

УДК 620.179.17

## **Алгоритм определения начала пластической деформации на основе микромеханической модели акустической эмиссии**

**Д. В. Чернов\***

В работе предложен усовершенствованный алгоритм определения момента начала пластической деформации, основанный на применении микромеханической модели акустической эмиссии (АЭ). Микромеханическая модель акустической эмиссии — это многопараметровая модель, учитывающая анизотропию механических свойств исследуемого объекта, температуру и неоднородность материала. Она связывает между собой параметры состояния объекта (остаточный ресурс, момент начала пластической деформации) и акустико-эмиссионной диагностики (суммарный счет АЭ-импульсов).

Объектом исследования является полимерный композиционный материал, доведенный до разрушения с помощью растягивающей нагрузки. В процессе растяжения акустические сигналы регистрировались с помощью промышленной АЭ-системы «A-Line32D». На основе зарегистрированных данных была получена зависимость суммарного счета АЭ-импульсов от времени.

Для оценки состояния исследуемого объекта при различных уровнях нагрузки была применена (на основе аппроксимации функции суммарной АЭ) микромеханическая модель акустической эмиссии. В процессе аппроксимации вычисляли параметры математической модели, на основе которых проводилась критериальная оценка состояния объекта.

Одним из этапов исследовательской работы стало определение наиболее информативного диагностического признака. Для решения поставленной задачи был поставлен численный эксперимент разрушения композиционного материала с заранее известным моментом начала пластической деформации. Применение микромеханической модели акустической эмиссии на математической модели разрушения композита позволило определить диагностический признак, на основе которого проводилась оценка состояния объекта. Таким признаком стало предельное значение распределения Вейбулла–Гнеденко, характеризующее наименее прочный структурный элемент.

К сожалению, из-за потребности в больших вычислительных ресурсах в процессе аппроксимации функции суммарного счета применение микромеханической модели в режиме online является затруднительным. Для вычисления критериального параметра в реальном времени был предложен модифицированный алгоритм определения начала пластической деформации. Модификация алгоритма состояла в использовании меньшего количества переменных при расчете критериального параметра. Алгоритм был апробирован на реальных данных АЭ, полученных в результате испытаний композиционных материалов.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, микромеханическая модель акустической эмиссии, оптимизация расчета критериального параметра.

---

\* chernovdv@inbox.ru

## Введение

В настоящее время в эксплуатации находится большое количество опасных промышленных объектов с продленным сроком службы. Для предотвращения аварийных ситуаций, которые могут привести к катастрофам, влекущим за собой человеческие жертвы и разрушения, проводится экспертиза промышленной безопасности, заключающаяся в выявлении дефектов при помощи физических методов контроля, одним из которых является метод акустической эмиссии.

Метод акустической эмиссии — пассивный метод контроля, основанный на регистрации акустических волн при структурных изменениях материала. Одним из его достоинств является возможность оценки предразрушающих состояний конструкции, например — определение момента образования дефекта.

При проведении АЭ-контроля дефекты выявляются как источники волн акустической эмиссии. Они классифицируются по степени опасности по стандартизованной системе, описанной в нормативных документах [1]. К сожалению, применение стандартных критериев при контроле сложных конструкций невозможно по целому ряду причин. Одной из них является необходимость проведения предварительных испытаний, во время которых определяются калибровочные эмпирические коэффициенты [2]. Еще один фактор, затрудняющий применения стандартных критериев, связан с их малой помехоустойчивостью. Шумы нагружающего устройства, технологические шумы оборудования могут приводить к неверному расчету критериальных значений. Таким образом, применение стандартных критериев при контроле сложных конструкций может привести к ошибочным результатам, и для оценки состояния подобных объектов следует использовать более помехоустойчивые критерии, основанные на параметрах процесса разрушения.

Базой для такой критериальной оценки является микромеханическая модель акустической эмиссии, к достоинствам которой можно отнести связь ее параметров с параметрами состояния объекта, такими как остаточный ресурс и момент начала пластической деформации [3].

## Микромеханическая модель акустической эмиссии

Существуют различные теории описания процесса разрушения. Обратим внимание на одну из них. Согласно кинетической концепции прочности С. Н. Журкова, явление разрушения имеет термofлуктуационную природу. В ее основе лежит переход системы через энергетический барьер  $U_0$ , снижаемый приложенным к телу напряжением и преодолеваемый посредством тепловой флуктуации.

Если представить тело состоящим из конечного числа структурных элементов, то среднестатистиче-

ское время ожидания разрушения одного структурного элемента  $\theta_{cp}$  можно определить по формуле Журкова:

$$\theta_{cp} = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right), \quad (1)$$

где  $\tau_0 = 10^{-12} \dots 10^{-14}$  с — величина, сопоставимая с периодом атомных колебаний;  $U_0$  — энергия активации процесса разрушения (значение постоянно для конкретного материала);  $\gamma$  — структурно-чувствительный параметр;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $\sigma$  — напряжение;  $T$  — абсолютная температура.

В работах В. В. Носова получена развитие микромеханическая модель разрушения [4], основанная на кинетической концепции прочности и законе изменения концентрации образующихся в материале микротрещин — структурных элементов:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{C_0 - C(t)}{\theta_{cp}},$$

где  $C_0$  — начальная концентрация микротрещин;  $\theta_{cp}$  — среднестатистическое время ожидания разрушения одного структурного элемента, задаваемого формулой (1).

Микромеханическая модель учитывает неоднородности силового, структурного и прочностного состояния материала. Также введение в модель понятия «звучащего объема», позволило учесть влияния мешающих факторов, присутствующих при регистрации АЭ-сигналов [5].

В общем случае значение  $\theta_{cp}$  структурных элементов любого исследуемого материала не является постоянной величиной. Это связано с анизотропией свойств материала, неоднородностью поля механических напряжений и температурного поля, в котором находится объект. Структурная неоднородность материала учитывалась рядом авторов путем введения функции плотности распределения структурно-чувствительного параметра  $\gamma$  по структурным элементам  $\Psi_\gamma(\gamma)$  [5]. Исследователями эта функция принималась либо равномерной, либо описываемой ограниченным распределением Вейбулла–Гнеденко.

В. В. Носовым так же была разработана микромеханическая модель акустической эмиссии (ММАЭ), с помощью которой возможно проведение оценки состояния объекта на основе суммарного счета АЭ-сигналов:

$$N_\Sigma(t) = k_{AE} C_0 \int_q^{q_1(\varepsilon(t))} \Psi_\gamma(\gamma, \varepsilon(t), k, q, q_1(\varepsilon(t)), \lambda) \times \left( 1 - \exp\left[-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma(\bar{t})}{RT}\right)}\right] \right) d\gamma, \quad (2)$$

где  $\Psi_\gamma(\gamma, \varepsilon(t))$  — распределение структурно-чувствительного параметра  $\gamma$ ;  $q1(\varepsilon(t))$  — максимально возможное значение аргумента  $\gamma$  функции  $\Psi_\gamma(\gamma, \varepsilon(t))$ ;  $\sigma(\bar{t})$  — напряжение, приложенное к объекту.

Основной оценкой состояния объекта является параметр остаточного ресурса. Прогнозирование времени до разрушения возможно на основе наблюдения за процессом микротрещинообразования и оценки приближения концентрации микротрещин к критическому значению  $C^*$ . Согласно микромеханической модели остаточный ресурс может быть определен путем решения следующей системы уравнений [5]:

$$\left\{ \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \Psi_\omega(\omega) \left( 1 - \exp \left( - \int_0^{\tau^*} \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp \left( \frac{U_0}{RT} - \omega(t) \right)} \right) \right) d\omega = \frac{C^*}{C_0}, \right. \\ \left. \tau_{ост}^* = \tau^* - \tau_{пр}^*, \right.$$

где  $\tau_{пр}$  — предварительно потерянный объектом ресурс;  $\tau^*$  — изначальный ресурс объекта;  $C_0$  — начальная концентрация микротрещин,  $C^*$  — критическое значение концентрации микротрещин.

Микромеханическая модель акустической эмиссии (2) является многопараметрической и учитывает разрушение структурных элементов, неоднородность материала, температуру, а также уровень нагружения.

При упругой деформации объекта процесс образования и накопления повреждений имеет этапы неоднородного и однородного разрушения. На начальном этапе отмечается уменьшение «хвоста» распределения значений  $\gamma$  без увеличения «колокола» (рис. 1, а). Дальнейшее повышение нагрузки ведет к образованию и накоплению повреждений на этапе однородного разрушения, не приводящего к изменению параметров  $\Psi_\gamma$ . При возникновении критических значений напряжений, создающих пластическую деформацию материала, отмечается изменение предельного значения  $q1$  распределения  $\Psi_\gamma(\gamma)$  (рис. 1, б).

Исходя из предельного значения распределения параметра  $\gamma$  проводится критериальная оценка определения начала пластической деформации [6].

Для исследования ММАЭ был проведен численный эксперимент. В качестве исходных параметров были заданы следующие параметры:

Значение энергии активации, соответствующее материалу Ст3:  $U_0 = 135$  кДж/моль

Линейно возрастающий уровень нагрузки:  $\sigma(t) = kt$ , где  $\sigma(t)$  — линейно возрастающая функция нагрузки;  $t$  — вектор времени;  $k = 1$  МПа/с

Акустико-эмиссионный коэффициент (рис. 2):  $coeff(t) = k_{AE} C_0(t)$

Функция изменения предельного значения ограниченного распределения Вейбулла–Гнеденко от времени (рис. 1):  $q1(t)$

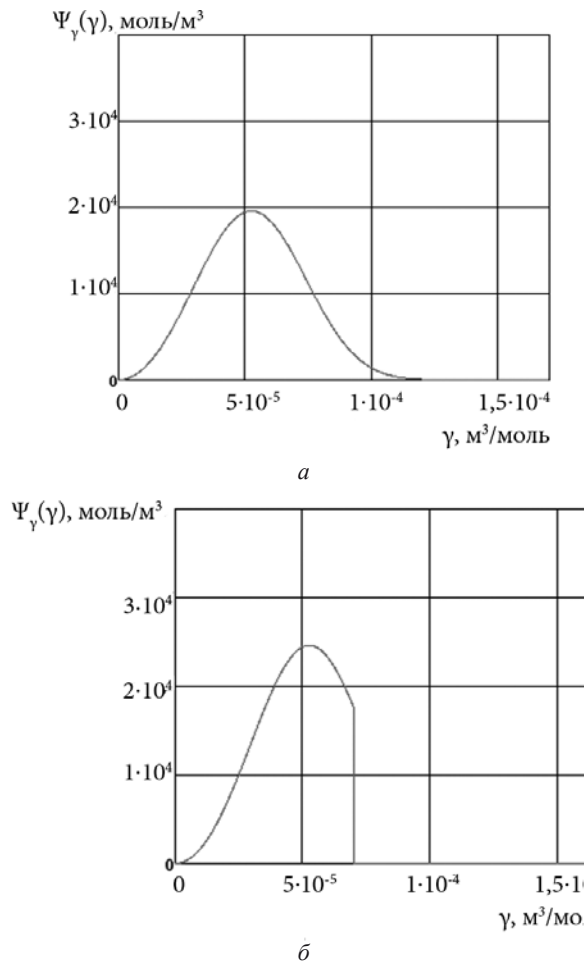


Рис. 1. Распределение структурных элементов до (а) и после (б) начала пластической деформации  $\Psi$

Момент начала пластической деформации:  $t = 210$  с.

На рис. 2 показана математическая модель функции  $coeff(t) = k_{AE} C_0(t)$ , которая была задана с учетом заранее известного момента начала пластической деформации, а также на параметрах, описанных в [5]. При пластической деформации повышается объем разрушенных структурных элементов, что приводит к увеличению «звучащего» объема.

На рис. 3 продемонстрирована математическая модель функции  $q1(t)$ . До наступления процесса пластического деформирования материала изменение предельного значения ограниченного распределения Вейбулла–Гнеденко является незначительным. Основные изменения распределения происходят в его «хвосте». При достижении напряжением критического значения повышается интенсивность процесса разрушения структурных элементов, что приводит к уменьшению предельного значения распределения (см. рис. 1, а б).

На основе описанных выше параметров удалось провести численное моделирование функции суммарного счета импульсов АЭ (рис. 4, а), а также сопоставить ее форму с аналогичной функцией (рис. 4, б), зарегистрированной при разрушении реального объекта.

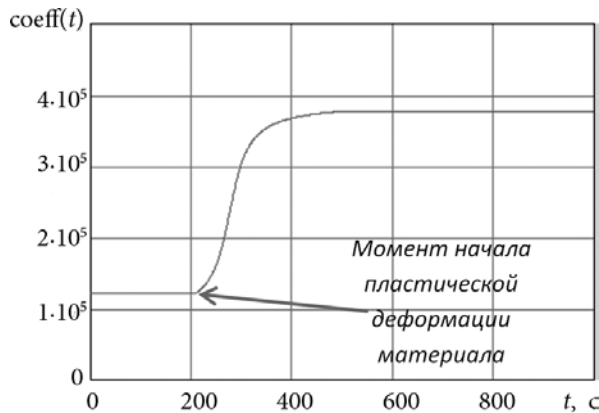


Рис. 2. Зависимость коэффициента математической модели от изменения «звучащего» объема с течением времени

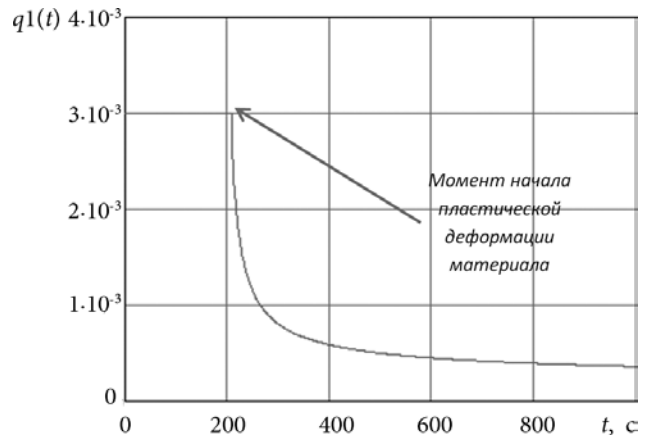
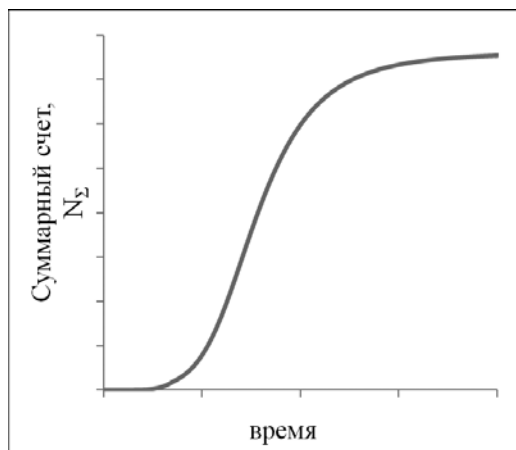
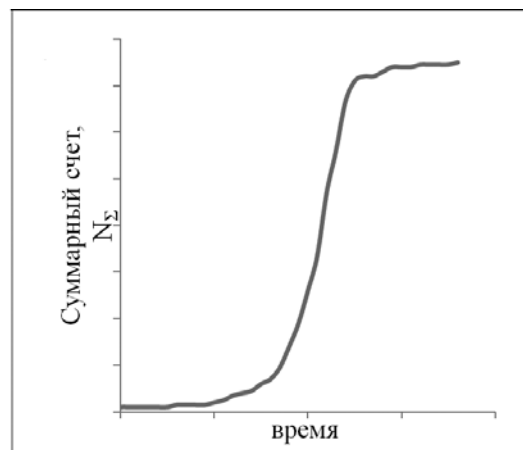


Рис. 3. Зависимость предельного значения функции распределения структурно-чувствительного параметра во времени



а



б

Рис. 4. Форма функции суммарной АЭ, полученной в результате численного моделирования (а) и эксперимента (б)

Отмечена схожесть двух функций по своей форме, что является одним из подтверждений достоверности ММАЭ. Таким образом, при проведении аппроксимации реальной функцией суммарного счета с помощью ММАЭ возможно определение начала пластической деформации.

Дополнительным этапом подтверждения достоверности является сопоставление ММАЭ и локально-динамического критериев [2]. Для применения локально-динамического критерия следует аппроксимировать функцию суммарной АЭ степенной функцией  $y = ax^b$  на участках как упругой, так и пластической деформаций (рис. 5, а). Стоит отметить, что критериальным параметром, указывающим на уровень опасности накопленных повреждений, является показатель аппроксимирующей функции —  $b$ .

На рис. 5, а, б показано применение локально-динамического критерия для функции суммарного счета, полученной путем численного моделирования на основе ММАЭ. На рис. 5, а изображена аппроксимация участка накопления микроповреждений соответствующего процессу упругой деформации материала; рис. 5, б соответствует аппроксимации участка пласти-

ческого деформирования. После применения локально-динамического критерия было выявлено, что на участке упругой деформации критериальный параметр  $b = 2,3$ , а на участке пластического деформирования —  $b = 5,8$ . Таким образом, в момент перехода от упругой деформации к пластической меняется как значение критериального параметра локально-динамического критерия, так и характер функции  $q1(t)$ , что подтверждает достоверность ММАЭ.

### Разработка оптимизированного алгоритма оценки начала пластической деформации

Значение критериального параметра определяется при помощи аппроксимации математической моделью (2) функции суммарного счета АЭ-сигналов. Аппроксимация функции осуществляется по пяти переменным:  $k_{AE}C_0$ ,  $q$ ,  $q1$ ,  $k$ ,  $\lambda$ . Стоит отметить, что переменные  $q$ ,  $q1$ ,  $k$ ,  $\lambda$  являются параметрами распределения структурно-чувствительного параметра, а  $k_{AE}C_0$  — характеристика «звучащего» объема.

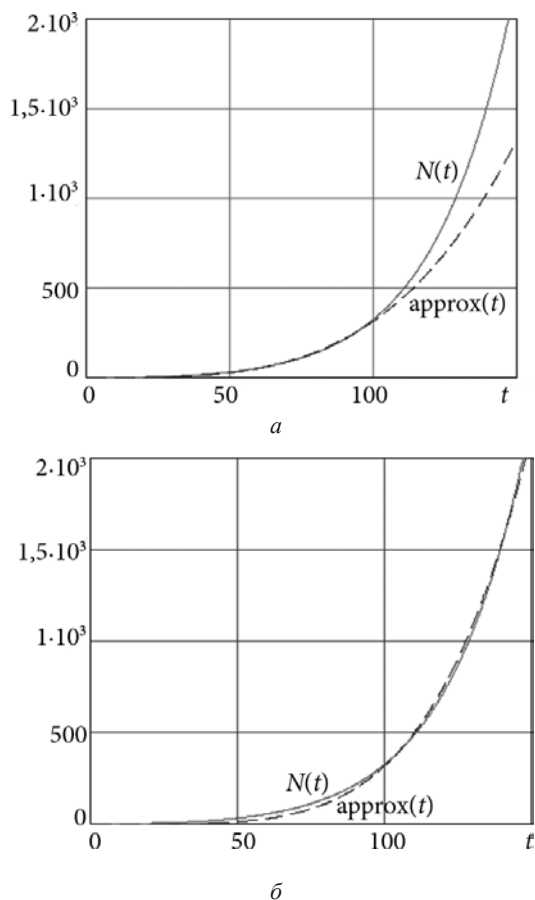


Рис. 5. Применение локально-динамического критерия на математической модели суммарной АЭ, соответствующей участку упругой (а) и пластической (б) деформаций

Математическая модель включает в себя пять параметров оптимизации, четыре из которых соответствуют параметрам ограниченного распределения Вейбулла–Гнеденко. Для повышения скорости и точности расчета был предложен алгоритм определения критериального параметра.

Основные этапы разработанного алгоритма:

- определение масштабных параметров распределения Вейбулла–Гнеденко на заранее известном бездефектном участке, которые впоследствии будут неизменны;

- дальнейшая оптимизация только критериальных параметров модели ( $q1(t)$  и  $coeff(t)$ );

- отслеживание момента начала пластической деформации по характерной точке функции  $q1(t)$ ;

С целью проверки алгоритм был применен на смоделированной зависимости суммарного счета АЭ. Оптимизация проводилась в программе Mathcad методом сопряженных градиентов.

Первым этапом применения методики стало определение параметров ограниченного распределения Вейбулла–Гнеденко на заранее известном бездефектном участке. Расчет параметров выполнялся на основе аппроксимации математической моделью функции суммарной АЭ (рис. 6).

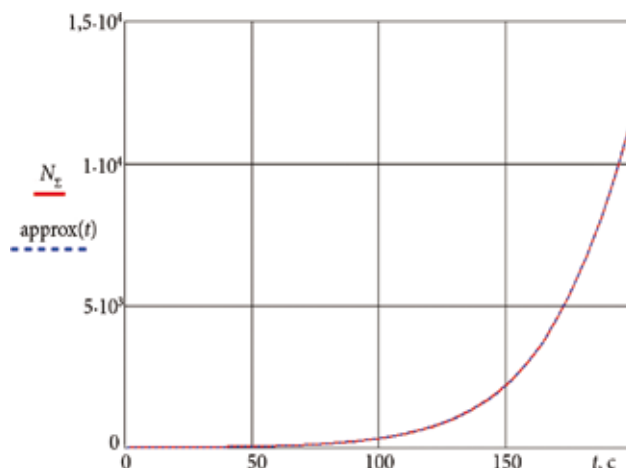


Рис. 6. Применение ММАЭ и определение коэффициентов модели на участке упругого деформирования основного материала

На рис. 6 показана аппроксимация функции суммарного счета на участке упругой деформации. Для более точного определения значений параметров модели аппроксимация проводилась итерационно, что в конечном итоге позволило определить значения параметров ММАЭ (таблица) с наименьшей погрешностью ( $Q_s = 1,22 \cdot 10^{-4}$ ).

После определения параметров распределения аппроксимация проводилась только для параметров  $q1$  и  $coeff$ . Критериальные коэффициенты рассчитывали в определенной точке. Это связано с тем, что каждая точка модели на участке упругой деформации соответствует определенным значениям критериальных коэффициентов. Из-за чего ММАЭ была вычислена в каждой точке зависимости суммарного счета от времени (рис. 7). Поиск значений модели был проведен с максимальной точностью и значение средней ошибки соответствует  $Q_s = 2.23 \cdot 10^{-3}$ .

На рис. 7 изображено применение разработанного алгоритма с пошаговым расчетом значения критерия. На основе разработанного алгоритма по времени изменения параметров математической модели был определен момент начала пластической деформации контролируемого (или исследуемого объекта).

### Применение разработанного алгоритма в задачах АЭ-диагностики

ММАЭ была применена при контроле композиционных материалов с нанесенным индикаторным тензопокрытием [7] (тонкое покрытие, нанесенное на поверхность материала, основной задачей которого является ранняя диагностика области разрушения объекта [8]). Тензоиндикаторы разрабатываются таким образом, чтобы начало их разрушения соответствовало 5 — 10% от максимальной разрушающей нагрузки. При деформации объекта на поверхности тензоиндикатора образуются трещины, отражающие поле наибольшей деформации.

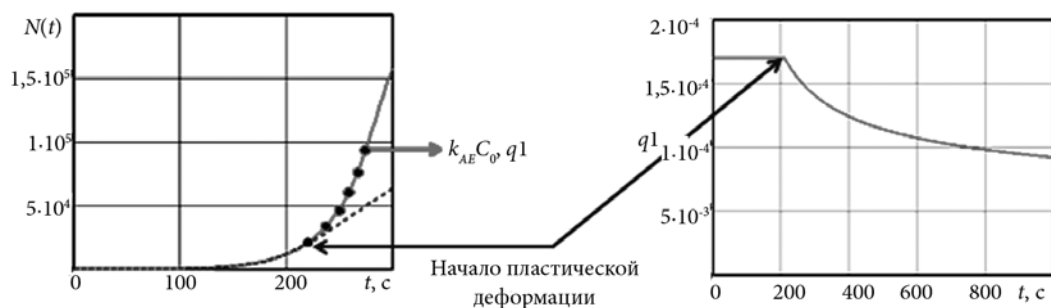


Рис. 7. Применение оптимизированного алгоритма, основанного на ММАЭ

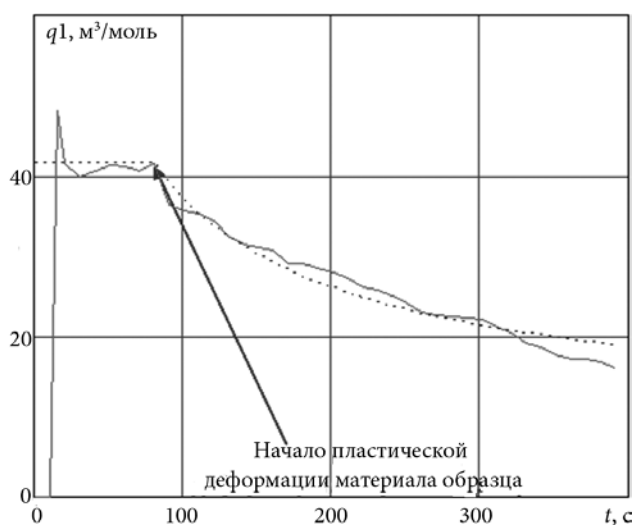


Рис. 8. Определение начала пластической деформации с помощью ММАЭ

### Сравнительная таблица вычисленных параметров с заданными параметрами модели

Параметр	Аппроксимация	Модель
$k$	3,025	3
$\lambda$	$6,060 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$
$q$	0	0
$q1$	$1,711 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
coeff	$1,229 \cdot 10^5$	$1,221 \cdot 10^5$

Особенностью эксперимента стало наличие двух процессов разрушения — тензоиндикаторного покрытия и самого композиционного материала. Следует отметить, что разрушение тензоиндикаторного покрытия начиналось на ранней стадии нагружения и завершается до начала интенсивного разрушения основного материала. Таким образом, поток АЭ-сигналов содержал как сигналы от тензоиндикатора, так и сигналы, соответствующие разрушению основного материала.

Основная задача заключалась в разделении потоков АЭ-данных, возникающих при разрушении тензоиндикатора и основного материала. Для ее решения была применена ММАЭ. Согласно разработанному алго-

ритму начальный этап применения методики включал в себя определение параметров модели на участке упругой деформации основного материала, то есть при разрушении тензоиндикатора. После определения требуемых значений ( $k_{AE}C_0$ ,  $q$ ,  $q1$ ,  $k$ ,  $\lambda$ ) проводилась аппроксимация функции суммарной АЭ и определялось предельное значение распределения Вейбулла-Гнеденко —  $q1(t)$  (рис. 8).

На рис. 8 показана зависимость величины  $q1$  от времени при разрушении многослойного образца. Начальный участок зависимости, где значение  $q1$  остается неизменным, соответствует разрушению тензопокрывтия, уменьшение значения  $q1$  свидетельствует об ограничении распределения параметра  $\gamma$  и разрушении основного композиционного материала образца. Таким образом, был разработан алгоритм, позволяющий повысить скорость, а также точность расчета критериальной оценки.

### Выводы

Начальным этапом исследования является изучение основных составляющих микромеханической модели акустической эмиссии (ММАЭ).

Проведена апробация ММАЭ на реальном объекте, при которой был определен такой параметр модели, который был использован в качестве индикатора начала пластической деформации.

На основе проведенных исследований был предложен оптимизированный алгоритм применения ММАЭ, заключающийся в определении критериального параметра при аппроксимации модели лишь по двум переменным. Такой подход уменьшает как расчетное время параметров, так и значение ошибки после проведения аппроксимации.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «УМНИК» в рамках договора №2328ГУ1/2014 от 19.06.2014 г.

Автор благодарит с.н.с. ИМАШ РАН Васильева И. Е., а также специалистов группы компаний Интерюнис за консультации и помощь в проведении измерений.

---

## Литература

---

1. **ПБ 03-593-03.** Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.

2. **Неразрушающий** контроль: Справочник в 7 т. / под общей ред. В.В. Клюева. Т. 7. Кн. 1. В.И. Иванов, И. Э. Власов. Метод акустической эмиссии; Кн. 2. Ф.Я. Балицкий и др. Вибродиагностика. М.:Машиностроение, 2005.

3. **Носов В.В.** Автоматизированная оценка ресурса образцов конструкционных материалов на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии //Дефектоскопия. № 12. 2014. С. 24 — 35.

4. **Носов В.В.** Диагностика машин и оборудования. СПб.: Изд-во «Лань», 2012.

5. **Лахова Е.Н.** Методика прогнозирования работоспособности критически нагруженных объектов маши-

ностроения [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 : защищена 20.11.2012 – СПб., 2012. – 165 с.

6. **Носов В.В.** Методология акустико-эмиссионной оценки прочности как основа эффективности неразрушающего контроля // В мире НК. 2014. № 3 (65). С. 7 —13.

7. **Чернов Д.В., Барат В.А., Елизаров С.В.** Оценка состояния материала с индикаторным тензопокрытием на основе микромеханической модели акустической эмиссии // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Могилев: Белоруссия, 2014. С. 160 — 162.

8. **Елизаров С.В. и др.** Комплексная диагностика процессов деформирования и разрушения элементов конструкций с использованием хрупких тензопокрывтий и акустической эмиссии // Сб. докл. XX Всерос. науч.-техн. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике. М.: Издательский дом «Спектр», 2014.

*Статья поступила в редакцию 31.01.2016*