



УДК 621.19.44

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛОВ С ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАРАБОТКОЙ

С. А. НЕДОСЕКА, А. Я. НЕДОСЕКА

*Обобщены результаты испытания различных материалов с целью получения аналитической зависимости для расчета остаточного ресурса металла трубопроводов с различной эксплуатационной наработкой. Найденная зависимость получена при помощи обобщенного критерия  $\Delta W_n$ , основанного на отношении структурно-чувствительных параметров, характеризующих изменение работоспособности материала конструкции вследствие накопления эксплуатационных повреждений.*

*Results of testing various materials to derive an analytical dependence for calculation of residual life of pipeline metal with different operating lives are generalized. The derived dependence was obtained using generalized  $\Delta W_n$  criterion, based on the relationship of structurally-sensitive parameters characterizing the change of structure material performance as a result of operating damage accumulation.*

В процессе длительной эксплуатации материалы, как правило, претерпевают изменение ряда физических и механических свойств. Если речь идет о промышленных конструкциях, то характерным является влияние в процессе эксплуатации на эти свойства множества различных факторов, природа которых, а тем более количественные показатели, чаще всего не полностью известны. К указанным факторам можно отнести режимы и историю нагружения, сезонные изменения свойств материала, коррозию, внештатные перегрузки и ряд других. Результатом действия упомянутых факторов является некоторое, отличное от первоначального, состояние материала, которое далее будем называть поврежденным.

В качестве примеров изменения материала вследствие накопленных в процессе эксплуатации повреждений на рис. 1 показан элемент трубы разрушенного участка газопровода, проработавшего более 35 лет под землей, на рис. 2 представлены образцы материалов труб газопроводов, прошедшие испытания на ударную вязкость. Исследуя изменение состояния материала при помощи различных инструментальных методов, получают некоторые числовые характеристики, которым следует дать определенное объяснение. Одним из возможных подходов для такого объяснения может быть трактовка указанных числовых характеристик как формального показателя интегральной поврежденности материала. Исследования кинетики накопления повреждений в условиях равновесного деформирования, выполненные А. А. Лебедевым и Н. Г. Чаусовым [13], показывают, что

процесс разрушения начинается с образования пор, появившихся при слиянии дислокаций на границах зерен.\* На рис. 3 поэтапно представлен



Рис. 1. Элемент трубы после длительной эксплуатации (а) и поверхность разрушения (б)

\* Данные результаты подтверждаются работами J. R. Rice, D. M. Tracey [10], А. Герсоном [11] и др. [17–25].



Рис. 2. Образцы после испытаний на ударную вязкость в зависимости от времени наработки (стрелка — деградация материала с течением времени)

процесс накопления повреждений и разрушения стали 12Х2МФА при статическом растяжении [13]. Показано, что с увеличением деформации количество пор растёт. В конечном счете, в результате их слияния образуется магистральная трещина, приводящая к разрушению.

Проведенный анализ состояния материала разрушившихся изделий, комплексное исследование кинетики накопления повреждений при разрушении образцов из исходного материала и материала, находившегося длительное время в эксплуатации, позволили предложить методику прогнозирования разрушающих нагрузок и остаточного ресурса этих материалов на основе оценки постепенного накопления повреждений в процессе их работы под нагрузкой. В случае использования

единого способа оценки поврежденности при обработке результатов, полученных различными методами, появляется возможность выразить поврежденность в одинаковых безразмерных величинах и сопоставить их.

Вопрос оценки остаточного ресурса для материалов с эксплуатационной наработкой является весьма актуальным. Для материалов, подвергающихся циклическому нагружению с известными параметрами цикла, расчет остаточного ресурса не представляет сложности и широко представлен в литературе [2]. Для прочих материалов, особенно подвергнувшихся действию множества трудно учитываемых факторов в процессе эксплуатации, требуется определение параметров, которые имеют устойчивую закономерность изменения во времени и могут служить для определения их остаточного ресурса. Одним из таких параметров может служить интегральный показатель поврежденности материала, определенный по результатам испытаний образцов с известной эксплуатационной наработкой.

В ранее опубликованных работах [3, 4] был предложен критерий оценки поврежденности материалов по результатам АЭ сканирования. АЭ сканирование представляет собой интегральный метод оценки состояния материала, во многом подобный УЗК, отличающийся тем, что для сканирования используют АЭ аппаратуру с широкополосными датчиками, а анализ сигналов на выходе проводят аналогично анализу АЭ при стандартных АЭ испытаниях. Исходные данные были получены на образцах из сталей 17ГС, 17Г1С, стали 20, 09Г2С и ее чешского аналога с длительной наработкой,

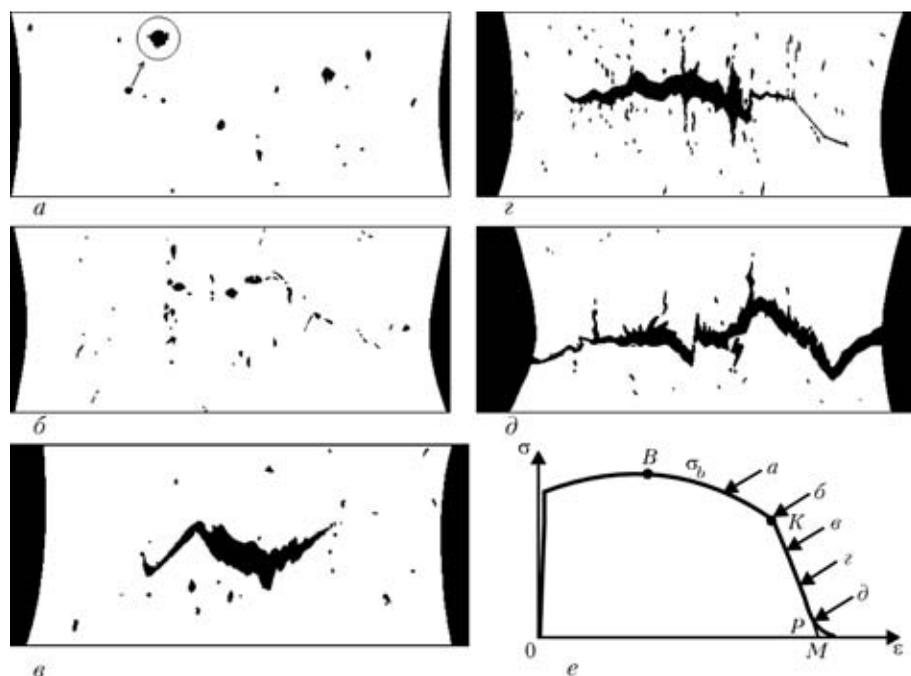


Рис. 3. Накопление повреждений в стали 15Х2МФА (X20) на различных стадиях деформирования образца при растяжении: а – д — стадии деформирования на ниспадающем участке кривой  $\sigma$ - $\epsilon$  (e) [13]



представляющих трубопроводы из различных регионов Украины, и на образцах из этих же материалов в исходном состоянии — из аварийного запаса. Критерий оценки опасности накопленных в металле конструкций повреждений представлен в виде  $\Delta W_{cp} = 1 - v_{повр}/v_{исх}$ , где в качестве акустического параметра, позволяющего оценить степень поврежденности материала, служит характеристика, имеющая смысл скорости нарастания сигнала до максимума  $v = A/R$ , где  $A$  — амплитуда выходного сигнала;  $R$  — время его нарастания до максимума для исходного («исх») и поврежденного («повр») материала. Показано, что если скорость  $v$  для наработанного материала меньше, чем для исходного, то в материале возникли необратимые повреждения, связанные с остаточным изменением объема. Причем, если подобные соотношения наблюдаются по трем направлениям сканирования, то это служит индикатором наиболее опасного состояния материала, поскольку в нем интенсивно развивается объемная поврежденность.

Данные, характеризующие механические свойства металла исследованных труб в исходном состоянии, свидетельствуют об их сравнительно небольшом различии, что объясняется прежде всего единой природой и близким химическим составом сталей. Это дало основание формально рассматривать экспериментальные данные, полученные на разных трубопроводах после различной длительности их эксплуатации, как результаты исследования состояния металла трубы из низколегированной стали в составе некоего виртуального газопровода на разных стадиях эксплуатации.

Предложенный подход требует наличия относительно одинаковых свойств металла труб в исходном состоянии, относительно одинаковых условий механического нагружения труб и относительно одинаковых параметров температурно-химических воздействий. Такие условия для реальных трубопроводов, в отличие от рассматриваемого виртуального, в определенной степе-

ни могут не соблюдаться, что вполне объясняет отклонения экспериментальных результатов от их среднестатистических значений. Несмотря на перечисленные ограничения, такой подход позволяет количественно описать процесс накопления повреждений в металле труб.

Сопоставление результатов определения поврежденности методами АЭ сканирования и рассеяния твердости [4, 5] показало их хорошую корреляцию. Так, для наружных слоев материала труб коэффициент корреляции кривых поврежденности составил 89,86 %, а для внутренних — 90,72 %.

Полученные результаты позволили предположить, что и данные других инструментальных методов могут быть успешно использованы при определении поврежденности исследованных материалов. Учитывая, что для этих материалов были проведены также АЭ испытания при статическом нагружении, определение остаточного объема пустот взвешиванием в жидкости и измерение ударной вязкости, в данной работе предпринята попытка обобщить полученные данные путем использования обобщенного формального критерия поврежденности.

Формальный критерий поврежденности сформулируем как  $\Delta W_{п} = 1 - \Pi_{повр}/\Pi_{исх}$ , где  $\Pi$  — параметр, отражающий изменение некоторого свойства материала в процессе накопления повреждений.

Для результатов АЭ испытаний (рис. 4) характерным было отличие АЭ картины как для испытаний образцов из различных материалов, так и для испытаний образцов, вырезанных из соседних участков, в связи с чем при расчете  $\Delta W_{АЭ}$  для каждой группы испытанных материалов (три образца в исходном состоянии и три после эксплуатационной наработки) использовали наиболее структурно-чувствительный параметр  $\Pi_{АЭ}$ , представляющий собой одну из трех линейных комбинаций:  $\Sigma A \nabla(\ln K)$ ;  $\Sigma A \nabla(K)$ ;  $K \nabla(K)$ . Здесь  $\Sigma A$  — сумма амплитуд АЭ событий;  $K$  — коэф-

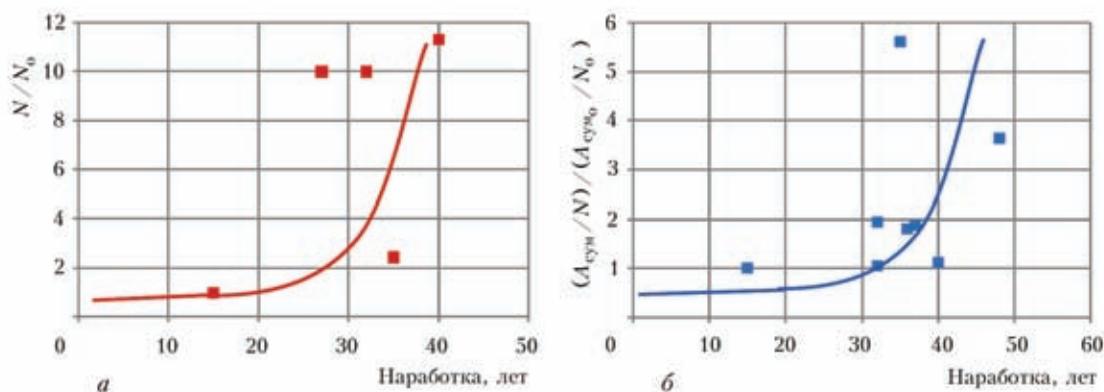


Рис. 4. Изменение параметров АЭ вследствие наработки: а — число событий АЭ ( $N$ ) в материалах с множественными рассеянными повреждениями; б — отношения суммы амплитуд АЭ к числу событий ( $A_{сум}/N$ ) в охрупчивающихся материалах

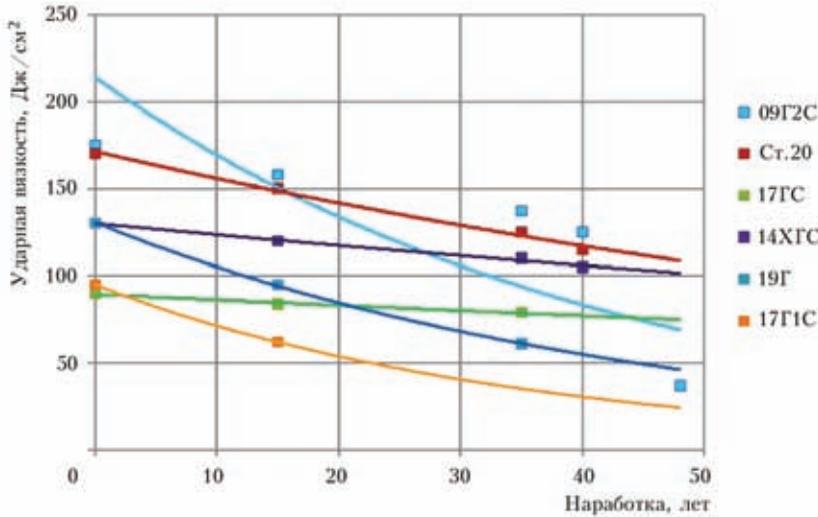


Рис. 5. Изменение ударной вязкости исследованных материалов вследствие наработки

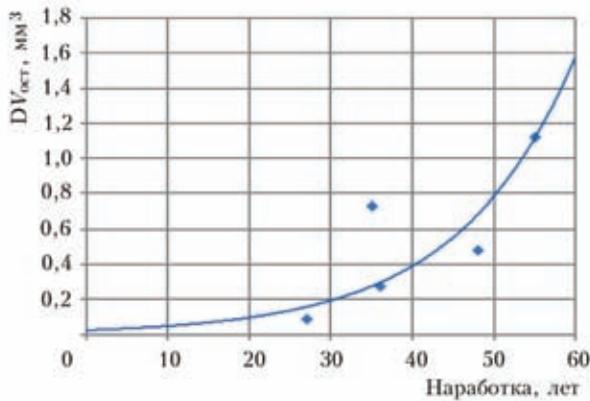


Рис. 6. Изменение остаточного объема вследствие наработки

коэффициент коррекции результатов расчета по числу событий  $N$  ( $K = aN^m$ ). Величины  $a$  и  $m$  представляют собой константы материала, определяемые экспериментально при испытании образцов. Расчет поврежденности  $\Delta W_{АЭ}$  выполняли для трех перечисленных параметров по приведенным формулам, затем выбирали наибольшее значение.

При оценке  $\Delta W_{ув}$  поврежденности по изменению ударной вязкости (рис. 5) в качестве исходного значения принимали ее величину для материала в состоянии поставки, в качестве поврежденного — значение после эксплуатационной наработки.

Для результатов взвешивания малых проб в жидкости (рис. 6) [3, 4] критерий  $\Delta W_p$  был сформулирован как  $\Delta W_p = 1 - (V_{ост.макс} - V_{ост})/V_{ост.макс}$ , где  $V_{ост}$  — текущий объем вновь образовавшихся пустот;  $V_{ост.макс}$  — объем пустот в максимально поврежденном материале (определен экспериментально на пробах материала из разрушенного трубопровода после аварии). К сожалению, измере-

ния ударной вязкости и взвешивание проб в жидкости выполнено не для всех испытанных материалов, поэтому наиболее полно далее представлены результаты оценки поврежденности по данным АЭ испытаний и АЭ сканирования.

Сведем результаты оценки поврежденности по данным различных методов в таблицу, куда для полноты поместим также данные, полученные в Институте проблем прочности НАН Украины по расчету поврежденности  $\Delta W_{LM}$  методом LM-твердости. Дублирующие данные по годам в табл. 1 относятся к различным трубопроводам с одинаковой наработкой.

Очевидно, что приведенные в табл. 1 данные имеют достаточно большой статистический разброс. Тем не менее, если зависимость поврежденности от наработки, полученную каждым методом, аппроксимировать экспоненциальной зависимостью и построить соответствующую линию тренда, то полученные в результате кривые не только имеют общую тенденцию изменения, но и расположены достаточно близко (рис. 7).

Следует отметить, что наилучшее совпадение кривой  $\Delta W_p$  с остальными может быть объяснено малым набором имеющихся статистических данных. Однако сравнение параметра  $\Delta W_p$  с данными других методов представляется оправданным по той причине, что он напрямую отражает объем накопленных в материале повреждений и связан с деформацией

Таблица 1. Поврежденность исследованных материалов, определенная различными методами

Наработка, лет	$\Delta W_{АЭ}$	$\Delta W_{СКАН}$	$\Delta W_{LM}$	$\Delta W_{ув}$	$\Delta W_p$
15	0,11	0,24	0,23	0,16	—
27	0,11	0,41	0,35	—	0,05
32	0,12	0,05	0,41	—	—
32	0,48	0,51	0,41	—	—
32	0,56	0,6	0,41	—	—
32	0,71	0,73	0,41	—	—
33	0,48	0,21	0,43	—	—
35	0,59	0,41	0,46	0,26	0,17
35	0,82	0,89	0,46	0,53	0,46
40	0,71	0,68	0,54	0,28	—
41	0,91	0,73	0,55	0,32	—
48	0,31	0,52	0,75	0,56	0,3
48	0,72	0,64	0,75	0,79	—
55	0,60	0,31	0,96	—	0,69

\* В прямоугольных декартовых координатах линейный оператор  $\nabla$  определяется формулой  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k$ .

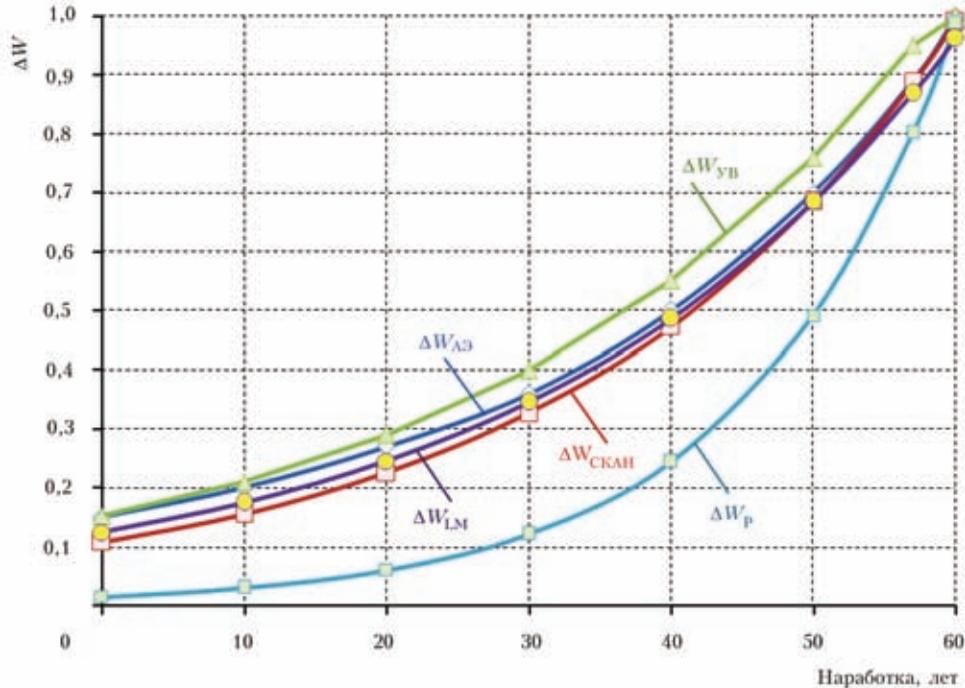


Рис. 7. Кривые зависимости поврежденности от эксплуатационной наработки, полученные различными методами (в обозначениях критерия  $\Delta W$ : АЭ — по данным акустической эмиссии; УВ — ударной вязкости; СКАН — сканирования; Р — взвешивания малых проб; LM — специального критерия твердости)

разрыхления [4]. Хотя при дальнейшей обработке и обобщении полученных результатов поврежденность, определенную путем взвешивания проб в жидкости, не использовали, следует отметить, что коэффициент корреляции  $\Delta W_P$  со среднеарифметическим значением поврежденности  $\Delta W_{cp}$ , определенной остальными методами, составляет 0,98.

Ранее было показано [3, 4, 7–9], что изменения акустических сигналов при прохождении через материал с накопленными повреждениями коррелируют с объемом и расположением в нем мелких пор. Учитывая корреляцию между значением поврежденности по данным различных методов, а также то, что для исследованных сталей характерен вязкий механизм разрушения, можно предположить, что изменения всех рассмотренных в работе структурно-чувствительных параметров исследованных материалов связаны именно с процессом разрыхления, что соответствует также известным теоретическим разработкам [10, 11].

Среднеарифметическое значение поврежденности  $\Delta W_{cp}$  для четырех остальных методов может быть описано уравнением  $\Delta W_{cp} = ae^{bt}$ , где  $t$  — срок эксплуатационной наработки;  $a = 0,1352$ ;  $b = 0,0333$  (рис. 8).

Параметром поврежденности  $\Delta W_{cp}$  можно воспользоваться для определения остаточного ресурса испытанных материалов, причем по данным любого из четырех инструментальных методов. Для этого построим номограмму в координатах «поврежденность—остаточный ресурс», воспользовавшись уравнением кривой

$\Delta W_{cp}$  и учитывая, что в точке  $\Delta W_{cp} = 1$  остаточный ресурс должен принимать значение 0.

Расположив данные на номограмме и экстраполировав ее до значения поврежденности  $\Delta W_{cp} = 0$ , опишем их логарифмической зависимостью. Уравнение соответствующей линии тренда примет вид  $t_{ост} = n \ln(\Delta W_{cp}) + m$ , где  $t_{ост}$  — остаточный ресурс;  $n = -30,03$ ;  $m = -0,115$  (рис. 9). Полученное уравнение может быть использовано для определения остаточного ресурса исследованных материалов по известной поврежденности.

Естественно, полученная номограмма построена на основе обработки и осреднения большого массива данных, имеющих статистический разброс. В связи с этим остаточный ресурс также

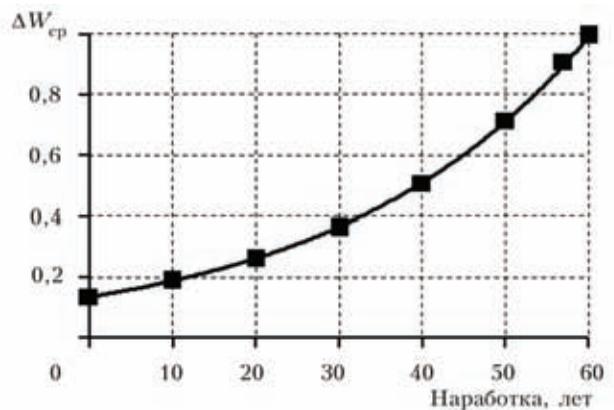


Рис. 8. Осредненная кривая поврежденности  $\Delta W_{cp}$  по данным четырех методов

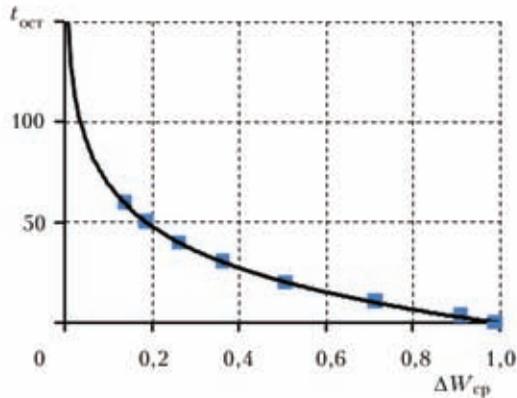


Рис. 9. Номограмма для определения остаточного ресурса по известной поврежденности

будет определен с некоторой погрешностью. Тем не менее, предложенная методика позволяет обобщать результаты экспериментальных данных, полученных различными методами. Для того, чтобы убедиться в ее работоспособности, сравним остаточный ресурс, полученный таким образом для результатов АЭ испытаний, АЭ сканирования, измерения ударной вязкости и рассеяния твердости.

Построим диаграммы, представляющие сравнительный анализ остаточного ресурса для некоторых пар наборов экспериментальных данных.

К каждому набору данных добавим дополнительный элемент, соответствующий нулевой поврежденности и «бесконечному» остаточному ресурсу. Учитывая, что номограмма описывается логарифмической зависимостью, для которой подстановка нулевого аргумента недопустима, вместо него использовали очень малое значение

$\Delta W_{ср} = 0,0001$ . При этом максимальный остаточный ресурс, соответствующий нулевой поврежденности, составляет 276,4 года. Реальные экспериментальные данные, на основе которых рассчитывали остаточный ресурс, имеют ненулевую поврежденность, в связи с чем на представленных диаграммах ограничили интервал времени от 0 до 100 лет.

С учетом изложенного выше, на диаграммы были нанесены также линии тренда, имеющие вид прямых, описываемых уравнениями вида  $t_1 = kt_2$ , где  $t_1, t_2$  — сравниваемые значения остаточного ресурса, полученные методами 1 и 2 соответственно. Для наиболее показательных сравниваемых наборов данных — остаточного ресурса, определенного по результатам АЭ испытаний, АЭ сканирования и измерений ударной вязкости, уравнения тренда имеют следующий вид:  $t_{скан} = 0,97t_{АЭ}$ ;  $t_{ув} = 0,99t_{АЭ}$ ;  $t_{ув} = 1,016t_{скан}$ .

Приведенные данные иллюстрируются диаграммами на рис. 10–12. Видно, что, несмотря на имеющийся разброс результатов конкретных отдельных испытаний, общие количественные и качественные закономерности присутствуют во всех рассмотренных случаях. В то же время следует отметить, что наилучшие результаты показали данные, полученные с помощью АЭ и АЭ сканирования.

С помощью предложенной методики можно уточнить результаты ранее проведенной оценки остаточного ресурса исследуемых материалов. Упомянутая оценка также базировалась на изменении некоторых характеристик поврежденного материала по сравнению с исходными. Однако поскольку имелись результаты

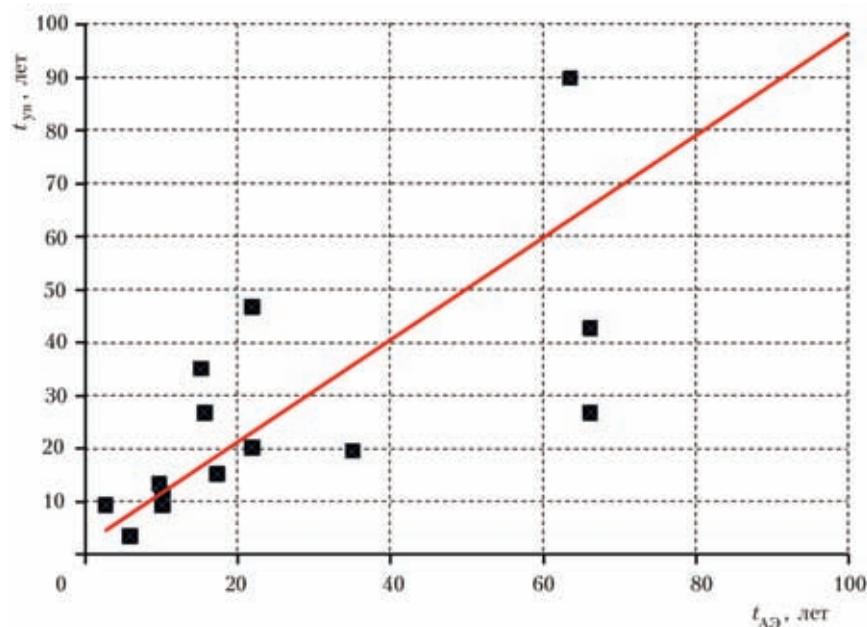


Рис. 10. Сопоставление остаточного ресурса, определенного по номограмме на основе данных АЭ и АЭ сканирования

испытаний каждого из материалов только в двух состояниях — неповрежденного и с определенным сроком наработки — для определения времени исчерпания несущей способности и соответствующего остаточного ресурса строили прямую линию, точка пересечения которой с осью времени определяла момент предельного повреждения материала. Надо полагать, что такая зависимость должна быть более сложной и, как показали проведенные исследования и расчеты, наиболее правдоподобно ее описывает экспоненциальная кривая.

В частности, в работе [7] величина остаточного ресурса материала с наработкой 48 лет, определенного авторами по та-

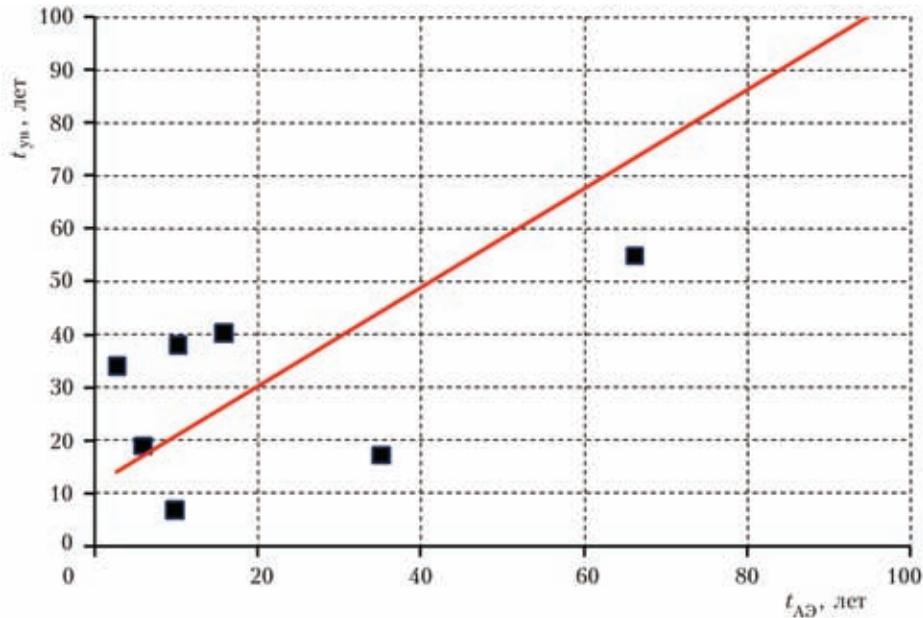


Рис. 11. Сопоставление остаточного ресурса, определенного по номограмме на основе данных АЭ и ударной вязкости

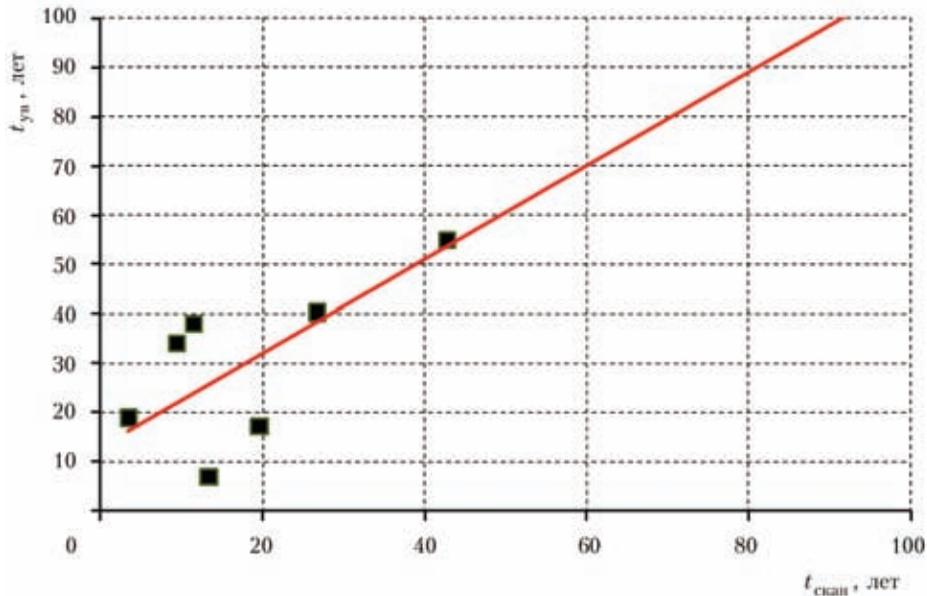


Рис. 12. Сопоставление остаточного ресурса, определенного по номограмме на основе данных АЭ сканирования и ударной вязкости

кой методике, составила по данным АЭ два года. В качестве структурно-чувствительной АЭ характеристики в данном исследовании было использовано число событий АЭ. Проведем сравнительный анализ полученных данных, рассчитав остаточный ресурс при помощи уравнения, представленного номограммой на рис. 9.

Поврежденность материала:

$$\Delta W_{АЭ} = 1 - N_{повр}/N_{исх} = 1 - 64/139 = 0,94.$$

Остаточный ресурс, определенный при помощи предложенной номограммы, составляет  $t_{ост} = -30,03 \ln(0,94) - 0,115 = 1,74$  года.

Высокая поврежденность материала подтверждается и АЭ сканированием. При первоначаль-

ных значениях амплитуды сканирующего сигнала 499 мВ и длительности 150 мкс в поврежденном материале эти параметры изменились до 135 мВ и 420 мкс соответственно. Поврежденность материала  $\Delta W_{скан}$  составляет при этом 0,77, остаточный ресурс  $t_{ост} = -30,03 \ln(0,77) - 0,115 = 7,7$  года.

Близки результаты и при определении поврежденности методом ударной вязкости. Для основного металла ударная вязкость составляет 37,5 Дж/см<sup>2</sup>. Поврежденность  $\Delta W_{скан} = 0,86$ , остаточный ресурс, определенный при помощи предложенной номограммы,  $t_{ост} = 4,4$  года.

Учитывая, что исследованные образцы из стали 09Г2С были вырезаны из участка трубопро-



вода, на котором возникла трещина и произошла авария, рассчитанный ресурс материала вполне соответствует действительности. Следует отметить, что погрешность измерений, проведенных различными методами, может отличаться, и для ее устранения необходим больший объем экспериментальных данных. Тем не менее, использование номограммы для оценки остаточного ресурса по известной поврежденности дает широкие возможности, например, при сравнительной оценке остаточного ресурса различных материалов. Естественно, полученная логарифмическая зависимость справедлива только для проведенной серии экспериментов, и дополнительные исследования могут внести в нее определенные коррективы. Тем не менее, в настоящей работе предложен и формализован обобщенный подход к оценке состояния материала на основании одинаковой трактовки изменений состояния материала в процессе эксплуатации, независимо от того, каким методом эти изменения были зарегистрированы.

## Выводы

1. Количественная оценка поврежденности исследованных материалов труб, проведенная по данным пяти различных методов, показывает, что кривая накопления повреждений может быть описана функциональной зависимостью (рис. 8).

2. Используя полученное уравнение для определения  $\Delta W_{\text{ср}}$ , построена номограмма для определения остаточного ресурса (рис. 9).

3. Представленный в работе формальный критерий поврежденности позволяет сопоставить полученные разными методами результаты оценки накопленных при эксплуатации повреждений.

4. Полученные функциональные зависимости справедливы для исследованных материалов в определенных условиях эксплуатации. Для определения их пригодности к оценке других материалов или при других условиях требуются дополнительные исследования.

1. *About experience of Ukraine in the solution of problems of safety control exploitation of welded structures and preservation of an environment* / В. Е. Патон, А. Я. Недосека, Л. М. Лобанов, С. А. Недосека // The Report № IIW DOC XI-735-00 on commission XI «Intern. Inst. of Welding», July 9-14, 2000, Florence, Italy.
2. *Соппротивление* материалов деформированию и разрушению. Справ. пос. / В. Т. Трошенко, А. Я. Красовский, В. В. Покровский и др. — Киев: Наук. думка, 1993.
3. *Оценка* поврежденности металла действующих газопроводов методом АЭ-сканирования / А. А. Лебедев, А. Я. Недосека, Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 1. — С. 8-12.
4. *Модель* накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А. А. Лебедев, Н.

- Г. Чаусов, С. А. Недосека, И. О. Богинич // Пробл. прочности. — 1995. — № 7. — С. 31-40.
5. *Контроль* текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и результаты / А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек, С. А. Недосека // Там же. — 2003. — № 2. — С. 29-36.
6. *Оценка* состояния металла труб после длительной эксплуатации в системе магистральных газопроводов / А. А. Лебедев, С. А. Недосека, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 2. — С. 3-8.
7. *Недосека С. А.* Причины возникновения повреждений и остаточный ресурс материала аварийного участка трубопровода Дашава-Киев // Там же. — 1998. — № 1. — С. 38-50.
8. *Комплексная* оценка поврежденности материала при пластическом деформировании / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, И. О. Богинич, С. А. Недосека // Пробл. прочности. — 1996. — № 5. — С. 23-30.
9. *Недосека А. Я., Недосека С. А.* Акустическая эмиссия и ресурс конструкций // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 3-11.
10. *Rice J. R., Tracey D. M.* On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields // J. Mech. and Phys. Solids. — 1969. — 17, № 3. — P. 201-207.
11. *Гэрсон А.* Континуальная теория вязкого разрушения, обусловленного образованием и ростом пор. — Ч.1. Критерий текучести и законы течения для пористой пластической среды // Теор. основы инж. расчетов. — 1977. — № 1. — С. 1-17.
12. *Скальський В. Р.* Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 4. — С. 29-36.
13. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов. — Киев: АН УССР, препринт, 1988. — 43 с.
14. *Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Партон В. З.* Основы механики разрушения материалов / Механика разрушения и прочность материалов. Справ. пос. в 4-х т. // Под общ. ред. акад. НАН Украины В.В. Панасюка. — Т.1. — Киев: Наук. думка, 1988. — 488 с.
15. *Работнов Ю. Н.* Влияние концентрации напряжений на длительную прочность // Изв. АН СССР. Сер.: Мех. твердого тела. — 1967. — № 3. — С. 36-41.
16. *Rabotnov Y. N.* Creep Rapture // Proc. 12th Int. Congress of Appl. Mech., Stanford Univ. — 1968. — Berlin: Springer, 1969. — P. 342-349.
17. *Волков С. Д.* К теории макротрещин. Сообщ. 2. Модели класса Мт. // Пробл. прочности. — 1981. — № 3. — С. 38-42.
18. *Волков С. Д., Дубровина Г. И., Соковнин Ю. П.* О краевой задаче механики разрушения // Там же. — 1978. — № 1. — С. 3-7.
19. *Волков С. Д.* Проблема прочности и механика разрушения // Там же. — 1978. — № 7. — С. 3-10.
20. *Волков С. Д., Дубровина Г. И., Соковнин Ю. П.* Устойчивость сопротивления материала в механике разрушения // Там же. — 1978. — № 6. — С. 65-69.
21. *Мак-Клинтон Ф., Аргон А.* Деформация и разрушение материалов. — М.: Мир, 1970. — 443 с.
22. *Hom C. L., Mc. Meeking R. M.* Three-dimensional Void Growth before Blunting Crack Tip // J. Mech. Phys. Sol. — 1989. — 37, № 3. — P. 395-416.
23. *Murakami S.* Damage Mechanics. Continuum Mechanic Approach to Damage and Fracture of Materials // J. Soc. Mat. Sci. Japan. — 1982. — 31, № 340. — P. 1-13.
24. *Tvergard V.* Influence of Voids on Shear Band Instability Under Plane Strain Conditions // Int. J. Fract. — 1981. — 17, № 4. — P. 389-407.
25. *Broek D.* Some Contributions of Electron Fractography to the Theory of Fracture // Intern. Metallurgical Review. — 1974. — 19. — P. 135-182.