обусловленных индентированием поверхности сферическим индентором ([26], см. рис. 5, ж, з;  $d$  – диаметр индентора,  $F$  – величина приложенной нагрузки).

Предложенный методический подход в сочетании с разработками специалистов ИМАШ

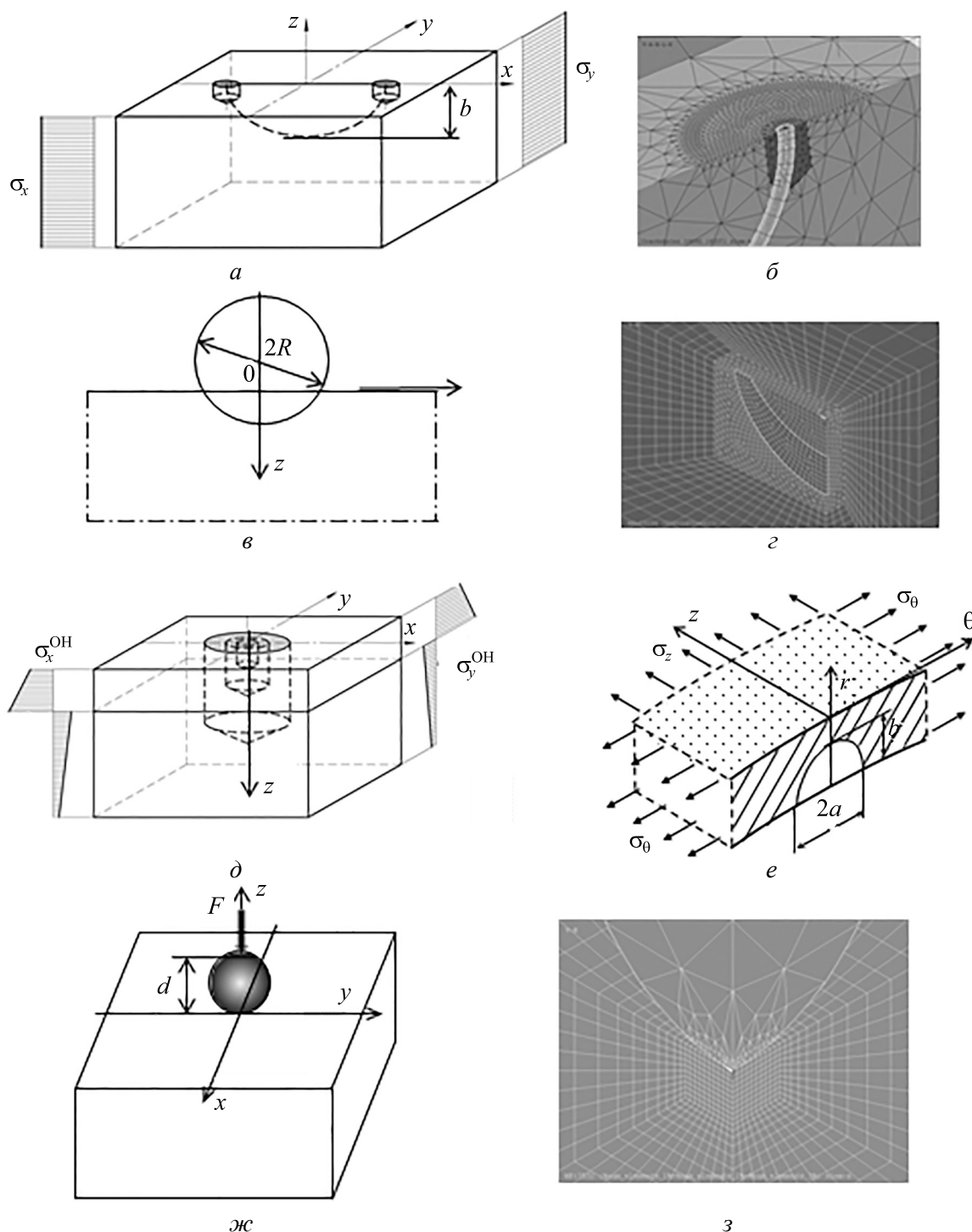


Рис. 5. Примеры практического применения методики

РАН в области развития экспериментальных методов и создания специализированной аппаратуры для регистрации полей перемещений в лабораторных и натурных условиях [27–30] открывает новые возможности решения задач оценки прочности, живучести и остаточного ресурса элементов машин и конструкций.

Пример такого комплексного подхода рассмотрен в работе [31], где с учетом результатов

оценки исходных размеров поверхностной трещины и распределения остаточных напряжений выполнен расчет процесса кинетики развития пространственной трещины в зоне сварного соединения в типовом магистральном трубопроводе. Внутренний диаметр трубопровода  $D_{\text{вн}} = 1420$  мм, толщина стенки  $h = 18,7$  мм, внутреннее давление  $p = 10,6$  МПа, изгиб трубопровода и пульсации давления приводят

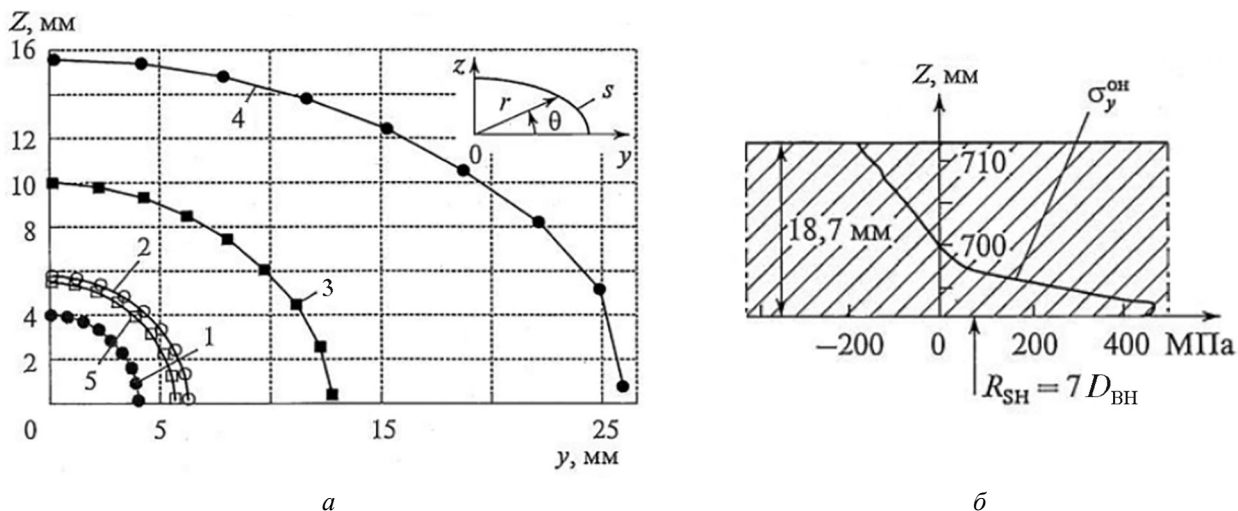


Рис. 6. Конфигурация фронта трещины (а) при различных условиях нагружения и наличии остаточных напряжений (б) после  $10^7$  циклов нагружения:

1 – исходная конфигурация трещины; 2–5 – конечная конфигурация трещины, полученная; 2 – без учета влияния ОН и  $T$ -напряжений; 3 – с учетом влияния ОН и  $T$ -напряжений; 4 – с учетом влияния ОН (без учета  $T$ -напряжений); 5 – с учетом влияния  $T$ -напряжений (без учета влияния ОН)

к циклическому нагружению. В основе разработанной методики лежит модифицированное соотношение Формана с поправкой на стеснение трещины (влияние  $T$ -напряжений), предложенной в работе [32]. Некоторые результаты расчетов процесса распространения трещины, с учетом различных условий решения задачи, представлены на рис. 6.

#### Методы оценки повреждений элементов конструкций из композиционных материалов в процессе эксплуатации

Одним из перспективных направлений практического применения рассмотренного выше подхода и ПК представляется решение задачи оценки деградации свойств и регистрации процессов возникновения, развития и накопления повреждений в элементах конструкции из композитных материалов (КМ). Исходная информация для расчета поврежденности КМ может быть получена на основе мониторинга НДС конструкции с помощью сетки волоконно-оптических датчиков деформаций (ВОД), встроенных непосредственно в материал конструкции в процессе ее изготовления [33–35].

В рамках решения этой проблемы специалистами ИМАШ РАН была разработана серия методик и программ [36, 37], включающих:

- определение оптимальной топологии сетки расположения ВОД в рассматриваемом объекте из КМ;

- модернизацию методического подхода и ПК [18–21] применительно к решению задач анализа процесса возникновения и развития повреждений в элементах конструкций из КМ на основе обработки результатов измерений деформаций в узлах сетки ВОД.

Под оптимальной топологией сетки ВОД понимаются максимальные размеры шагов сетки, в узлах которой расположены датчики, обеспечивающие возможность получения достаточного по объему и точности данных массива экспериментальных данных, последующая математическая обработка которых позволяет определить зоны локализации и размеры дефектов. Методика и алгоритм программы расчета оптимальных шагов прямоугольной сетки ВОД (рис. 7) с учетом геометрических особенностей конструкции, характера и уровня действующих нагрузок, а также чувствительности используемых ВОД изложены в работе [36].

В модернизированном ПК программа ПЭД позволяет непосредственно на загруженных в компьютер картах расположения датчиков на объекте интерактивно формировать массивы данных  $e_i^*$  в произвольных точках измерений и делать их привязку к соответствующей КЭ-модели. Эта программа обладает развитыми возможностями построения сплайновых линий (аналогов интерференционных полос), генерации точек измерения (массивов точек), управления примитивами и пр. Программа ПРПЗ, предназначенная для моделирования

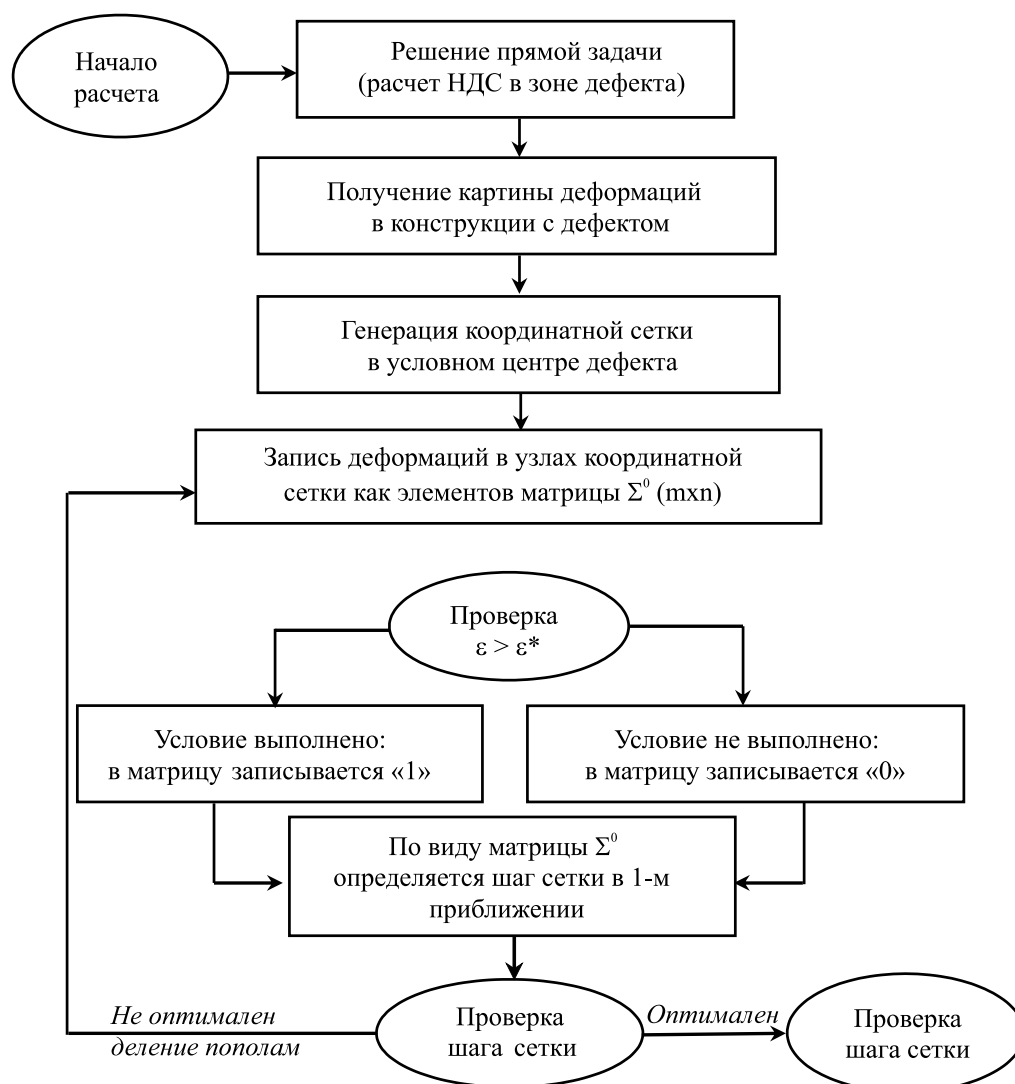


Рис. 7. Схема алгоритма вычисления оптимального шага сетки ВОД  
( $\epsilon$  – деформация,  $\epsilon^* \approx 10^{-5}$  – порог чувствительности ВОД)

НДС в КМ, разработана на основе предложенной в работе [37] методики численного моделирования дефектов типа расслоения в слоистых композитных КМ путем сведения трехмерной задачи к двумерной с учетом всех особенностей деформированного состояния. Такой подход позволяет многократно (не менее, чем на порядок) увеличить скорость расчетов задач о НДС при сохранении необходимой точности результатов. Последнее обстоятельство является одним из важнейших условий разработки системы мониторинга процесса развития дефектов в элементах авиационных конструкций.

Верификация разработанных методики, алгоритмов и программ была осуществлена на основе результатов лабораторных испытаний образцов различных типов: элементарных образцов с круговым отверстием, 4-х

стрингерных панелей и сотовых обшивок при циклических нагрузках. В образцах предварительно создавались дефекты расслоения круговой формы. В процессе исследования наряду с математической обработкой результатов измерений деформаций, зарегистрированных ВОД, ультразвуковой контроль размеров дефектов.

Сопоставление результатов оценки размеров дефектов при циклическом нагружении образца на основе математической обработки данных, зарегистрированных с помощью ВОД, с результатами измерений размеров дефектов ультразвуковым методом, показали их хорошее соответствие [36]. При этом следует заметить, что относительная погрешность определения размеров дефектов в процессе их развития будет уменьшаться.

### **Метод хрупких тензочувствительных покрытий в сочетании с методом акустической эмиссии**

Метод хрупких тензочувствительных покрытий (МХП) на протяжении многих десятилетий был весьма эффективным способом экспресс-анализа зон концентрации напряжений и оценки их уровня с приемлемой точностью для инженерных расчетов на прочность. В ИМАШ РАН применительно к различным условиям испытаний и материалам конструкций разработаны и применяются различные типы хрупких тензочувствительных покрытий, в том числе канифольные, оксидные и стеклоэмалевые [3].

Новым перспективным направлением этого метода для оценки прочности и поврежденности материалов стало разработанное при участии специалистов ИМАШ РАН в последние годы применение МХП в сочетании с методом акустической эмиссии (АЭ), в качестве эффективного средства неразрушающего контроля (НК) при диагностике высоконагруженных элементов конструкций [38]. В работе [39] изложены результаты исследования НДС оборудования газохимических заводов в условиях эксплуатации с применением указанного комплексного подхода. При этом использовались специально разработанные тензочувствительные покрытия на основе искусственных смол [40].

АЭ позволяет регистрировать и контролировать протекание динамических процессов в твердых телах, которые сопровождаются излучением упругих волн, включая как возникновение и развитие пластических деформаций в материалах и образование микро-, мезо- и макротрещин, так и развитие магистральных трещин [41]. Комплексный подход, основанный на совместном применении МХП и АЭ, открывает возможность оперативно и с достаточной для практики точностью выявлять (по характеру и плотности распространения трещин в хрупком покрытии) не только зоны конструктивно-технологической концентрации напряжений, но и зоны вероятных локальных дефектов, в том числе непровары, поры, включения, трещины, расслоения.

Для диагностики и мониторинга высоконагруженных элементов конструкций на основе МХП наиболее перспективными являются хрупкие оксидные тензоиндикаторы, которые могут успешно применяться как в процессе стендовых испытаний, так и в натурных условиях в широком диапазоне температур [3].

Оксидные тензоиндикаторы допускают установку непосредственно на них тензорезисторов и преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ). Таким образом появляется возможность автоматизировать процесс регистрации трещин в тензопокрытии, и осуществлять дистанционный мониторинг процесса накопления повреждений.

Результаты проведенных специалистами ИМАШ РАН экспериментов показали, что предложенный комбинированный метод позволяет на ранней стадии регистрировать процессы, предшествующие структурной перестройке и разрушению материала диагностируемой конструкции.

Важным обстоятельством, которое следует учитывать при применении АЭ мониторинге изделий в режиме *on-line*, является идентификация источников регистрируемых сигналов, то есть возможность различать сигналы, обусловленные разрушением тензоиндикатора, и сигналы, генерируемые в процессе деформирования и разрушения материала подложки. Вопросы применения оксидных тензопокровов для диагностики состояния конструкций на ранней стадии накопления повреждений рассмотрены в работах [42–44], где выполнен анализ импульсов АЭ, генерируемых хрупким слоем тензоиндикатора при образовании трещин, в зависимости от толщины оксидной пленки и скорости деформирования подложки.

В работе [43] предложено в качестве базовых признаков, на основе которых может быть осуществлена идентификация сигналов АЭ, вызванных образованием трещин в хрупком слое покрытия, использовать параметры:  $u_m/N_{\text{и}}$  и  $N_{\text{и}}/t_{\text{и}}$  (здесь  $u_m$  – амплитуда сигнала,  $N_{\text{и}}$  – число выбросов в импульсе,  $t_{\text{и}}$  – время импульса), характеризующие скорость затухания импульса от момента достижения им максимального значения амплитуды до ухода ниже порогового значения и усредненную частоту выбросов  $N_{\text{и}}/t_{\text{и}}$  в регистрируемых сигналах АЭ, с момента пересечения порога дискриминации до ухода волны ниже порогового значения. Для классификации сигналов по этим параметрам предложено использовать диаграмму параметров  $u_m/N_{\text{и}}$ ,  $N_{\text{и}}/t_{\text{и}}$ , на которой регистрируемые импульсы в зависимости от природы источника сигналов формируют отдельные кластеры.

Для классификации регистрируемых сигналов АЭ в поле этих параметров разработано

программное обеспечение, позволяющее на диаграмме дескрипторов  $u_m/N_{II}$ ,  $N_{II}/t_{II}$  проследить динамику формирования кластеров сигналов в процессе деформирования и разрушения объекта АЭ контроля, и интерпретировать результаты тестовых испытаний многослойной структуры тензоиндикатора в процессе его деформирования и разрушения. В поле дескрипторов  $u_m/N_{II}$ ,  $N_{II}/t_{II}$  определены кластеры, формируемые сигналами АЭ, возникающими при разрушении хрупкого слоя, алюминиевой подложки (фольги) и клеевого слоя.

Результаты проведенных экспериментальных исследований образцов из алюминиевых сплавов и полимерных композиционных материалов (ПКМ) с применением высокочувствительных тензоиндикаторов (с величиной пороговой деформации образования трещин  $\varepsilon_o = 0,5 \div 1 \times 10^{-3}$ ) показали эффективность применения разработанной программы разделения сигналов АЭ в поле дескрипторов  $u_m/N_{II}$ ,  $N_{II}/t_{II}$  для ранней диагностики повреждений. Интенсивное образование трещин в хрупком слое тензоиндикатора происходило при деформациях значительно более низкого уровня по сравнению с теми, которые приводили к структурным изменениям и разрушению испытываемых образцов. Это позволяет в процессе нагружения выделить в поле дескрипторов  $u_m/N_{II}$ ,  $N_{II}/t_{II}$  кластеры сигналов АЭ, вызываемыми шумами помех, трещинообразованием тензоиндикатора и деградацией материала подложки на разных стадиях деформирования практически до момента разрушения испытываемого образца.

Результаты указанных разработок были успешно применены для исследования процессов накопления повреждений и разрушения композиционных материалов [45, 46].

### Заключение

Дальнейшее развитие рассмотренных направлений исследований НДС и дефектности машин, по-видимому, будет определяться разработками в следующих направлениях:

- повышение чувствительности и точности исходной экспериментальной информации на базе совершенствования аппаратуры для измерений в натурных условиях;
- совершенствование методов обработки результатов экспериментов, обеспечивающих представление 2-х и 3-мерных массивов экспериментальной информации в реальном режиме времени, включая быстропротекающие процессы;

– совершенствование методов расчета параметров нагруженности и дефектности на основе математической обработки результатов экспериментов (и соответствующего программного обеспечения);

– разработка принципиально новых подходов к оценке прочности и ресурса машин на основе создания новых моделей поведения материала и конструкций, базирующихся на результатах экспериментальных исследований их нагруженности и дефектности (мониторинга) в реальном режиме времени.

### Список литературы

1. Напряжения и деформации в деталях и узлах машин / Н.И. Пригоровский и др. М.: Машгиз. 1961. – 564 с.
2. Rayevskii N.P. The Measurement of Mechanical Parameters in Machines. Institute Machine Construction, Russian Academy of Sciences. Pergamon press Ltd. London-New York-Paris-Frankfurt. 1965. – 206 с.
3. Пригоровский Н.И., Панских В.К. Метод хрупких тензочувствительных покрытий. М.: Наука. 1978. – 184 с.
4. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: справочник. М.: Машиностроение. 1983. – 248 с.
5. Шнейдерович Р.М., Левин О.А. Измерение полей пластических деформаций методом муара. М.: Машиностроение. 1972. – 152 с.
6. Дайчик М.Л., Пригоровский Н.И., Хуришудов Г.Х. Методы и средства натурной тензометрии. М.: Машиностроение. 1989. – 240 с.
7. Экспериментальные исследования деформаций и напряжений в водо-водяных энергетических реакторах / Н.А. Махутов, К.В. Фролов и др. М.: Наука. 1990. – 246 с.
8. Модельные исследования и натурная тензометрия энергетических реакторов / Н.А. Махутов, К.В. Фролов и др. М.: Наука. 2001. – 293 с.
9. Strain and Stress Analysis by Holographic and Speckle Interferometry / V.P. Shchepinov, V.S. Pisarev, S.A. Novikov, V.V. Balalov, I.N. Odintsev, M.M. Bondarenko et al. Chichester: John Wiley & Sons. 1996. – 496 p.
10. Gloud G.L. Optical Methods of Engineering Analysis. Cambridge University Press. 1998. – 503 с.
11. Schnars U., Jüptner W. Digital Holography. Springer. 2005. – 164 p.
12. Rasumovsky I.A. Interference-optical Methods of Solid Mechanics/Series: Foundations of Engineering Mechanics. Springer. 2011. – 270 p.

13. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии хрупкого разрушения. М.: Физматлит. 2006. – 328 с.
14. Чернятин А.С., Разумовский И.А., Матвиенко Ю.Г. Оценка размеров зоны неупругого деформирования у вершины трещины на основе анализа полей перемещений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 12. С. 45–51.
15. Матвиенко Ю.Г. Несингулярные Т-напряжения в проблемах двухпараметрической механики разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. № 2. С. 51–58.
16. Чернятин А.С., Матвиенко Ю.Г., Lopez-Crespo P. Определение параметров двухпараметрической механики разрушения вдоль фронта трещины по данным метода корреляции цифровых изображений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 11. С. 46–53.
17. Литвинов И.А., Матвиенко Ю.Г., Разумовский И.А. О точности определения несингулярных компонент поля напряжений в вершине трещины с применением метода экстраполяции // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 4. С. 43–51.
18. Разумовский И.А., Чернятин А.С. Методология и программа для исследования напряженно-деформированного состояния с использованием интерференционно-оптических и численных методов // Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 4. С. 42–51.
19. Chernyatin A., Razumovsky I. Experimental and computational method for determining parameters of stress-strain state from the data obtainable by interference optical techniques / Proc. ICEM-14. – Poitier, France / – 2010: EPJ Web of Conferences 6, 45003.
20. Chernyatin A.S., Razumovskii I.A. Methodology and software package for assessment of stress-strain state parameters of full-scale structures and its application to a study of loading level, defect rate and residual stress level in elements of NPP equipment // Strength of Materials. 2013. V. 45. № 4. P. 506–511.
21. Разумовский И.А., Чернятин А.С. Определение нагруженности и дефектности элементов конструкций на основе минимизации расхождения между экспериментальными и расчетными данными // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. № 1. Ч. I. С. 71–78.
22. Чернятин А.С., Разумовский И.А. Комплексный анализ элементов конструкций с поверхностными трещинами // Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 3. С. 66–73.
23. Chernyatin A.S., Matvienko Y.G., Razumovsky I.A. Combining experimental and numerical analysis to estimate stress fields along the surface crack front // Frattura ed Integrita Strutturale. 2013. T. 7. № 25. P. 15–19.
24. Чернятин А.С., Разумовский И.А. Последовательно углубляемый дисковый разрез – индикатор остаточных напряжений в пространственных телах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 5. С. 93–102.
25. Разумовский И.А. Чернятин А.С. Экспериментально-расчетный метод исследования остаточных напряжений в двухслойных элементах конструкций способом сверления отверстия // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 4. С. 101–109.
26. Чернятин А.С., Разумовский И.А. Метод индентирования как способ оценки нагруженности и деградации механических характеристик материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 4. С. 40–48.
27. Исследование процесса деформации материал оптико-корреляционными методами / А.Н. Луценко, И.Н. Одинцев, А.В. Гриневич, П.Б. Северов, Т.П. Плугатарь // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 4. С. 70–86.
28. Автономный спекл-интерферометр для определения остаточных напряжений и его апробация в натурных экспериментах / И.Н. Одинцев, А.А. Апальков, Т.П. Плугатарь, С.М. Усов // Труды Международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение. (ЖИВКОМ-2016), М., 2016. С. 136–140.
29. Исследование остаточных напряжения в сварных трубах на основе метода сверления отверстия и оптических интерференционных измерений / В.В. Балалов, В.Г. Мошенский, И.Н. Одинцев, В.С. Писарев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 5. С. 43–48.
30. Apalkov A.A., Odintsev I.N., Usov S.M. Speckle pattern interferometry for measurement of residual stress: basic approach, mathematical support, special arrangement, practical applica-

- tion // Machines, technologies, materials. 2015. № 5. P. 18–20.
31. Чернятин А.С., Разумовский И.А., Матвиенко Ю.Г. Кинетика краевой трещины в поле остаточных напряжений // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 6. С. 25–34.
  32. Hamam R., Pommier S., Bumbieler F. Mode I fatigue crack growth under biaxial loading // International Journal of Fatigue. 2005. V. 27. P. 1342–1346.
  33. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах / Е.Н. Каблов, Д.В. Сиваков, И.Н. Гуляев, К.В. Сорокин, М.Ю. Федотов, Е.М. Дианов, С.А. Васильев, О.И. Медведков // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. № 3. С. 10–15.
  34. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 272 с.
  35. Di Sante R. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications // Sensors. 2015. 15. P. 18666–18713.
  36. Экспериментально-численное определение размеров дефектов типа расслоения в слоистых композитных материалах / А.С. Урнев, А.С. Чернятин, Ю.Г. Матвиенко, И.А. Разумовский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. № 10 (в печати).
  37. Моделирование дефектов в слоистой композитной конструкции / А.С. Урнев, А.С. Чернятин, Ю.Г. Матвиенко, И.А. Разумовский // Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 3. С. 26–33.
  38. Патент 2345324 Российская Федерация, МПК8 G01B 17/04, G01N 29/14 / Способ исследования деформаций и напряжений. Пермяков В.Н., Махутов Н.А., Хайруллина Л.Б.; заявитель и патентообладатель ТюмГНГУ; заявка 2007116182/28, заявл. 27.04.2007; опубл. 27.01.2009, Бюл. № 3–6 с.
  39. Махутов Н.А., Пермяков В.Н., Хайруллина Л.Б. Анализ напряженно-деформирования оборудования газохимических заводов в условиях эксплуатации // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 2. С. 69–74.
  40. Патент 2313551, МПК 11 G 01B 11/16/ Хрупкое покрытие на основе искусственных смол. Пермяков В.Н., Махутов Н.А., Паршуков Н.Н., Хайруллина Л.Б.; заявитель и патентообладатель ТюмГНГУ; заявл. 27.09.2006; опубл. 27.12.2007. Бюл. № 36.
  41. Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль: справочник; в 7 т.: под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7. Кн. 1. М.: Машиностроение. 2005. 340 с.
  42. Применение акустической эмиссии для контроля за процессом образования трещин в хрупких оксидных тензоиндикаторах / Н.А. Махутов, В.В. Шемякин, Б.Н. Ушаков, Т.Б. Петерсен, И.А. Васильев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. № 6. С. 41–44.
  43. Акустико-эмиссионные свойства оксидных тензоиндикаторов и распознавание сигналов при образовании трещин в хрупком слое покрытия / Ю.Г. Матвиенко, И.Е. Васильев, В.И. Иванов, С.В. Елизаров // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 48–60.
  44. Тестирование методики кластерного анализа массивов акустико-эмиссионных импульсов при формировании насыпного конуса стеклогранулята / Н.А. Махутов, И.Е. Васильев, В.И. Иванов, С.В. Елизаров, Д.В. Чернов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. № 5. С. 44–54.
  45. Комплексное исследование дефектов в композиционных материалах с применением хрупких тензопокрывтий и акустической эмиссии / Ю.Г. Матвиенко, А.В. Фомин, В.И. Иванов, П.Б. Северов, И.Е. Васильев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. № 1. С. 46–50.
  46. Ранняя диагностика зон повреждения и разрушения с использованием хрупких тензоиндикаторов и акустической эмиссии / Ю.Г. Матвиенко, И.Е. Васильев, А.В. Панков, М.А. Трусевич // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. № 6. С. 45–56.

# РАЗУМОВСКИЙ Игорь Александрович

E-mail: murza45@gmail.com  
Тел.: (499) 135-62-98

Доктор технических наук, заведующий лабораторией механики разрушения и живучести Института машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, профессор кафедры Прикладной механики МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сфера научных интересов: экспериментальные и экспериментально-расчетные методы исследования напряженно-деформированного состояния, механика разрушения, прочность и трещиностойкость многослойных конструкций. Автор более 150-ти научных публикаций в отечественных и зарубежных изданиях, в том числе 2-х личных и 7-ми коллективных монографий.