

## О НАКОПЛЕНИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МАТЕРИАЛАХ ПРИ РАЗРУШЕНИИ

С. А. НЕДОСЕКА, А. Я. НЕДОСЕКА, Л. И. МАРКАШОВА, О. С. КУШНАРЕВА

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В статье рассмотрены закономерности возникновения и развития повреждений в материалах при их деформировании. В качестве примера подробно рассмотрено изменение структуры при растяжении образца из стали 12Х1МФ. Показано, что процесс накопления повреждений начинается с возникновением пластических деформаций, стимулирующих интенсивное движение и объединение дислокаций. Далее образуются микронесплошности, постепенно превращающиеся в поры, которые развиваются и объединяются в более крупные образования. Процесс появления повреждений достаточно хорошо регистрируется путем применения существующей технологии на основе метода акустической эмиссии. Это позволяет установить начало образования повреждений и их развитие вплоть до разрушения. Аналитическая часть технологии дает возможность построить модель накопления повреждений и разрушения. Библиогр. 20, табл. 1, рис. 13.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, пластическая деформация, структура, поры, накопление повреждений

Исследование накопления и развития повреждений проводили на образцах, изготовленных из стали 12Х1МФ. Для сокращения числа испытываемых образцов их конфигурация была выбрана из условий получения различной величины пластических деформаций на одном образце, что позволило отслеживать изменения структуры деформируемого материала в зависимости от локального значения пластической деформации. Этого эффекта удалось добиться, выполнив плавное утонение в конструкции образца гладкой выточкой по радиусу окружности. В нашем случае этот радиус был принят равным 215 мм (рис. 1).

Испытание образца проводили на гидравлической разрывной машине Р20 с использованием аппаратуры акустической эмиссии ЕМА-3 [1]. Данная аппаратура обладает необходимым программным обеспечением ЕМА 3.91, позволяющим достаточно точно определять координаты событий АЭ и получать необходимые для принятия решения характеристики этих событий.

На рис. 1 представлены результаты испытаний – гистограмма (а) событий АЭ, распределенных по длине образца (б). Принятая длина расчетной части образца – 200 мм. Показан общий кластер АЭ событий, который содержит 7 событий и место разрушения образца, находящееся в его средней части. На гистограмме представлена также последовательность возникновения АЭ событий в процессе растяжения. На рис. 1, б показан образец и его средняя часть (внизу) после разрушения. Рис. 1, в представляет график остаточной пластической деформации и возникшие АЭ осцилляции [1].

На рис. 2 приведены основные физические характеристики АЭ событий, сопровождающих раз-

рушение, полученные с помощью используемой аппаратуры. В рассматриваемом случае каждому АЭ событию соответствуют его характеристики – координата возникновения, максимальная амплитуда, количество колебаний АЭ датчиков для каждого события (осцилляции). События расположены в порядке их появления. Приведена нагрузка, при которой произошло каждое событие. Следует отметить, что развитие разрушения в связи с особенностями конструкции образца сосредоточено в области ослабления. На графике хорошо виден рост числа АЭ осцилляций, характеризующих дискретность развития повреждений структуры материала. Указанная характеристика показывает, что было зарегистрировано 61 существенное изменение в структуре материала с начала приложения растягивающей нагрузки. Это наглядно иллюстрируют приведенные на рисунке микрошлифы и, ниже по тексту, результаты физических исследований структуры. Видно также, как меняется время нарастания АЭ события, характеризуя «жесткость» протекающего процесса разрушения.

Для анализа разрушения материала по данным АЭ были проведены исследования поверхностей поперечного сечения образца в местах их появления. На рис. 3 показаны места сечения образца для исследования его внутренней поверхности.

В самом начале исследованию с помощью растровой электронной микроскопии была подвергнута поверхность в месте разрушения. На рис. 4 приведены фрактограммы поверхности разрушенного образца. Многочисленные поры видны на всей поверхности излома (рис. 4, а), а при большем увеличении наблюдаются области слившихся пор (рис. 4, в, г).

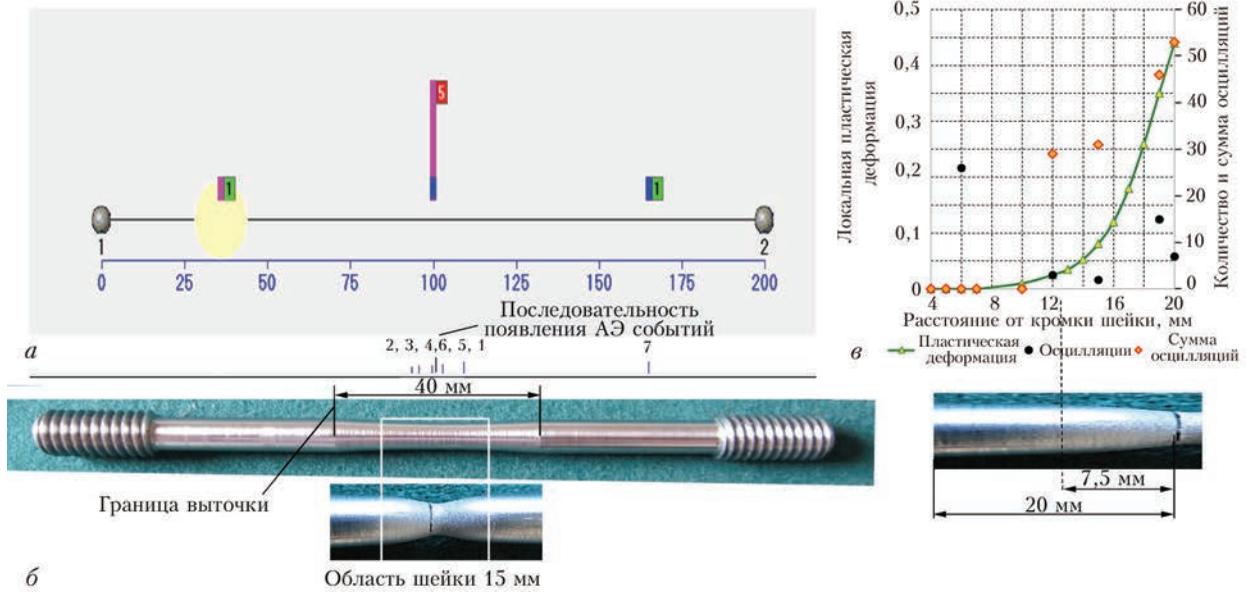


Рис. 1. Результаты распределения АЭ событий (а) по длине образца специальной конструкции (б) для проведения испытаний, а также график остаточной пластической деформации и осцилляции в событиях АЭ (в). 7,5 мм – левая граница шейки, образовавшейся в средней части образца в результате пластической деформации

Далее исследования поверхностей в местах сечений выполняли оптическим методом для выявления трещин и пор и просвечивающей электронной микроскопией для выявления перераспределения дислокационных полей в процессе деформирования.

Микроструктура сечений при увеличении в 500 раз представлена на рис. 5. Видно, что области, удаленные от мест возникновения пластической деформации, неизменны в своей структуре как при увеличении в 500 раз (рис. 5), так и 14000 (рис. 6). На рис. 5 представлены микрошлифы поверхностей среза при различных объемах пласти-

ческой деформации. На шлифах видны искажения зерен и поры, появляющиеся при достаточно больших локальных пластических деформациях. Дислокации (рис. 6) в начальной стадии не перемещаются, структура стабильна. Пластическая деформация приводит к появлению движущихся потоков дислокаций и деформированию внутренней структуры. Чем выше величина пластической деформации, тем больше искажение структуры. Кристаллы вытягиваются, начинают образовываться поры, число которых растет с увеличением деформации. При большой пластической деформации (0,44 % в данном случае) кристаллы раз-

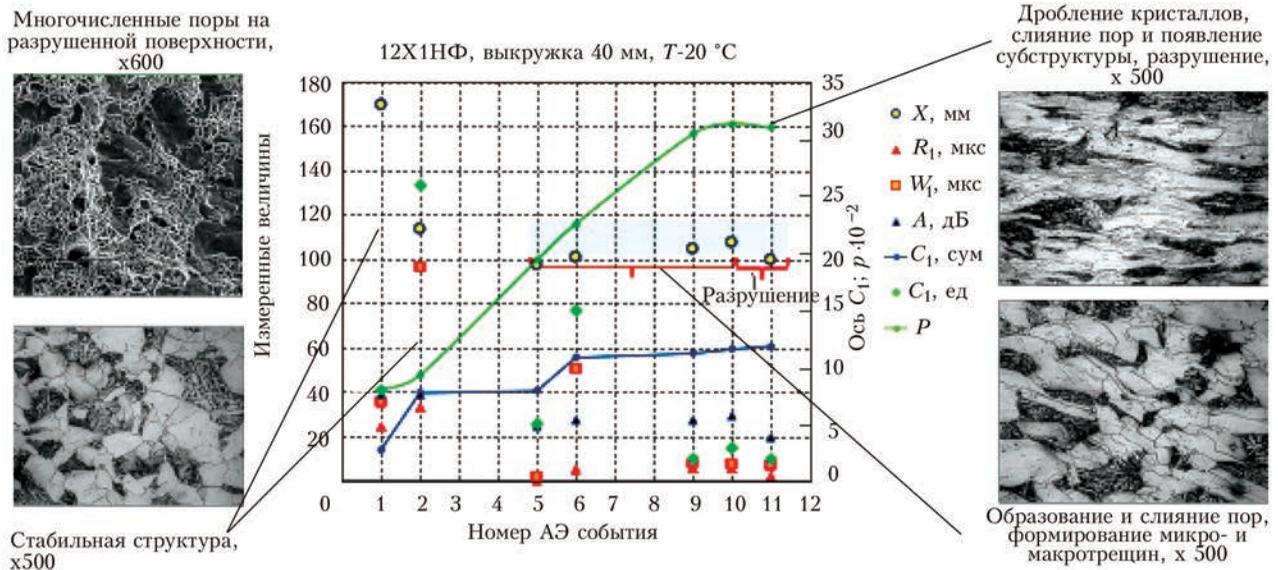


Рис. 2. Характеристики АЭ событий, зарегистрированных при испытаниях стали 12X1НФ на растяжение (последовательность появления АЭ событий, показанных на рис. 1). Микроструктура разрушенной поверхности образца и микрошлифы зоны поперечного сечения образца в местах возникновения АЭ событий. Выделена также область, в которой стартовало и завершилось разрушение (на графике голубая полоса). Обозначения: X, мм – координата возникшего АЭ события, R<sub>1</sub>, мкс – время нарастания события, w<sub>1</sub>, мкс – длительность события, A, дБ – амплитуда события, C<sub>1</sub> – к-во осцилляций в событии

рушаются, появляется субструктура (рис. 6, а). В конечном счете, большое количество пор и их объединений наблюдается на фрактограмме поверхности разрушения.

Интересно отметить, что начало процессу разрушения материала задают скопления дислокаций, которые при определенных условиях перераспределения приводят к образованию микротрещин. На более ранних стадиях деформирования последние постепенно преобразуются в поры, слияние которых приводит, в конечном счете, к образованию макротрещины и последующему разрушению (рис. 6) [2–7]. Указанные явления протекают дискретно и сопровождаются возникновением акустической эмиссии, которая достаточно надежно фиксируется аппаратурой ЕМА-3. Проведенные исследования подтвердили, что разрушение материалов на заключительных стадиях деформирования связано с образованием, ростом и слиянием пор [2, 8–13]. В работе [2] показан харак-

тер разрушения стали 15Х2МФА в трех вариантах пластичности, заданных специальной термообработкой. Показано, что сталь 15Х2МФА в хрупком состоянии на заключительных стадиях деформирования также разрушается порообразованием. Поры появляются в устье образовавшейся в процессе деформирования трещины и приводят к разрушению.

Следует отметить одну особенность в динамике протекания разрушения материала 12Х1МФ. В таблице приведены данные появления событий АЭ по времени в процессе нагружения образца. Приведенные данные показывают, что перед последним событием АЭ, связанным с началом отделения частей образца друг от друга и последним из серии событий, связанных с накоплением критического объема повреждений в материале, существует достаточно длительный промежуток времени, в данном случае составляющий порядка 35,3 % от времени окончания формирования критического объема повреждений. Этот эффект показывает, что разрушение материала происходит не мгновенно по достижении им критического состояния, а спустя некоторое время. Данный эффект может иметь существенное значение на практике при эксплуатации конструкций, контролируемых системами постоянного АЭ мониторинга, поскольку иногда такой промежуток времени может оказаться достаточным для принятия решения об изменении эксплуатационных параметров до безопасного уровня.

Проведенные исследования позволяют значительно повысить эффективность АЭ контроля и создать более совершенную методику и технологию контроля разрушения материалов как на заключительной стадии разрушения (образование и слияние пор), так и на стадии более раннего обра-

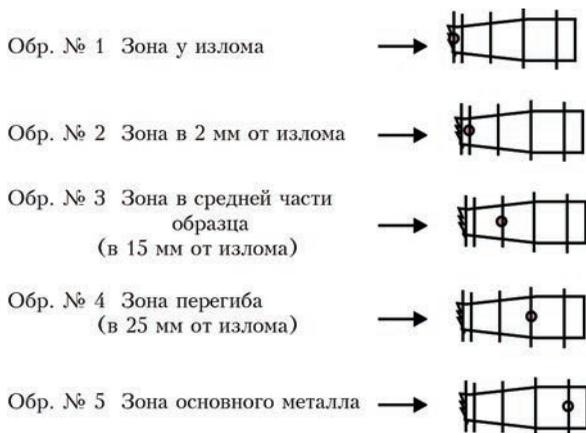


Рис. 3. Места поперечного сечения образца для физических исследований в местах появления АЭ (указаны точкой)



Рис. 4. Поры на поверхности разрушения: а – фрактография всей поверхности разрушения ( $\times 20,4$ ); б – вид разрушенной части образца; в, г – многочисленные поры (черные точки и пятна) на поверхности разрушения ( $\times 600$  и  $\times 2010$ , соответственно)

зования повреждений (микротрещины, интенсивные перемещения групп дислокаций). При этом применение АЭ позволяет обнаруживать и описывать параметры дефектов на всех стадиях их возникновения и развития.

Фактически весь процесс накопления повреждений, вплоть до разрушения, может быть описан путем математического моделирования. Есть ряд различных путей построения такой модели. Ниже будет показано, как, с целью обеспечения высо-

кой достоверности получаемых при помощи модели результатов, применить сразу несколько различных независимых способов для ее построения таким образом, чтобы они служили для взаимной проверки. Такая цель была в конечном счете достигнута.

В основе созданной модели [9, 10, 14–21] лежит общая, достаточно распространенная концепция повреждаемости. Под повреждаемостью понимается деградация структуры и свойств ма-

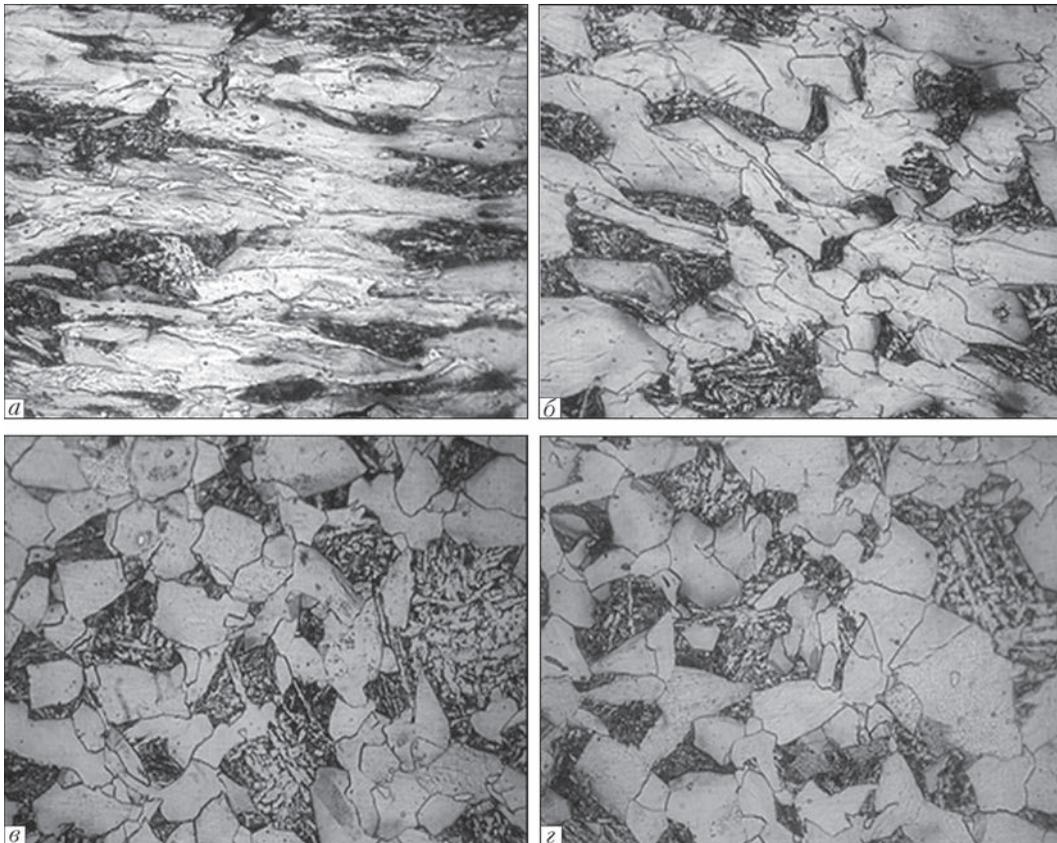


Рис. 5. Микрошлифы ( $\times 500$ ) поверхностей среза при различных объемах пластической деформации: многочисленные поры (черные точки) видны при  $\epsilon^* \cong 40...43\%$  на расстоянии 1 мм от поверхности разрушения (а) и  $\epsilon^* \cong 30\%$  на расстоянии 2 мм (б); поры практически отсутствуют (в, г) вдали от зоны пластических деформаций ( $\epsilon^* = 0\%$ , расстояние 15 мм и более).  $\epsilon^*$  – локальная пластическая деформация

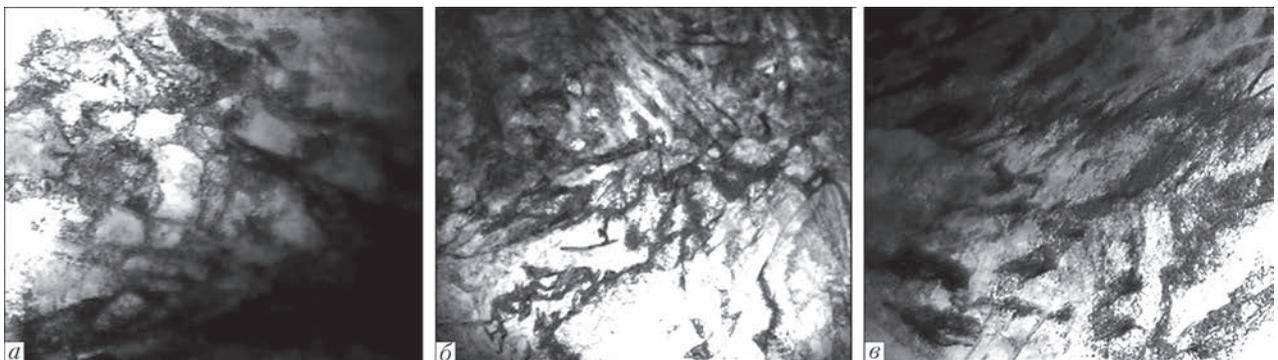


Рис. 6. Перераспределение дислокационных полей в материале при разной величине локальной пластической деформации (электронная просвечивающая микроскопия): а –  $\epsilon^* = 44\%$ ; б – 30; в – 0 ( $\times 14000$ )

**АЭ события и время их появления в процессе нагружения образца из стали 12Х1МФ**

АЭ события	1	2	3	4	5	6	7	Разъединение поверхностей (разрушение)
Время появления события, с	81	83	123	131	164	189	286	292

териала в процессе деформирования или эксплуатационной наработки. Для количественного описания состояния повреждаемого материала использована характеристика, называемая поврежденность. В данной работе поврежденность рассматривается как скалярная интегральная величина, относящаяся ко всему рассматриваемому объему материала. Критерий поврежденности представлен в виде:

$$\Delta W_{cp} = 1 - \frac{V_{повр}}{V_{исх}}, \quad (1)$$

где  $V_{исх}$  – значение параметра  $V$  для исходного материала;  $V_{повр}$  – для поврежденного [17].

Несмотря на простоту формулы (1), подтвердим ее справедливость очевидным примером. Если за  $V_{повр}$  принять объем возникших в материале пор, а за  $V_{исх}$  сам объем материала, то максимальное значение  $\Delta W_{cp} = 1$  будет достигнуто при заполнении порами всего объема материала. В целом же в формуле критерия поврежденности можно использовать любые характеристики, меняющиеся аналогичным образом при накоплении повреждений. Проверку предлагаемой методики изначально проводили при оценке поврежденности материала по данным АЭ сканирования – метода, при котором один из датчиков АЭ выступает в качестве генератора волн, а остальные работают как приемники, позволяя отслеживать развитие поврежденности по изменениям таких параметров принятых сигналов, как амплитуда и время нарастания сигнала до максимума [8–10, 14 – 19].

Для альтернативной, не зависящей от критерия поврежденности, оценки объема повреждений используется феноменологическая зависимость:

$$V = V_0 + n\varepsilon^{1/n} + m(1 - (1 + \varepsilon))^{1/n}, \quad (2)$$

где  $V$  – объем накопленных в материале повреждений;  $V_0$  – начальный объем повреждений;  $\varepsilon$  – деформация;  $n$  и  $m$  – экспериментальные константы. Эксперименты показали, что, используя указанную зависимость, можно рассчитывать реальный объем пор в материале, приняв  $n = N V_{cp}$ , где  $N$  – количество пор в материале;  $V_{cp}$  – объем средне-статистической поры [9].

Учитывая вышеизложенное, была создана компьютерная программа, моделирующая процесс накопления повреждений и соединяющая, по сути, несколько моделей одновременно. Один из первоначальных вариантов программы [14] представлен на рис. 7.

Процесс повреждаемости в рамках моделирования представлен постадийным добавлением к уже имеющемуся некоторому начальному (возможно и нулевому) числу новых пор в заданном объеме. При этом на определенной задаваемой стадии начинается их рост. Последующее взаимодействие пор и

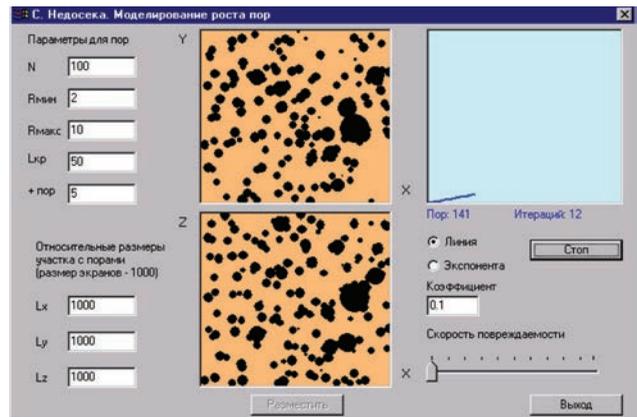


Рис. 7. Один из ранних вариантов программы, моделирующей процесс накопления повреждений. Обеспечивает задание размеров участка материала  $L_x, L_y, L_z$ , числа пор  $N$ , диапазона их радиусов  $R_{min}$  и  $R_{max}$ , расстояния сближения, необходимого для начала слияния  $L_{кр}$ . Рост происходит по линейному или экспоненциальному закону с выбором коэффициента

слияние приводят к заполнению порами все большего объема, и, в конечном счете, к разрушению материала. Модель, хоть и построена на имеющихся экспериментальных данных, является полностью абстрактной и позволяет варьировать условия виртуального эксперимента в максимально широком диапазоне. В данной части модели поврежденность известна заранее, что позволяет проверять справедливость для каждого рассчитываемого случая формулы (2) и уточнить входящие в нее константы.

Одновременно с виртуальным ростом и слиянием пор моделируется изменение параметров  $A_i$  и  $R_i$  сканирующих АЭ сигналов в зависимости от заполнения материала порами, где  $A$  – амплитуда выходного сигнала,  $R$  – время нарастания выходного сигнала до максимума,  $i = 1 \dots 3$  – направления сканирования. И сразу же решается обратная задача пересчета этих изменений в поврежденность материала. При этом используется формула (1), в которой в качестве параметра  $V$  используется уже не объем пор, а скорость нарастания акустического сигнала до максимума  $V_i = A_i/R_i$ . Данная часть модели основана на экспериментальных данных, позволяющих утверждать, что перекрытие порами определенной площади материала в направлении сканирования приводит к пропорциональному уменьшению амплитуды сканирующего сигнала и увеличению времени его нарастания до максимума. Проверка показала, что получаемые данные соответствуют реальным экспериментам. Зная площади проекций пор  $F_1, F_2, F_3$  для каждого направления сканирования, рассчитывают объем, занимаемый порами, и приближенно определяют количество пор (предполагая известным средний объем поры). Расчеты показали достаточно близкое, с разбросом не более 15 %, соответствие определенного таким образом коли-

чества пор их количеству, задаваемому при моделировании. В то же время, задавая существенно различный размер пор, либо некорректный предполагаемый средний размер поры, можно получить более значительную погрешность.

Поры в материале возникают и сливаются дискретно, о чем свидетельствует регистрация в приведенных выше экспериментах событий АЭ на стадиях их активного развития. В рамках создания математической модели накопления повреждений бы принято решение моделировать и параметры сигналов АЭ, связывая их с возникновением, ростом и слиянием пор. Физическую модель акустической эмиссии строили в предположении, что амплитуда сигналов АЭ пропорциональна объему вновь возникших в материале пустот. Программный интерфейс, созданный для реализации модели, позволяет имитировать возникновение акустической эмиссии от любого из трех факторов – возникновения пор, роста и слияния или произвольной их комбинации. Сопоставление модельных данных с экспериментальными позволило определить, что наибольшее соответствие моделируемой АЭ эксперименту достигается тогда, когда присутствуют только два из названных факторов – возникновение пор и их слияние. Это позволяет говорить о том, что, вероятно, рост пор происходит достаточно плавно и не является источником акустической эмиссии в том диапазоне сигналов, который регистрирует АЭ аппарата.

Было проделано большой объем численных экспериментов для получения эталонных характеристик разрушения при различном размещении пор для широкого спектра условий накопления повреждений. При помощи разработанной модели получены эталоны акустической эмиссии, которые являются достаточно абстрактными, не привязанными к конкретному материалу или виду нагружения. В настоящий момент наиболее характерные эталоны используются при прогнозировании разрушающей нагрузки в программном обеспечении для АЭ систем типа ЕМА-3, ЕМА-4 [20, 22, 23].

Таким образом, при помощи модели одновременно решаются несколько различных задач, а сами решения обеспечивают взаимную проверку. В процессе развития модели интерфейс программы, представленной на рис. 7, претерпел существенные изменения в соответствии с ростом возможностей и разделен на три связанных окна (рис. 8). В верхней части левого окна размещены два экрана с проекциями пор в плоскостях  $XY$  и  $XZ$ . Графики со шкалой левого окна показывают: верхний – число пор и поврежденность, нижний – непрерывную и (столбчатый) дискретную АЭ. Над ними размещена полоса, отображающая столбиками разного цвета амплитуду и причину появления импульса АЭ – возникновение, рост, слияние пор.

Среднее окно содержит несколько вкладок для управления процессом моделирования. На текущей вкладке размещены элементы управления для задания автоматического или пошагового роста пор, выбора закона роста и коэффициентов для него. Внизу окна отображаются реальные площади проекций пор в плоскостях  $XY$ ,  $YZ$ ,  $ZX$ .

Правое окно содержит результаты определения поврежденности материала и объема пор по данным АЭ сканирования. Параметр поврежденности обозначен как  $W$ . Среднее значение поврежденности по трем направлениям сканирования  $W_{cp}$  определяется как среднеарифметическое для  $W_x$ ,  $W_y$ ,  $W_z$ . Реальное значение поврежденности соответствует формуле (1), рассчитанной для объема, занятого моделируемыми порами. Расчетное количество пор определяется приближенно по заранее заданному среднестатистическому их размеру.

Программа позволяет теперь закладывать следующие гипотезы, параметры и закономерности в проводимый виртуальный эксперимент:

- связь между затуханием акустического параметра  $A$  и ростом  $R$  может зависеть от перекрытия площадей следующим образом: линейная зависимость; степенная зависимость; экспоненциальная зависимость;

- рост радиуса поры может происходить на каждой итерации следующим образом: линейно; экспоненциально; по произвольному закону в соответствии с набором точек из заранее созданного файла; произвольным образом можно задавать и нагрузку в направлении оси  $X$ ;

- закон размещения пор в материале может быть установлен: случайным (генератор случайных чисел – координат пор в заданных пределах); равномерным (попытка разместить заданное число пор в равных объемах); распределение по нормальному закону (с возможностью задавать параметры в зависимости от текущего коэффициента концентрации напряжений  $K_\sigma$ );

- материал в модели представлен объемом пространства в форме параллелепипеда с задаваемыми размерами в каждом направлении;

- модель позволяет учитывать слияние пор при достаточно близком их расположении. С учетом проведенной проверки работы модели и принципа Сен-Венана можно утверждать, что слияние описывается корректно при сближении пор на расстояние меньше  $D/10$ , где  $D$  – диаметр поры;

- имеется возможность задания нормального закона распределения пор по длине образца  $x$ , в предположении, что после нагружения образца реализуется:

$$M(x) = M_0 + \frac{K_{\text{усл}}}{S_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_m)^2}{2s_x^2}},$$

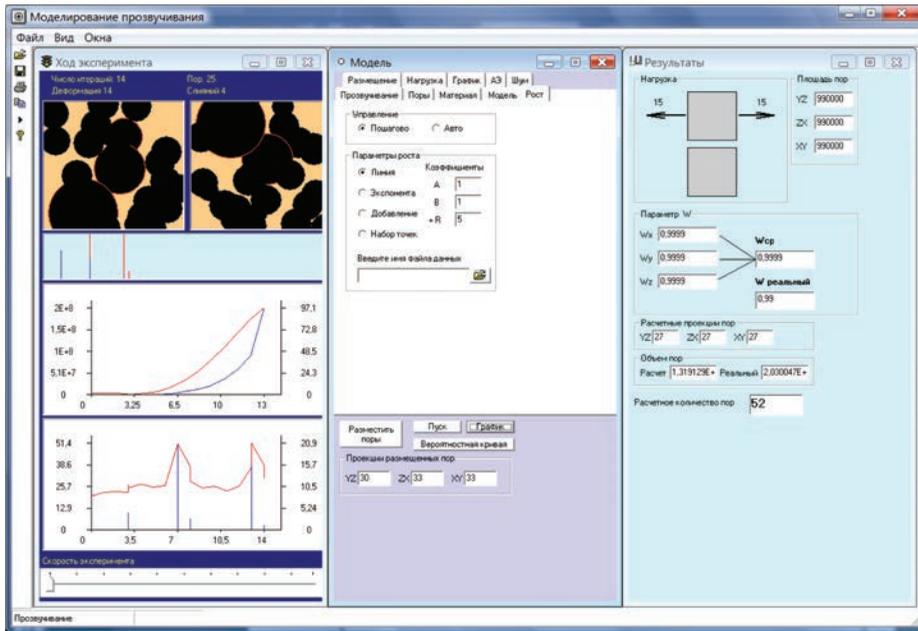


Рис. 8. Текущий интерфейс программы, моделирующей процесс накопления повреждений. Обеспечивает работу всех описанных возможностей моделирования

где  $M_0$  – первоначальная равномерная пористость;  $K_{усл}$  – коэффициент, отражающий свойства материала и условия нагружения, т. е.  $K_{усл} = K_{усл}(K_{\sigma})$ .

Особое внимание уделено критерию слияния пор, основанному на использовании такого параметра, как жесткость напряженного состояния. Рассмотрим систему из двух сферических пор с радиусами  $R_1 < R_2$ . Будем считать, что при сближении их на некоторое критическое расстояние в материале возникает локальная область, которую можно условно охарактеризовать как микрообразец.

Для такого микрообразца будет справедливым уравнение жесткости напряженного состояния  $K_{\sigma} = \sigma_i / \sigma_m$ , известное как параметр Бриджмена и которое можно выразить через радиус шейки и профиля такого образца как  $K_{\sigma} = 1/3 + \ln(1 + R_1/2R_2)$ .

Условием разрушения образца будет достижение предельной деформации  $\epsilon_{кр} = \alpha \exp(-\beta K_{\sigma}) + \epsilon_n$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты материала, определяемые из эксперимента;  $\epsilon_n$  – начальная деформация. Поскольку геометрические размеры пор и параметры напряженного состояния задаются самой моделью, на каждой стадии деформирования можно рассчитать локальную деформацию  $\epsilon = \ln(R_2/R_{2_0})$ , которая берется для большей из пор (с текущим радиусом  $R_2$ ), где  $R_{2_0}$  – ее начальный радиус. Таким образом, условие слияния пор соответствует эквивалентному условию разрушения микрообразца.

Работа модели показывает, что при продолжении роста пор наступает определенная критическая стадия, когда за счет слияния пор начинается лавинообразный рост поврежденности вплоть до полного разделения материала либо заполнения

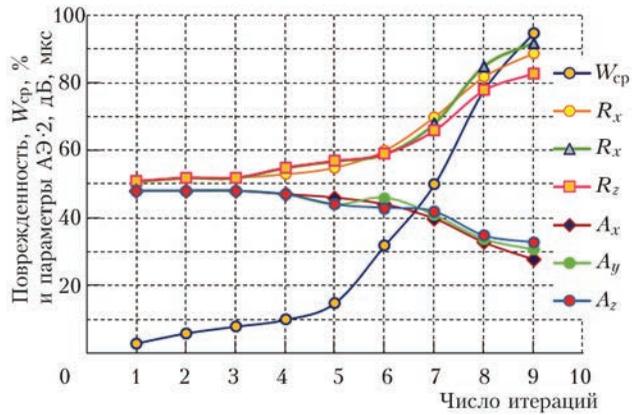


Рис. 9. Средняя поврежденность материала в процессе роста 20 пор и изменения амплитуд  $A$  и времен нарастания  $R$  акустических сигналов в трех направлениях сканирования (модель)

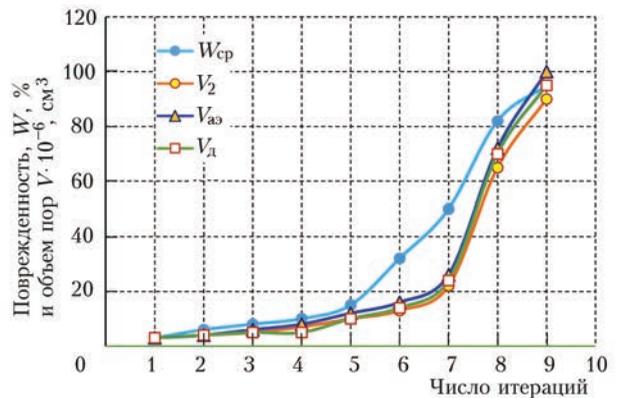


Рис. 10. Средняя поврежденность материала в процессе роста пор и сопоставление ее с действительным объемом пор, задаваемым моделью, расчетным объемом пор, получаемым двумя независимыми методами

порами всего объема. При этом эксперимент считается завершенным и дальнейшее моделирование останавливается.

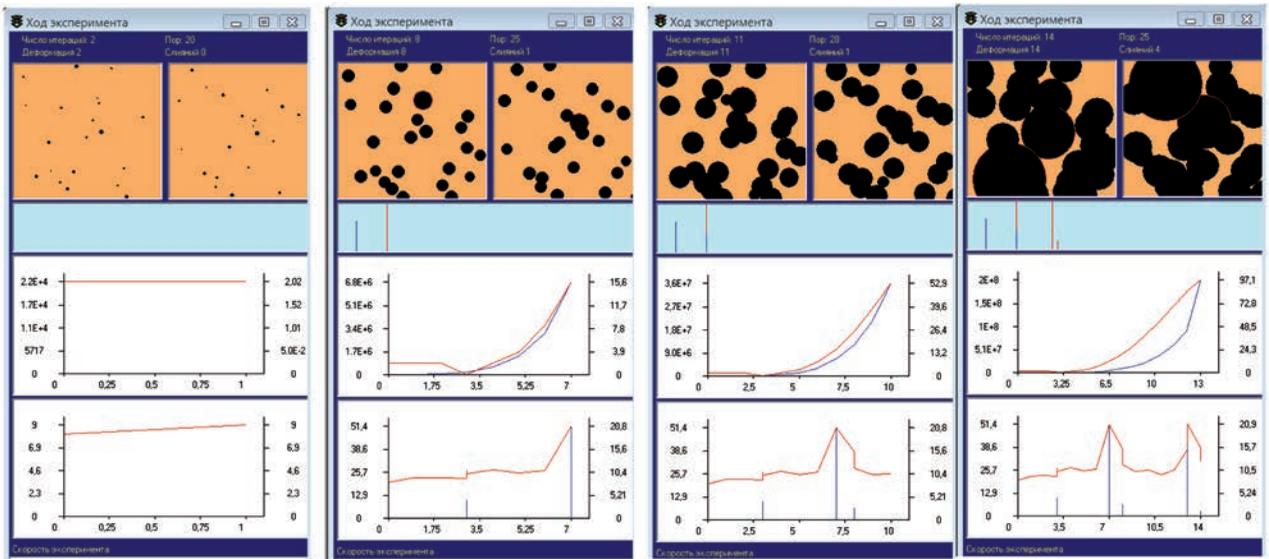


Рис. 11. Моделирование АЭ в процессе роста 20 пор. Случайный закон размещения. 14 итераций от начала эксперимента до разрушения. Показан последовательный поэтапный рост пор и их слияние

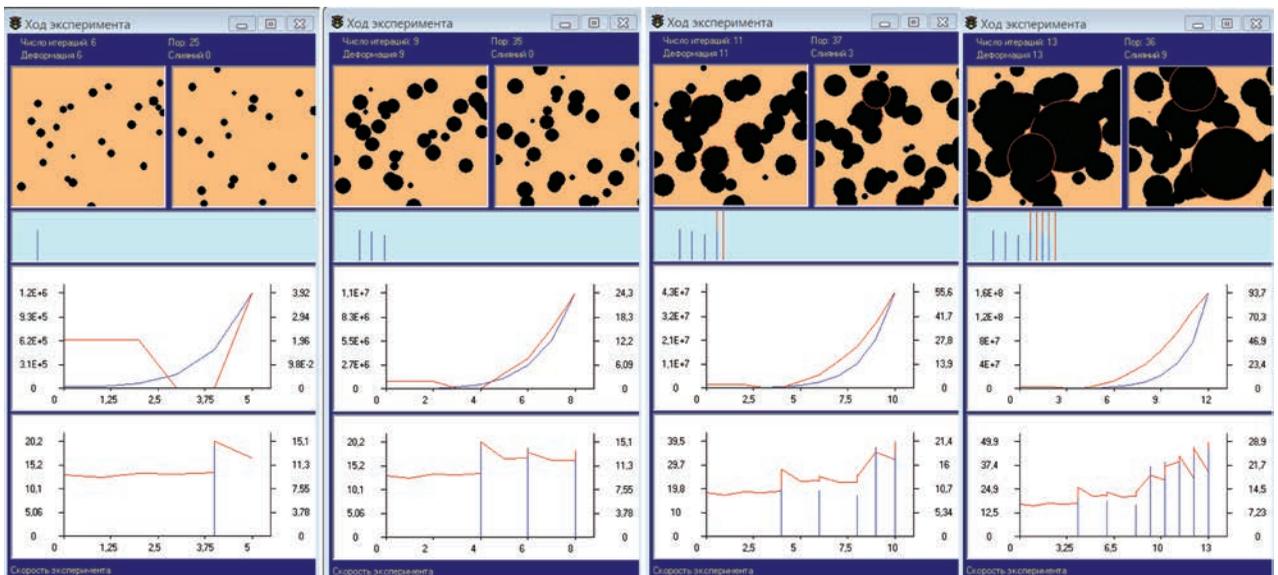


Рис. 12. Моделирование АЭ в процессе роста 20 пор с добавлением новых. Случайный закон размещения. 13 итераций от начала эксперимента до разрушения

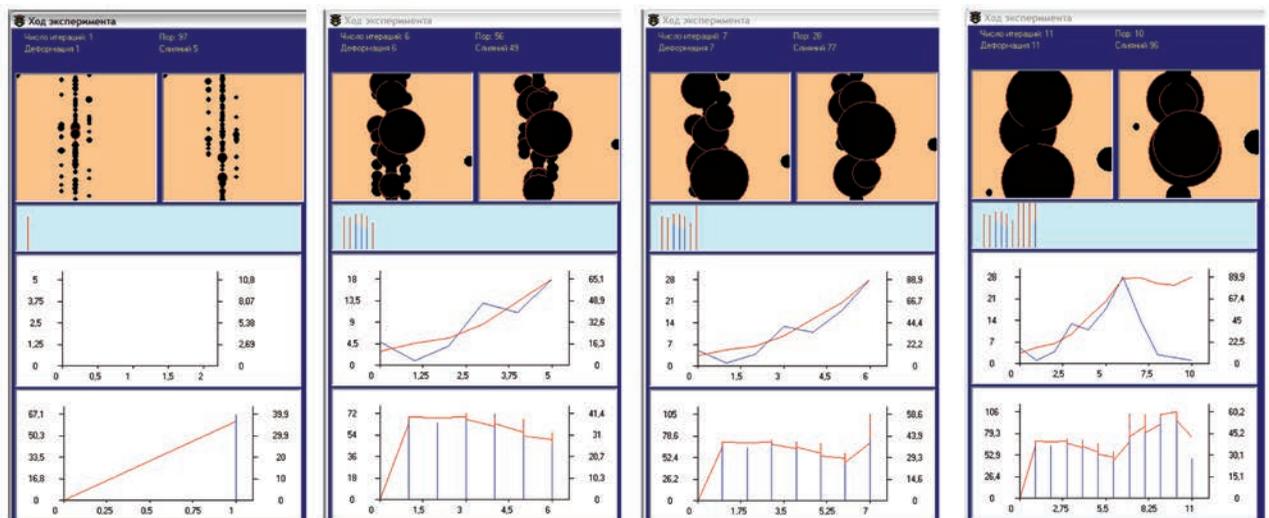


Рис. 13. Моделирование АЭ в процессе роста 100 пор при наличии концентратора напряжений. Нормальный закон размещения. 7 итераций от начала эксперимента до разрушения

Программа предусматривает построение большого числа графиков, характеризующих моделируемый процесс.

Графики на рис. 9 и 10 построены по результатам моделирования роста пор в кубе с гранью 1 см. Подобные пробы использовали для комплексного исследования поврежденности в работах [10, 13–15]. Для удобства задания в модели целочисленных начальных размеров пор [2] порядка десяти и более мкм размер куба был представлен как  $1000 \text{ мкм} \cdot 10^1$ .

На рис. 9 показано изменение амплитуд  $A_x, A_y, A_z$  и времен нарастания сканирующих сигналов  $R_x, R_y, R_z$  в результате частичного перекрытия растущими порами с первоначальным размером от 50 до 100 мкм соответствующих площадей поперечного сечения куба. Начальные значения амплитуд прозвучивания составляли 100 дБ, времен нарастания 100 мкс. Задан линейный закон изменения параметров сканирующих сигналов от перекрытия проекциями пор поперечного сечения. Среднее значение поврежденности (здесь  $W_{\text{ср}}$ ) по трем направлениям сканирования рассчитано как среднеарифметическое для  $W_x, W_y, W_z$ .

Одним из наиболее показательных является график, сопоставляющий три кривые – объем пор, заданных самой моделью, объем пор, определенный по изменению акустических параметров, и объем пор, определяемый по формуле (2), где  $V_0 = 0$ ,  $n$  меняется на каждой итерации и вычисляется как произведение текущего числа пор на средний объем поры  $N_x V_{\text{ср}}$ ,  $m = 50$ . Несущественное расхождение между кривыми свидетельствует о корректности проводимого виртуального эксперимента.

Отметим, что графики по результатам работы программы строятся автоматически в программе MS Excel любых версий старше Excel 97.

Примеры нескольких компьютерных экспериментов представлены на рис. 11–13.

Образмеренные графики, расположенные под экранами с изображением проекций пор, показывают: верхний – число пор и поврежденность, нижний – непрерывную и дискретную АЭ. Над ними размещена гистограмма, показывающая разными цветами АЭ, возникшие от различных причин – возникновения, роста, слияния. Моделирование представлено поэтапно. Показаны наиболее характерные итерации, отражающие процесс роста поврежденности и возникновение сигналов АЭ. Как видим, результаты показывают абсолютно различную картину временного распределения АЭ. Этот факт и использован при создании типовых эталонов, обеспечивших в конечном счете прогноз разрушения с достаточно высокой точностью  $\pm 15\%$  и вероятностью 95% [19, 22, 23].

Представленные на рис. 11–13 примеры интересны тем, что являются типичными и весьма

близкими к тем, которые использовались при создании действующих эталонов АЭ. В частности, вариант на рис. 13 рассматривает накопление повреждений при наличии концентратора напряжений, а в результате эксперимента получено поле повреждений, сходное с таковым при развитии трещины в пластичном материале.

В результате таких многочисленных экспериментов были получены эталоны для мелких рассеянных повреждений, отстоящих на достаточно большом расстоянии, для равномерно распределенных, для распределенных по нормальному закону с разной степенью концентрации в заданной области элемента материала. Также варьировали соотношением минимальных и максимальных размеров пор при моделировании случайных распределений.

После завершения и обработки экспериментов было отобрано немногим более 100 эталонов, наиболее подходящих, согласно проведенной проверке, для распознавания и прогнозирования текущего состояния реальных материалов.

Каждый эталон включает не только одну конкретную картину распределения повреждений в материале при заданной деформации. Эталон представляет собой набор состояний материала на нескольких итерациях, вплоть до перехода процесса слияния пор в неуправляемую стадию. Такая стадия считается соответствующей старту макротрещины, т. е. достижением критического состояния материала.

Компьютерный эксперимент показал, что для различных полей повреждений требуется различное число итераций для достижения критического состояния. Это означает, что процессы интенсивного роста, слияния пор и образования трещин соответствуют различным уровням локальных деформаций. Наиболее показательными с точки зрения соответствия реальному эксперименту являются те эталоны, в которых предусмотрено добавление небольшого числа мелких пор в процессе роста деформации, но не на каждой итерации. Таким образом, удалось воссоздать картину возникновения АЭ, весьма похожую на ту, которую регистрируют АЭ системы.

Однако оставался открытым вопрос о точном соответствии картины начального и последующего распределения повреждений, задаваемой в модели, реальному состоянию поврежденного материала и сопутствующей процессу повреждаемости акустической эмиссии.

Данная работа является определенным шагом вперед по установлению такого соответствия, поскольку в ней предпринята попытка сопоставить данные АЭ с реальной физической картиной состояния материала, полученной прямыми методами металлографических исследований. Это дает

в перспективе возможность закладывать в модель реальные размеры и координаты пор с целью повышения достоверности компьютерного эксперимента.

Конечным же результатом такого реального физического эксперимента и компьютерной модели должно являться совершенствование технологии анализа и прогноза состояния эксплуатирующихся конструкций по данным АЭ, переход от уже реализованного [16, 17, 20] распознавания опасных ситуаций к их более детальной классификации с точки зрения конкретных процессов, происходящих в материале при накоплении повреждений и разрушении.

### Выводы

1. На специально разработанных образцах исследован процесс накопления повреждений и развития разрушения в стали 12Х1МФ при статическом нагружении.

2. С использованием металлографических методов и акустической эмиссии подтвержден механизм разрушения испытанных образцов путем образования, развития и объединения пор на ключевых стадиях деформирования.

3. Представлена разработанная в виде компьютерной программы математическая модель, описывающая различными, обеспечивающими взаимную проверку, способами процесс накопления повреждений и сопутствующую ему акустическую эмиссию.

4. Показано, что результаты работы модели позволили реализовать и использовать в АЭ системах типа ЕМА-3, ЕМА-4 эталоны для распознавания изменений в структуре материалов в процессе их разрушения и последующего прогноза их состояния.

5. Отмечено, что приведенные результаты испытания образцов с точной идентификацией структуры поврежденного материала позволяют в перспективе разработать методику и создать более совершенную технологию анализа развития разрушения материалов и его прогнозирования по данным АЭ.

### Список литературы

1. Недосека А. Я., Недосека С. А., Маркашова Л. И., Кушнарева О. С. (2016) О распознавании изменений структуры материалов при разрушении по данным акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 9–13.
2. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. (1988) *Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов*. Киев, АН УССР, препринт.
3. Скальський В. Р. (2003) Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 29–36.
4. Balderston H. L. (1971) The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena. *A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials*. Bal Harbour, 1971, 7-8 December, pp. 297–317.
5. Stone D. E., Dingwall P. F. (1977) Acoustic Emission parameters and their interpretation, *NDT international*, 10, 51–56.

6. Gillis P. P. (1971) Dislocation motions and acoustic emission. *A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials*. Bal Harbour, 7-8 December, pp. 20–29.
7. Tetelman A. S., Chow R. (1971) Acoustic emission testing and micro cracking processes. *Ibid.* pp. 30–40.
8. Недосека С. А., Богинич И. О. (1995) Применение аппаратуры «ЕМА» для оценки поврежденности стали 20 акустическим методом. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 66–69.
9. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Богинич И. О. (1995) Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении. *Проблемы прочности*, 7, 31–40.
10. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Богинич И. О., Недосека С. А. (1996) Комплексная оценка поврежденности материала при пластическом деформировании. *Там же*, 5, 23–30.
11. Векслер Е. Я., Замекула И. В., Толстов В. Ю., Семешко Е. В. (2010) Технология диагностирования и оценка остаточного ресурса паропроводов высокого давления тепловых электростанций по уровню микроповрежденности металла. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 23–31.
12. Векслер Е. Я., Заплотинский И. В., Замекула И. В., Толстов В. Ю. (2007) Техническое диагностирование трубной системы подогревателей высокого давления блоков мощностью 100...300 МВт в процессе длительной эксплуатации. *Там же*, 2, 17–20.
13. Стрижало В. О., Стасюк С. З. (2015) Експертна оцінка технічного стану технологічних трубопроводів з водневмістним середовищем. *Там же*, 4, 7–13.
14. Недосека С. А. (1998) Объектный подход к решению задач механики сплошной среды и прогнозированию состояния материалов. *Там же*, 1, 13–21.
15. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Недосека С. А. (2000) Моделирование процесса накопления повреждений в деформируемом материале по его акустическим свойствам. *Вестник севастьяпольского гос. ун-та*.
16. Лебедев А. А., Недосека А. Я., Чаусов Н. Г., Недосека С. А. (2001) Оценка поврежденности металла действующих газопроводов методом АЭ-сканирования. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 8–12.
17. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л., Недосека С. А. (2003) Контроль текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и результаты. *Проблемы прочности*, 2, 29–36.
18. Лебедев А. А., Недосека С. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. (2003) Оценка состояния металла труб после длительной эксплуатации в системе магистральных газопроводов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, С. 3–8.
19. Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Пилипенко А. П. (2004) Комплексная оценка поврежденности пластичных материалов при различных режимах нагружения. *Там же*, 3, 16–21.
20. Недосека С. А. (2007) Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии. *Там же*, 2, 3–9.
21. Недосека С. А. (2008) Оценка накопления повреждений и прогноз разрушения по данным АЭ. *Материалы междунар. конф. «Сварка и родственные технологии – в третьем тысячелетии»*, 24–26 ноября 2008 г. Ин-т электро-сварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
22. Недосека С. А., Недосека А. Я. (2005) Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 20–26.
23. Недосека А. Я., Недосека С. А., Яременко М. А. и др. (2013) Программное обеспечение систем АЭ диагностики ЕМА-3.9. *Там же*, 3, 16–22.

### References

1. Nedoseka A. Ya, Nedoseka S. A., Markashova L. I., et al. (2016) On identification of structural changes in materials at fracture by acoustic emission data. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 9-13 [in Russian].

2. Lebedev, A.A., Chausov, N.G. (1988) *Express-method of evaluation of crack resistance of ductile materials*. Kiev, AN Ukr. SSR [in Russian].
3. Skalsky, V. R. (2003) Evaluation of accumulation of volume damage of solids by acoustic emission signals. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 29-36 [in Ukrainian].
4. Balderston, H.L. (1971) The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena. In: *Proc. of Symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials* (Bal Harbour, 1971, 7-8 December), 297-317.
5. Stone, D.E., Dingwall, P.F. (1977) Acoustic emission parameters and their interpretation. *NDT Internat.*, **10**, 51-56.
6. Gillis, P.P. (1971) Dislocation motions and acoustic emission. In: *Proc. of Symposium presented at the Committee Week American Society for Testing and Materials* (Bal Harbour, 1971, 7-8 December), pp. 20-29.
7. Tetelman, A.S., Chow, R. (1971) Acoustic emission testing and microcracking processes. *Ibid.*, 30-40.
8. Nedoseka, S.A., Boginich, I.O. (1995) Application of EMA systems for evaluation of damage of steel 20 by acoustic method. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 66-69 [in Russian].
9. Lebedev, A.A., Chausov, N.G., Nedoseka, S.A. et al. (1995) Model of damage accumulation in metallic materials under static tension. *Problemy Prochnosti*, **7**, 31-40 [in Russian].
10. Lebedev, A.A., Chausov, N.G., Boginich, I.O. et al. (1996) Complex evaluation of damage of material at plastic deformation. *Ibid.*, **5**, 23-30 [in Russian].
11. Veksler, E.Ya., Zamekula, I.V., Tolstov, V.Yu. et al. (2010) Technology of diagnostics and assessment of residual life of high-pressure steam pipelines of thermal power plants by the level of metal microdamage. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 23-31 [in Russian].
12. Veksler, E.Ya., Zaplotinsky, I.V., Zamekula, I.V. et al. (2007) Technical diagnostics of pipe system of high pressure heaters of reactors of 100-300 MW during long-term operation. *Ibid.*, **2**, 17-20 [in Russian].
13. Strizhalo, V.O., Stasyuk, S.Z. (2015) Expert evaluation of technical condition of process piping with hydrogen-containing media. *Ibid.*, **4**, 7-13 [in Ukrainian].
14. Nedoseka, S.A. (1998) Object approach to solution of the problems of discontinuous media mechanics and prediction of state of materials. *Ibid.*, **1**, 13-21 [in Russian].
15. Lebedev, A.A., Chausov, N.G., Nedoseka, S.A. et al. (2000) Modeling of the process of damage accumulation in deformable material by its acoustic properties. *Vestnik Sevastopolskogo Gos. Universiteta* [in Russian].
16. Lebedev, A.A., Nedoseka, A.Ya., Chausov, N.G., et al. (2001) Evaluation of metal damage of operational gas pipelines by AE scanning. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 8-12 [in Russian].
17. Lebedev, A.A., Muzyka, N.R., Volchek, N.L. (2003) Control of current state of pipe metal of operational gas pipelines. Method of investigation and results. *Problemy Prochnosti*, **2**, 29-36 [in Russian].
18. Lebedev, A.A., Nedoseka, S.A., Muzyka, N.R. et al. (2003) Evaluation of pipe metal state after long-term operation in a system of main gas pipelines. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 3-8 [in Russian].
19. Chausov, N.G., Nedoseka, S.A., Pilipenko, A.P. (2004) Complex evaluation of damage of plastic materials under different loading modes. *Ibid.*, **3**, 16-21 [in Russian].
20. Nedoseka, S.A. (2007) Forecasting the fracture by the data of acoustic emission. *Ibid.*, **2**, 3-9 [in Russian].
21. Nedoseka, S.A. (2008) Evaluation of damage accumulation and prediction of fracture by AE data. In: *Proc. of Int. Conf. on Welding and Related Technologies into the Third Millennium* (24-26 November 2008, Kiev, Ukraine), PWI.
22. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya. (2005) Diagnostic systems of EMA series. Main principles and architectural features

(Review). *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 20-26 [in Russian].

23. Nedoseka, A. Ya., Nedoseka, S. A., Yaremenko, M. A. et al. (2013) Software of AE diagnostic systems EMA-3.9. *Ibid.*, **3**, 16-22 [in Russian].

С. А. НЕДОСЕКА, А. Я. НЕДОСЕКА, Л. І. МАРКАШОВА,  
О. С. КУШНАРЬОВА

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03680, м. Київ-150, вул.  
Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

ПРО НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ В МАТЕРІАЛАХ  
ПРИ РУЙНУВАННІ

У статті розглянуті закономірності виникнення і розвитку пошкоджень в матеріалах при їх деформації. Як приклад, докладно розглянуто зміну структури при розтягуванні зразка зі сталі 12Х1МФ. Показано, що процес накопичення пошкоджень починається з виникнення пластичних деформацій, що стимулюють інтенсивний рух і об'єднання дислокацій. Далі утворюються мікронесплошності, поступово перетворюються в пори, які розвиваються і об'єднуються в більш крупні утворення. Процес появи пошкоджень досить добре реєструється шляхом застосування існуючої технології на основі методу акустичної емісії. Це дозволяє встановити початок утворення ушкоджень і їх розвиток аж до руйнування. Аналітична частина технології дає можливість побудувати модель накопичення пошкоджень і руйнування. Бібліогр. 20, табл. 1, рис. 13.

Ключові слова: акустична емісія, пластична деформація, структура, пори, накопичення пошкоджень

S. A. NEDOSEKA, A. Ya. NEDOSEKA, L. I. MARKASHOVA,  
O. S. KUSHNAREVA

E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11,  
Kazimir Malevich str., 03150, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

ACCUMULATION OF DAMAGES IN MATERIALS DURING  
FRACTURE

The article deals with regularities of occurrence and propagation of damages in materials during their deformation. As an example, the change in the structure of the specimen of steel 12Kh1MF under tension is considered in detail. It is shown that the process of accumulation of damages begins with occurrence of plastic deformations, stimulating an intensive movement and clustering of dislocations. Further, micro-discontinuities are formed, gradually transforming into pores, which propagate and join into larger formations. The process of damage appearance is well enough registered by applying the existing technology based on the acoustic emission method. This allows establishing the beginning of damages formation and their propagation up to the fracture. The analytical part of the technology makes it possible to plot the model of accumulation of damages and fracture. 20 – Ref., 1 – Table, 13 – Fig.

Key words: acoustic emission, plastic deformation, structure, pores, accumulation of damages

Поступила в редакцію  
06.04.2017