

УДК 669.112.227.342+539.4.015+620.172.242+620.179.17

ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ

А.М. Апасов

Юргинский технологический институт (филиал) ТПУ

E-mail: mchmyti@rambler.ru

Исследованы сигналы акустической эмиссии при испытании на одноосное растяжение плоских образцов основного металла, а также образцов со сварным стыковым бездефектным швом в поперечном направлении и с технологическими дефектами: непроварами, подрезами, порами, продольными и поперечными трещинами. Установлено, что в качестве основного информативного параметра необходимо использовать суммарный счет акустической эмиссии. В качестве дополнительной информации целесообразно принимать суммарную величину амплитуд и сумму отдельных импульсов. Полученные данные свидетельствуют о возможности применения метода акустической эмиссии для регистрации сигналов от источников зарождающихся и развивающихся дефектов при штатных испытаниях изделий из высокопрочной стали.

Ключевые слова:

Сварное соединение, основной металл, изделие, статическое нагружение, плоский образец, сталь мартенситного класса, технологические дефекты, акустическая эмиссия, информативные параметры сигналов, амплитудное распределение.

Key words:

Welded joint, basic metal, factory-made, static loading, flat model, steel of martensite, technological defects, acoustic emission, principal parameter of signals, distribution of amplitudes.

Введение

Развитие науки и техники характеризуется постоянным стремлением к повышению надежности изделий, конструкций и сооружений [1]. Особенно это касается изделий, работающих в экстремальных условиях, при высоких статических, динамических и циклических нагрузках, а также при непосредственном контакте с взрывоопасными средами [2, 3].

В результате должны быть разработаны методы, созданы специальные системы технической диагностики и прогнозирования, которые помогут в реальном масштабе времени оценить критическую ситуацию и принять исчерпывающие меры для предотвращения аварии и, тем более, катастрофы в дальнейшем.

Методы исследования

Рассмотрим временной аспект прогнозирования разрушения материала изделия ответственного назначения, находящегося под воздействием внешней нагрузки.

При появлении источников зарождающейся микротрещины среда в их окрестности диссипирует (рассеивает) запасенную в ней упругую энергию в виде звукового, теплового или электромагнитного излучения. Каждая из этих форм диссипации энергии при образовании микротрещин может быть, в принципе, использована для прогнозирования процесса разрушения и его последующего исследования. В настоящее время широкое применение как метод неразрушающего контроля нашла акустическая эмиссия (АЭ), основанная на регистрации параметров сигналов упругой механической волны ультразвукового диапазона, возникающей в результате локальной динамической перестройки структуры металла диагностируемого изделия [4]. Однако для успешного использования

АЭ как уникального физического метода для исследования упругопластической деформации металлов необходимы детальное изучение этого явления и идентификация источников АЭ.

В качестве объекта исследования было выбрано изделие цилиндрической формы из листовой стали марки 03X11Н8М2Ф – ВД мартенситного класса, изготовленное способом аргодуговой сварки из нескольких обечаек, и работающее в условиях значительных внутренних газодинамических нагрузок импульсного характера.

Механические свойства основного и свариваемого металла исследовались на образцах стали 03X11Н8М2Ф – ВД, близкой по свойствам к стали 08X18Н10Т. Сталь 03X11Н8М2Ф – ВД обладает меньшей ударной вязкостью по сравнению со сталью 08X18Н10Т, в связи с чем образование в ней трещиноподобных дефектов более вероятно.

Для изучения возможности локации источников АЭ при испытании сварных образцов из мартенситной стали был решен ряд вопросов методического характера, в частности: определены схемы установки датчиков, способы их крепления, методика настройки каналов, созданы программы регистрации и обработки АЭ-информации, способы отстройки от помех испытательного оборудования.

Для регистрации, обработки и вывода полученной информации использовалась акустико-эмиссионная аппаратура, разработанная в Институте электросварки им. Е.О. Патона, и информационно-вычислительный комплекс СОУ – 2, представляющие собой систему технической диагностики СТД – 2 [5].

Настройка акустических каналов системы диагностики осуществлялась от датчика-имитатора стандартными импульсами на уровне 50 мВ. Методика настройки предусматривала выравнивание

принимаемого стандартного импульса – сигнала за счет идентичности приклейки четырех датчиков и регулировки усиления в каждом из четырех акустических каналов. В итоге добивались идентификации временных задержек и срабатывания розетки по вычислению координат места установки датчика-имитатора с погрешностью не более 10 % [5].

Эксперимент

Эксперименты проводились на плоских образцах из стали 03X11Н8М2Ф – ВД, изготовленных из листа способом механической обработки (рис. 1–3).

Указанные размеры активной части образца позволяли располагать одновременно четыре датчика АЭ, формируя две антенны по два датчика в каждой, работающие по линейной программе обнаружения источников АЭ с базой (расстояние между датчиками АЭ) соответственно 150 и 250 мм.

Образцы *первой* партии предназначались для изучения основного металла в состоянии поставки.

Образцы *второй* партии были изготовлены со сварным стыковым бездефектным швом в поперечном направлении образца. Они были предназначены для изучения разупрочняющего воздействия процесса сварки на металл образца, приводящего к перестройке структуры и, соответственно, к изменению его механических свойств и характеризующих их параметров сигналов АЭ.

Образцы *третьей* партии имели различные технологические дефекты в сварном стыковом шве: непровары, подрезы, поры, продольные и поперечные трещины. Они создают различную степень концентрации напряжений и имеют очень высокую вероятность снижения работоспособности сварных соединений узлов при их эксплуатации вплоть до разрушения.

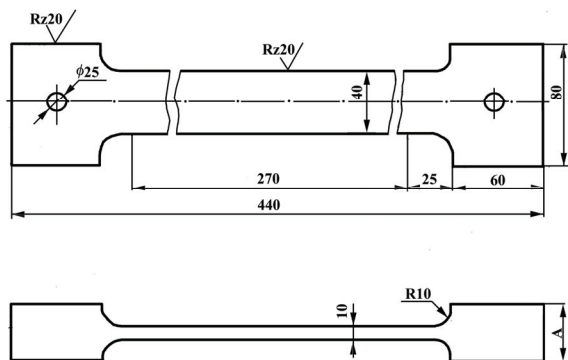


Рис. 1. Испытательный образец. Основной металл

Крепление датчиков АЭ к испытательным образцам осуществлялось приклеиванием их с помощью акустопрозрачного клея АК-45. Для нагружения образцов использовалась универсальная разрывная машина Р-20. Скорость нагружения поддерживалась постоянной – 0,1 мм/мин.

Неинформативные сигналы АЭ, характеризующие шумы и трение в области захватов машины,

отфильтровывались путем использования тефлоновых прокладок.

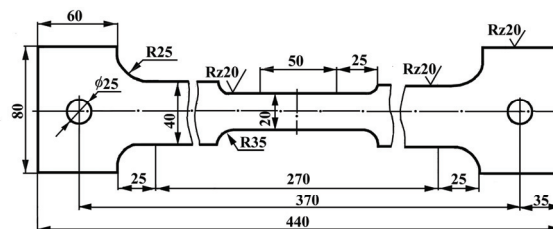


Рис. 2. Испытательный образец. Основной металл

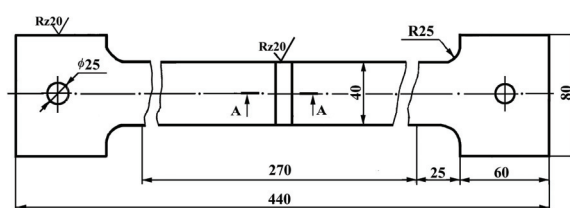


Рис. 3. Испытательный образец. Сварной шов. Размеры активной части: длина 300 мм, ширина 20 мм, толщина 10 мм

Одновременно с механическими испытаниями плоских образцов на растяжение проводилась регистрация информативных параметров сигналов АЭ с целью изучения процессов зарождения, формирования и развития дефектов в реальном масштабе времени в исследуемой области металла вплоть до его разрушения. Для этого был выделен частотный диапазон сигналов АЭ, используемый при исследовании информативных параметров сигналов АЭ, сопровождающих процесс сварки, в течение которого наблюдались распределения сигналов АЭ с аномально высокой амплитудой. Параллельно рассматривался вопрос о возможности локации источников сигналов АЭ.

Обсуждение результатов эксперимента и выбор информативных параметров сигналов акустической эмиссии

Для выбора информативных параметров по полученным в результате экспериментов данным построены графики (рис. 4–15), представляющие зависимость величины растягивающей нагрузки P , кг, суммарного счета акустической эмиссии N ,

суммарной величины амплитуд ΣA , мВ, суммы отдельных импульсов A на интервале $P=500$ кг в зависимости от времени нагружения образцов.

На рис. 4 представлено распределение параметров сигналов АЭ для исходных образцов первой партии с целью изучения характеристик основного металла в состоянии поставки. Максимальная величина нагрузки составила $P_{\max}=13900$ кг. Первые сигналы АЭ зарегистрированы при нагрузке $P=2500$ кг. При нагружении они имели вид отдельных импульсов с низкой активностью. На участке упрочнения активность несколько возрастает, хотя значения N для испытанных образцов этой серии расположились в интервале 42–90 импульсов. Характер распределения суммарной величины амплитуд внешне напоминает форму распределения N при нагружении материала. Из графика видно, что параметр ΣA начинает возрастать при приближении к участку упрочнения по зависимости, близкой к экспоненциальной.

Несколько иной характер распределения параметров сигналов АЭ наблюдается при испытании образцов с качественным сварным соединением (рис. 5). Первые сигналы АЭ зарегистрированы при величине нагрузки $P=2500...5000$ кг. Максимальная нагрузка достигает величины $P_{\max}=13100...14100$ кг. В упругой области при нагрузке примерно до $P=12000$ кг активность процесса генерации сигналов АЭ в зоне сварного шва незначительна, хотя и выше, чем для основного металла (рис. 4). Суммарный счет акустической эмиссии из контролируемой зоны при достижении максимальных нагрузок $N=107-222$ импульса, что значительно выше, чем для образцов основного металла. Суммарная величина амплитуд ΣA на всем участке нагружения так-

же выше у образцов со сварным соединением и составляет 68400 мВ против 648 мВ у основного металла. Это дополнительно свидетельствует о существенном различии их структур и свойств. Импульсы большой амплитуды возникают, как правило, перед разрушением, что можно объяснить процессами спонтанного зарождения, формирования и развития источников микротрещин в исследуемом металле.

Исследования процессов статического одноосного растяжения образцов с технологическими дефектами (рис. 6–15), которые являются эффективными концентраторами внутренних напряжений, формирующихся в процессе нагружения образца, позволили установить совершенно другие закономерности изменения параметров сигналов АЭ. В табл. 1 приведены основные данные и параметры сигналов АЭ, полученные при испытании сварного бездефектного и образцов с технологическими дефектами. Следует помнить, что **номер образца в таблице** соответствует **номеру рисунка**.

При статическом растяжении плоского сварного образца с непроваром (рис. 6) наблюдается постепенное возрастание суммарного счета акустической эмиссии N , и на момент времени $t=5400$ с $N=92$ импульсам, в то время как у бездефектного сварного шва эта сумма равна 45 импульсам (рис. 5). Разрушение образца, наступившее при одинаковом в обоих случаях нагружении $P=13850$ кг, привело к увеличению суммарного счета АЭ до значения $N=645$ импульсов по сравнению с $N=222$ импульса в образце с качественным стыковым сварным соединением (рис. 5). Рост величины N характеризует особенность процесса образования свободных поверхностей из-за подрастания

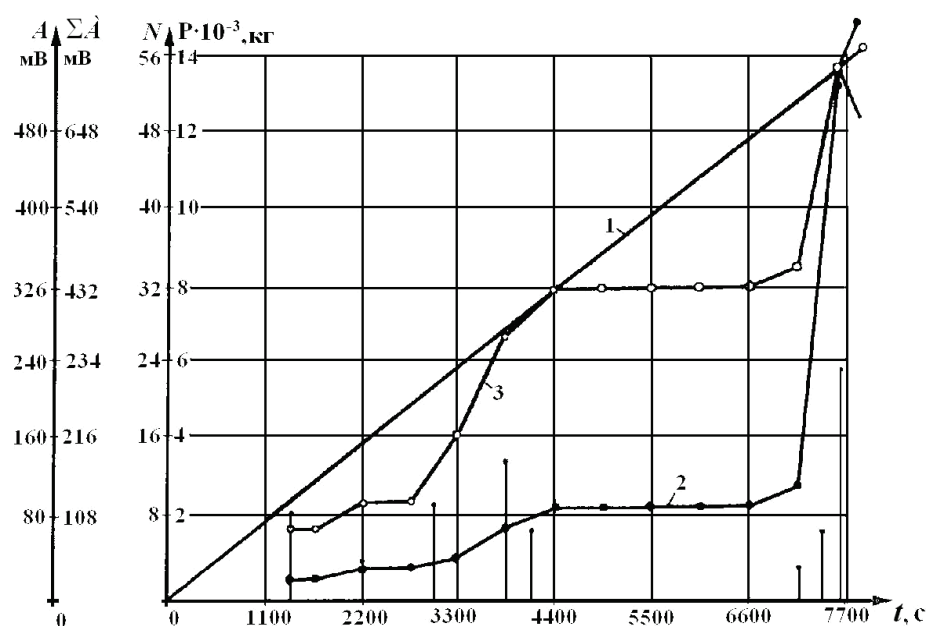


Рис. 4. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца для изучения основного металла в состоянии поставки: 1) нагрузка P ; 2) суммарный счет акустической эмиссии N ; 3) суммарная величина амплитуд ΣA

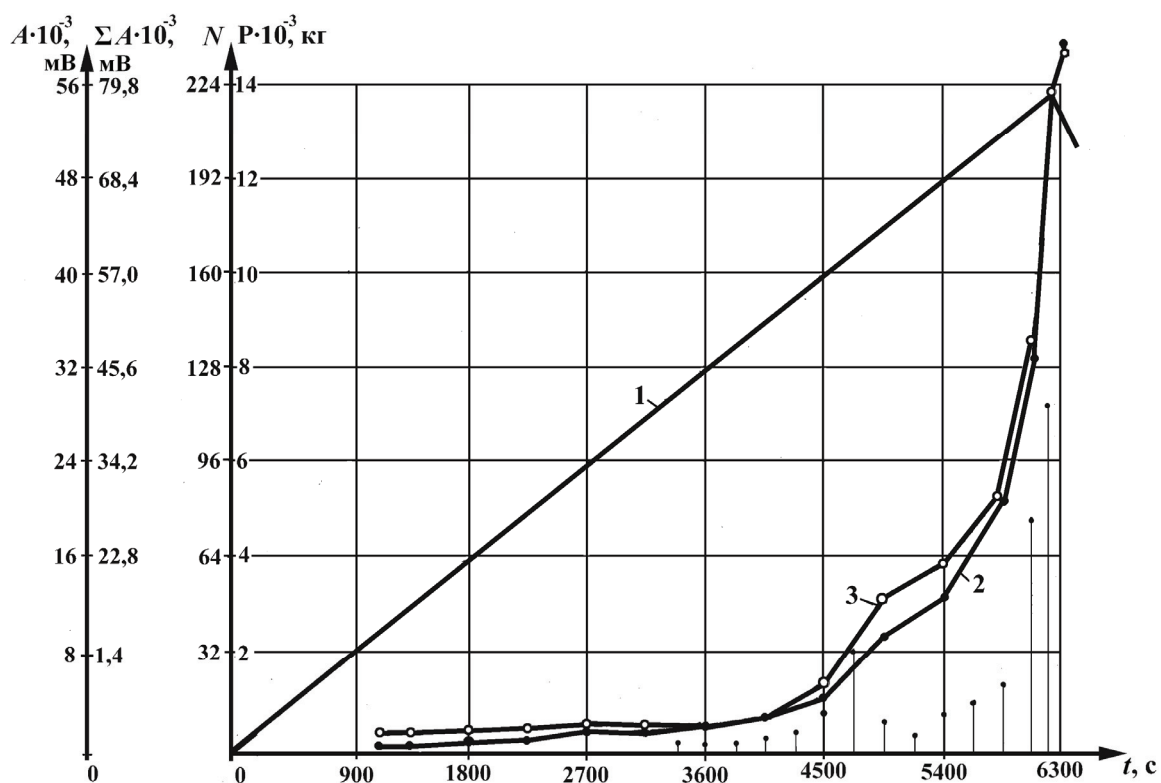


Рис. 5. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца со сварным стыковым бездефектным швом в поперечном направлении: 1) нагрузка P ; 2) суммарный счет акустической эмиссии N ; 3) суммарная величина амплитуд ΣA

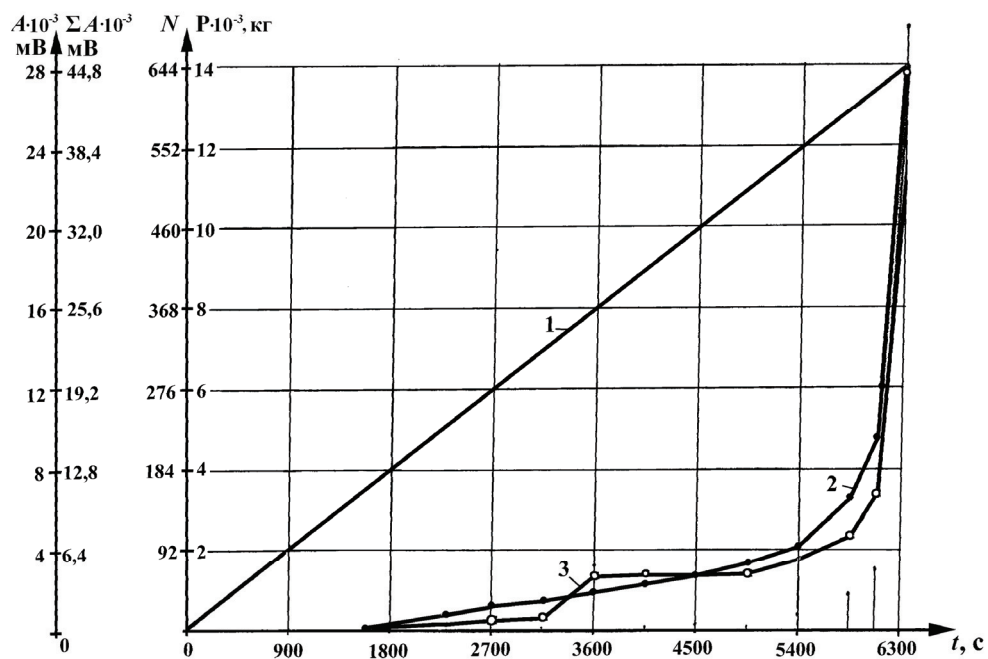


Рис. 6. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца с непроваром длиной 15 мм в сварном стыковом шве: 1) нагрузка P ; 2) суммарный счет акустической эмиссии N ; 3) суммарная величина амплитуд ΣA

непровара при воздействии на него внешней нагрузки [6–8]. Суммарная величина амплитуд ΣA почти в два раза меньше, чем у бездефектного сварного шва, и составляет 44500 мВ против 79800 мВ. Это, во-первых, свидетельствует о более низких прилагаемых напряжениях, необходимых для раз-

рушения образца с непроваром, и, во-вторых, позволяет в отличие от других современных методов исследования получить очень ценную информацию о кинетике процессов деформации и разрушения, происходящих в твердом теле при внешнем воздействии на него.

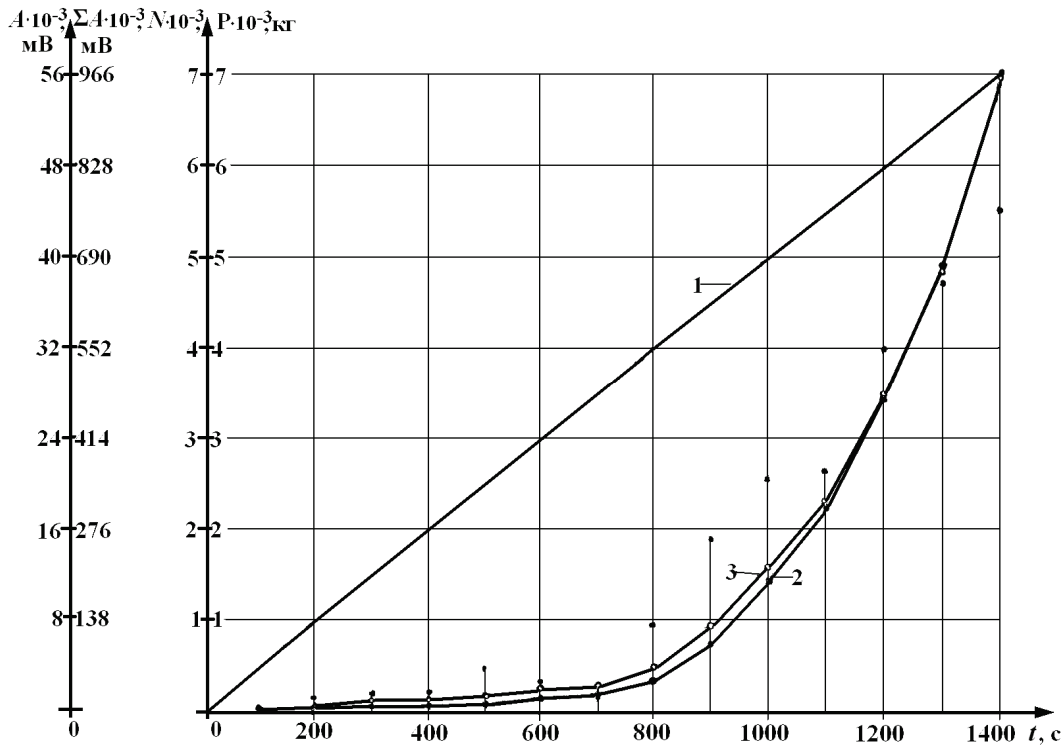


Рис. 7. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца с тремя непроварами и порами диаметром 0,5 мм в сварном стыковом соединении: 1) нагрузка P ; 2) суммарный счет акустической эмиссии N ; 3) суммарная величина амплитуд ΣA

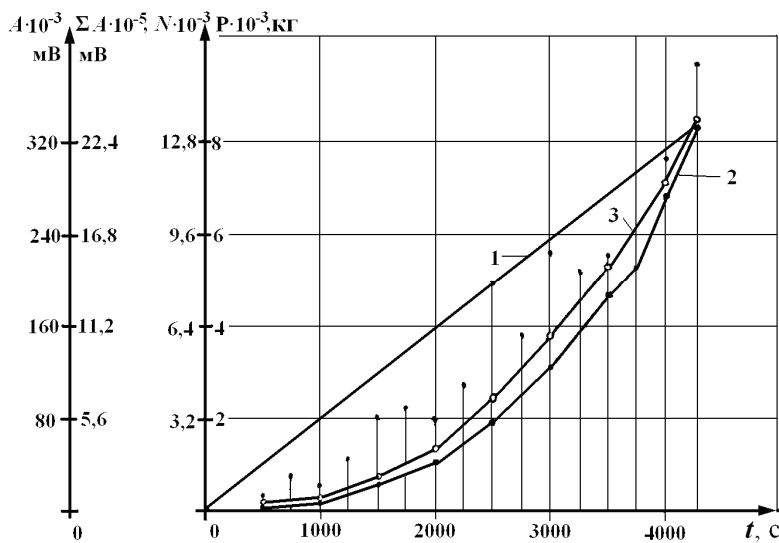


Рис. 8. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца с непроваром и порами диаметром 0,5...1 мм в сварном стыковом соединении: 1) нагрузка P ; 2) суммарный счет акустической эмиссии N ; 3) суммарная величина амплитуд ΣA

Значительные изменения претерпевают параметры сигналов АЭ во времени при растяжении плоского образца с тремя неповарами и порами диаметром 0,5 мм в сварном стыковом соединении (рис. 7). Деформационные процессы, протекающие в образце, приводят к его разрушению, кото-

рое наступает уже через 1400 с от момента начала нагружения при внешнем воздействии $P=6850$ кг. При этом суммарный счет АЭ достиг 7000 импульсов, а суммарная величина амплитуд ΣA в 12 раз превысила подобные значения для бездефектного сварного шва (рис. 5).

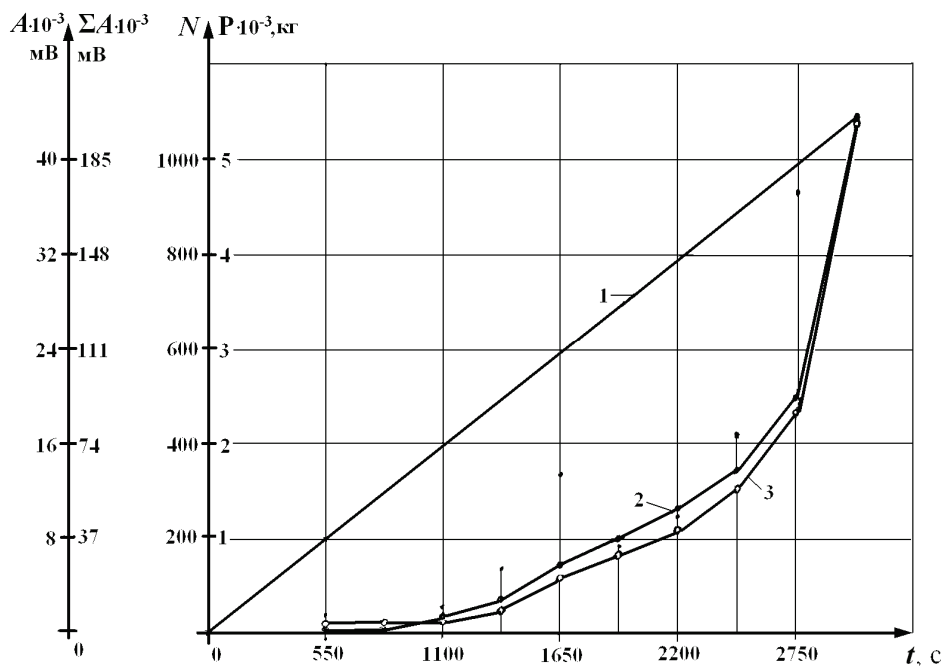


Рис. 9. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца с четырьмя порами диаметром 3...5 мм в сварном стыковом соединении: 1) нагрузка P ; 2) суммарный счет акустической эмиссии N ; 3) суммарная величина амплитуд ΣA

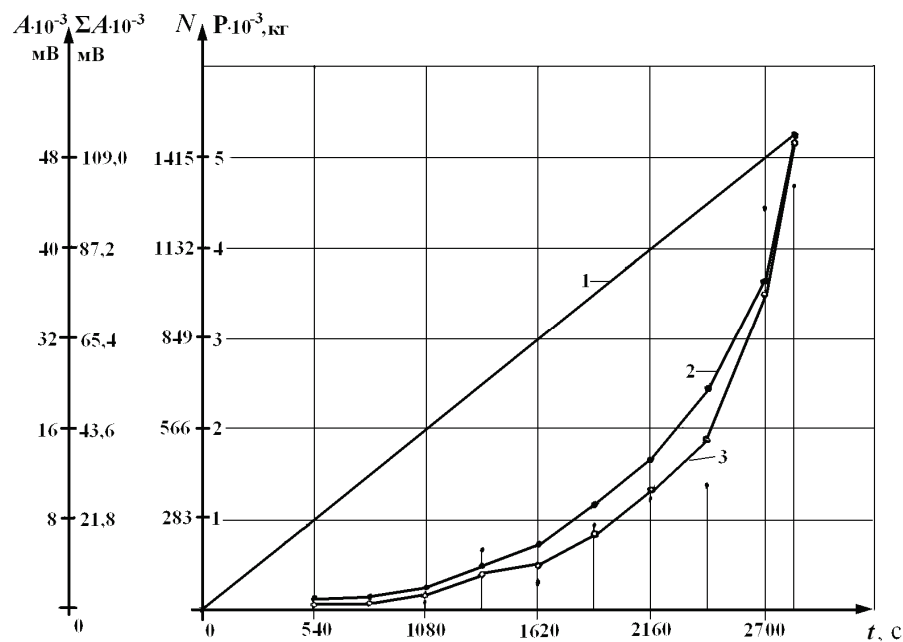


Рис. 10. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца с восемью порами диаметром 0,8 мм и микротрещиной в сварном стыковом соединении: 1) нагрузка P ; 2) суммарный счет акустической эмиссии N ; 3) суммарная величина амплитуд ΣA

Наличие непровара и пор диаметром 0,5...1,0 мм в сварном стыковом соединении существенно меняет характер протекания процесса деформации в образце при его внешнем нагружении (рис. 8), причем разрушение наступает на 4300 с при нагрузке $P=8440$

кг. В данном случае значения ΣA превышены почти в 30 раз, а N в 60 раз (13350 импульсов) по сравнению с качественным сварным соединением. Это характеризует лавинообразный процесс роста дефектов со временем вплоть до разрушения образца.

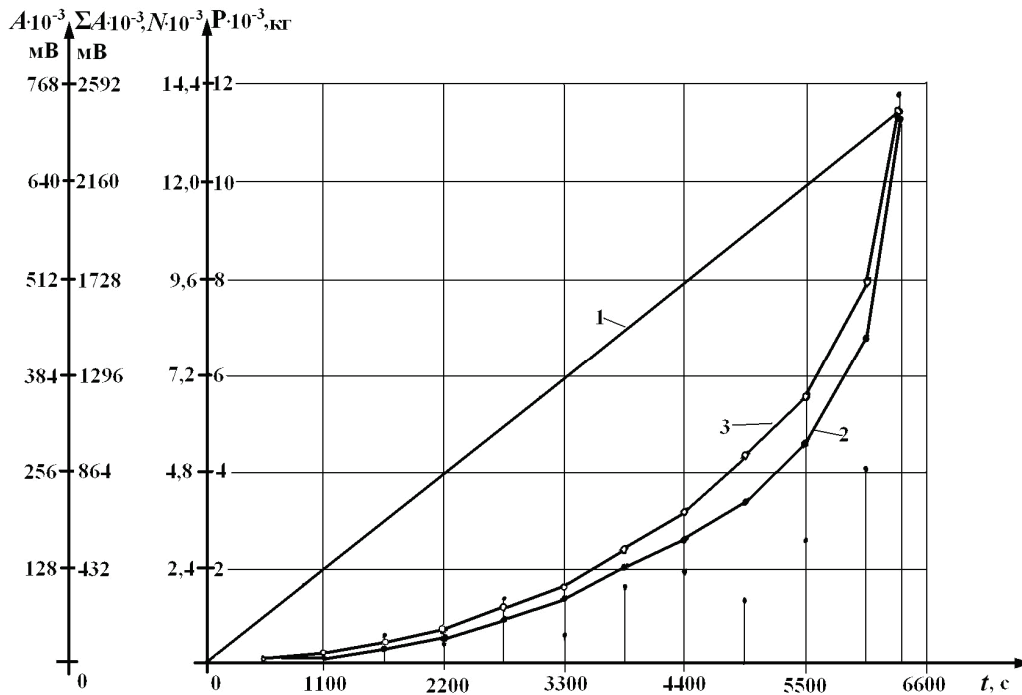


Рис. 11. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца с двумя подрезами и порами диаметром 0,01...0,2 мм в сварном стыковом соединении: 1) нагрузка P ; 2) суммарный счет акустической эмиссии N ; 3) суммарная величина амплитуд ΣA

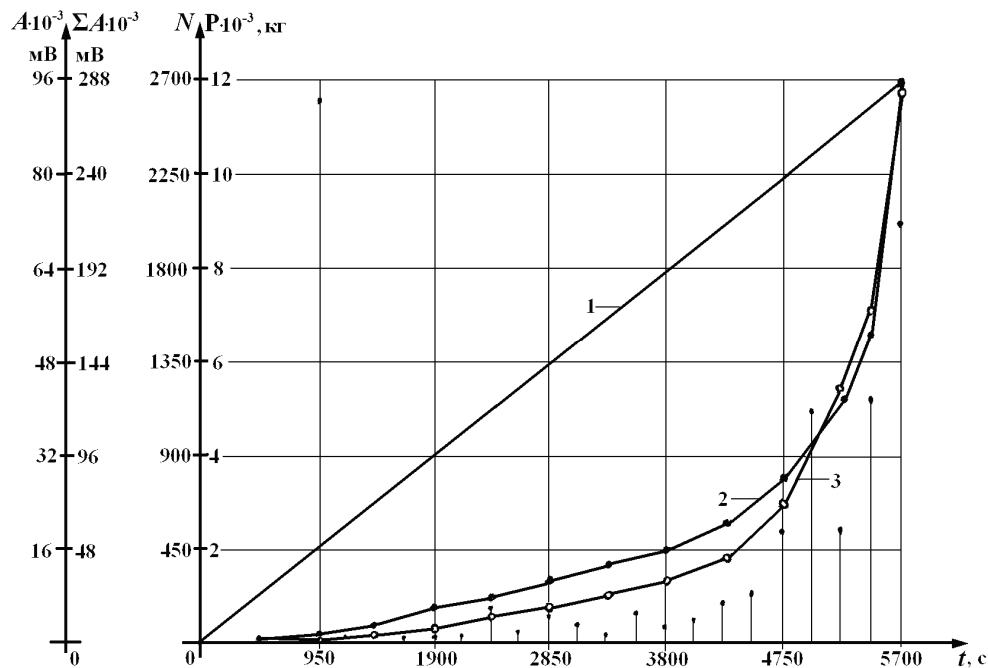


Рис. 12. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца с двумя подрезами глубиной 2 мм и трещиной по кромке шва длиной 3 мм в сварном стыковом соединении: 1) нагрузка P ; 2) суммарный счет акустической эмиссии N ; 3) суммарная величина амплитуд ΣA

Характеристики, полученные при испытании плоского образца с четырьмя порами диаметром 3...5 мм в сварном стыковом соединении, также отличаются от данных для качественного сварного соединения (рис. 9). В частности, разрушение наступает на 2975 с, т. е. намного раньше, при внешней нагрузке в 2,5 раза меньше исходной, суммарный счет АЭ почти в 5 раз выше. Появление микротрещины (рис. 10) дополнительно приводит к снижению внешнего усилия при разрушении ($P_{\max}=5350$ кг), его более раннему наступлению и росту величины N в 6,8 раза по сравнению с бездефектным швом.

Испытание на растяжение образцов с подрезами (рис. 11, 12) также приводит к более раннему времени их разрушения и с высокими значениями информативных параметров, характеризующих этот процесс.

Наиболее низкие механические свойства установлены при испытании плоских образцов с различной ориентацией трещин в сварном стыковом соединении (рис. 13–15). Характерная особенность полученных результатов состоит в том, что начало появления первых сигналов АЭ выявлено на самой ранней стадии процесса нагружения. В частности, при статическом растяжении плоского образца с трещиной вдоль шва длиной 17 мм, (рис. 13), первые значения N зарегистрированы уже на 160-й с от момента времени начала испытания. Это свидетельствует о существовании внутренних напряжений с высокой концентрацией в вершине трещины, которые, суммируясь с внешними напряжениями, даже при незначительных растягивающих нагрузках превышают предел прочности. В результате пластической деформации происходит релаксация внутренних напряжений, подрастание берегов трещины с образованием свободных поверхностей и освобождением избыточной энергии, переносимой сформированной упругой механической волной в виде акустического излучения.

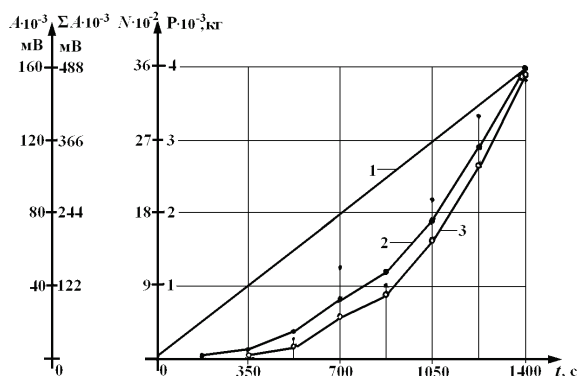


Рис. 13. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца с трещиной вдоль шва длиной 17 мм в сварном стыковом соединении: 1) нагрузка P ; 2) суммарный счет акустической эмиссии N ; 3) суммарная величина амплитуд ΣA

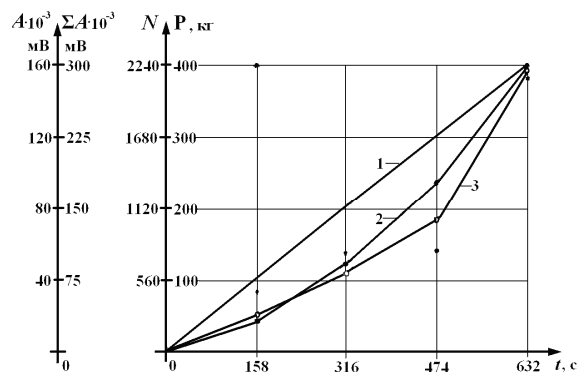


Рис. 14. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца с продольной ($L=12$ мм) и поперечной ($L=4$ мм) трещинами в сварном стыковом соединении: 1) нагрузка P ; 2) суммарный счет акустической эмиссии N ; 3) суммарная величина амплитуд ΣA

С учетом изложенного разрушение образца наступает при внешнем нагружении $P_{\max}=3920$ кг, т. е. в 3,5 раза меньше, чем при испытании бездефектного сварного шва (рис. 5). Кроме того, суммарный счет акустической эмиссии N увеличился в 16 раз, а суммарная величина амплитуд ΣA – более чем в 6 раз.

На основе данных, полученных при одноосном растяжении плоского образца с продольной ($L=12$ мм) и поперечной ($L=4$ мм) трещинами в сварном стыковом соединении, построен график зависимости, рис. 14, из которого следует, что уже на первых секундах нагружения появляются сигналы АЭ, свидетельствующие о начале внутренней перестройки структуры металла шва в результате протекания деформационных процессов. Разрушение образца наступило на 632-й с при нагрузке $P_{\max}=410$ кг, которая почти в 34 раза меньше усилия разрыва качественного сварного шва. При этом значение суммарного счета АЭ увеличилось в 10 раз.

Испытание плоского образца с продольной ($L=17$ мм), поперечной ($L=10$ мм) трещинами и пятью порами в сварном шве позволило установить, что первые сигналы АЭ зарегистрированы на 50-й с после начала его растяжения, причем разрыв соединения произошел уже на 300-й с от начала процесса нагружения при $P_{\max}=1195$ кг и более чем пятикратном росте величины N по сравнению с бездефектным швом (рис. 15).

Результаты исследования процессов статического одноосного растяжения образцов с трещинами в сварных швах позволили установить, что:

1. Более раннее появление сигналов АЭ наблюдается у образцов с высокой степенью концентрации внутренних напряжений, низким пределом прочности металла и наоборот.
2. Разрушение металла наступает раньше у образцов с большими концентраторами внутренних напряжений.

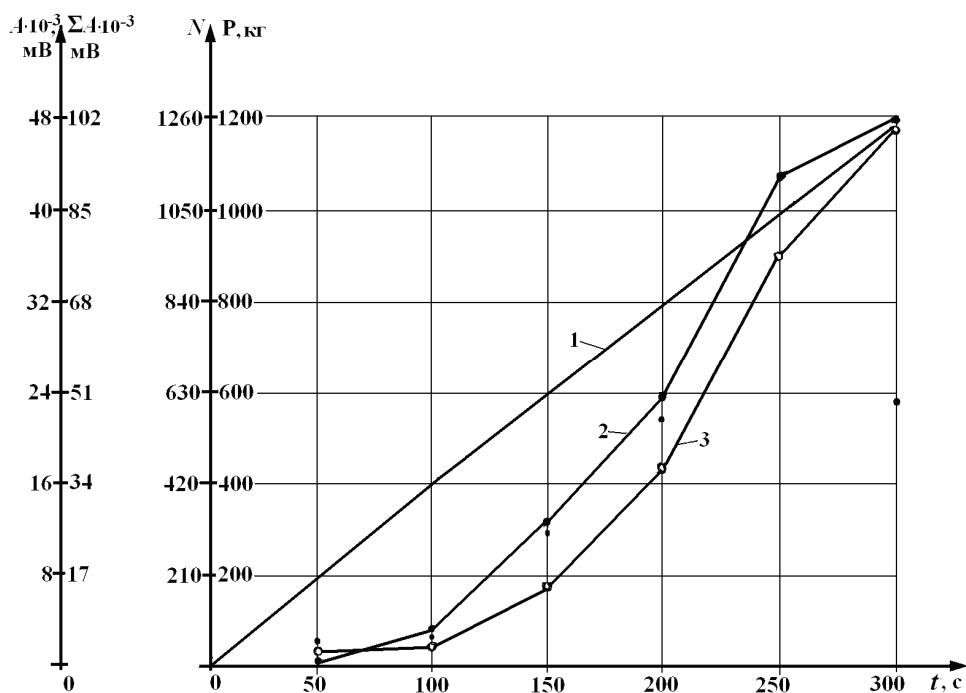


Рис. 15. Изменение параметров АЭ во времени при растяжении плоского образца с продольной ($L=17$ мм), поперечной ($L=10$ мм) трещинами и пятью порами в сварном стыковом соединении: 1) нагрузка P ; 2) суммарный счет акустической эмиссии N ; 3) суммарная величина амплитуд ΣA

Таблица. Параметры АЭ при растяжении образцов до максимальной нагрузки

№ обр.	Вид технологического дефекта	Максимальная нагрузка, кг	N	$\Sigma A \cdot 10^{-3}$, мВ
5	Бездефектный сварной шов	13850	222	79,8
6	Непровар длиной 15 мм	13850	645	44,5
7	Три непровара и поры $\varnothing 0,5$ мм	6850	7000	965
8	Непровар и поры $\varnothing 0,5 \dots 1$ мм	8440	13350	2389,6
9	Четыре поры $\varnothing 3 \dots 5$ мм	5538	1100	204
10	Восемь пор $\varnothing 0,8$ мм и микротрещина	5350	1500	115
11	Два подреза и поры $\varnothing 0,01 \dots 0,2$ мм	11545	13657	2485
12	Два подреза глубиной 2 мм и трещина по кромке шва, $L=3$ мм	5680	2700	281
13	Трещина вдоль шва $L=17$ мм	3920	3590	488
14	Трещины: поперечная $L=4$ мм, продольная $L=12$ мм	410	2230	219
15	Трещина: поперечная $L=10$ мм, продольная $L=17$ мм и 5 пор	1195	1262	101

Анализ графических зависимостей (рис. 4–15) и данных в таблице свидетельствует о значительном снижении предела прочности всех дефектных образцов, за исключением образца с непроваром по его кромке (рис. 6), форма которого не вызвала высокой степени концентрации напряжений. Низ-

кий предел прочности наблюдается у образцов с трещинами, у которых наиболее высокая концентрация напряжений вдоль берегов и в вершине.

Известно, что одной из главных проблем метода АЭ остается выработка критериев оценки вероятности наступления предразрушающего состояния диагностируемого изделия по полученным в процессе исследования параметрам АЭ. При этом наиболее объективные данные о протекающих в изделиях процессах содержит в себе такой информативный параметр, как *суммарный счет акустической эмиссии* N в функции от параметров нагружения [11, 12]. Это положение также было подтверждено результатами, полученными при испытании образцов. В частности, было установлено, что при одинаковых условиях проведения экспериментов, соответствующей настройке каналов и чувствительности аппаратуры основным информативным параметром при оценке прочности сварных бездефектных и дефектных образцов является *суммарный счет акустической эмиссии* N у всех испытанных образцов. При этом целесообразно анализировать начало появления первых сигналов АЭ (более раннее у образцов с высокой степенью концентрации напряжений, рис. 14 и 15, и низкой прочностью и более позднее у образцов с низкой степенью концентрации напряжений, рис. 5 и 6, и высокой прочностью), их активность, форму кривой *суммарного счета акустической эмиссии* N .

Дополнительную информацию о физической природе и особенностях источников акустического излучения может дать исследование амплитудного

распределения сигналов АЭ, потому что амплитуда сигналов АЭ непосредственно связана с их энергией. Под амплитудой сигнала АЭ понимается его максимальное значение в течение выбранного интервала времени. Установлено, что распределение максимальных значений импульсов АЭ (плотность распределения амплитуд сигналов АЭ) содержит полезную информацию о структуре металла, дает возможность оценить квантование энергии по отдельным актам акустического излучения [11].

Появление некоторого максимума в амплитудном распределении сигналов АЭ при разрушении образца, очевидно, вызвано преобладающим размером подрастания скачков макротрещины в момент разрушения. Каждому скачку трещины предшествует пластическая деформация в ее вершине (рост пластической зоны), ответственная за низкоэнергетическую АЭ непрерывного типа в отличие от дискретной АЭ высокой энергии при скачке трещины [12]. Импульсы АЭ дискретного типа возникают в результате коллективного отрыва дислокаций от точек закрепления. Это проявляется в основном до предела текучести, и амплитуда сигналов зависит от прочности закрепления.

Амплитудное распределение и рост отдельных импульсов связаны с особенностью продвижения трещин [13]. Скачок трещины обуславливает появление сигнала большой амплитуды, превышающий сигналы с малой амплитудой на порядок и выше. Экспериментально можно установить их значения для данного материала, однако в рамках настоящей работы установить количественную связь приращения длины трещины с величиной амплитуды не представилось возможным из-за сложности проведения эксперимента.

Перед разрывом практически всех образцов наблюдается рост ΣA , что характерно для более равномерного развития трещины. Таким образом,

суммарная величина амплитуд и амплитуда отдельных импульсов могут быть проанализированы для оценки продвижения трещины у образцов с усталостной трещиной, либо с технологическими дефектами в виде трещин.

Выводы

1. Исследованы источники акустической эмиссии при испытании на одноосное растяжение образцов основного металла из листовой стали марки 03X11H8M2Ф – ВД мартенситного класса, а также сварных бездефектных и с различными технологическими дефектами.
2. Установлено, что в качестве основного информативного параметра при испытании серии образцов необходимо принимать *суммарный счет акустической эмиссии*. Для дополнительной оценки состояния металла достаточно использовать *суммарную величину амплитуд и сумму отдельных импульсов*.
3. Дальнейшие работы на образцах целесообразно проводить в направлении изучения влияния различных технологических дефектов на параметры при испытании серии образцов с однотипными дефектами.
4. Выполненные исследования свидетельствуют о возможности применения метода для локации развивающихся дефектов при нагружении сварных изделий. Для его реализации требуется создание специализированной многоканальной аппаратуры, разработка математического обеспечения и методики проведения испытаний.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность Президенту Национальной Академии наук Украины, академику РАН Б.Е. Патону, а также профессору, доктору технических наук А.Я. Недосеке за проявленный интерес к данной работе, за своевременно оказанное содействие и помощь в проведении эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патон Б.Е. Об основных направлениях работ в области акустической эмиссии // Акустическая эмиссия материалов и конструкций: Тр. I Всес. конф. – Ростов-на-Дону: Ростовский ун-т, 1989. – С. 5–10.
2. Апасов А.М., Козлов Э.В. Исследование структуры металла сварного соединения из коррозионностойкой стали // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 2. – С. 155–161.
3. Алешин Н.П., Бигус Г.А., Лютов М.А. Диагностирование объектов стартовых комплексов изделий ракетно-космической техники с использованием акустических методов контроля // Дефектоскопия. – 2002. – № 3. – С. 3–13.
4. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Можно ли прогнозировать разрушение? // В кн.: Будущее науки. – М.: Знание, 1983. – С. 100–111.
5. Карбовский А.Д., Яшманов Ю.Б., Овсиенко М.А. Математическое обеспечение системы акустико-эмиссионной диагностики // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – 1985. – Вып. 1. – С. 41–44.
6. Pollock A.A. Acoustic emission // Engineering. – 1970. – V. 209. – № 5433. – P. 639–642.
7. Radon I.C., Pollok A.A. Acoustic emission and energy transfer during crack propagation // Engineering Fract. Mech. – 1972. – V. 4. – № 2. – P. 295–310.
8. Stephens R.W.B., Pollock A.A. Waveforms and frequency spectra of acoustic emission // J. Acoustical Soc. Amer. – 1971. – V. 50. – № 3. – P. 2. – P. 904–910.
9. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Баранов В.М., Гурвич А.К., Данилов В.Н., Иванов В.И., Ланге Ю.В., Щербинский В.Г. Достигновения акустических методов контроля за 5 лет // Дефектоскопия. – 1996. – № 9. – С. 101–105.
10. ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. – Термины, определения и обозначения. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 12 с.
11. Трипалин А.С., Буйло С.И. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1986. – 160 с.
12. Гусев О.В. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. – М.: Наука, 1982. – 108 с.
13. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.

Поступила 01.02.2010 г.