



УДК 621.19.14

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЭ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ. Сообщение 2

Л. М. ЛОБАНОВ, А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, А. К. ЦАРЮК, А. А. ГРУЗД,  
Л. Ф. ХАРЧЕНКО, М. А. ЯРЕМЕНКО

*Рассмотрены результаты исследований образцов с целью получения экспериментальных данных по АЭ свойствам некоторых металлических материалов при статическом нагружении в условиях высоких температур.*

*The paper deals with the results of testing samples in order to obtain experimental data on AE properties of some metallic materials under high temperature static loading conditions.*

Для реализации методики высокотемпературных АЭ испытаний был выбран оптимальный способ нагрева рабочей части образцов с использованием точечного нагрева в центре рабочей зоны образца, выполняемого специализированной горелкой. На его основе создан испытательный стенд (рис. 1), отработаны конструкции образцов и методика регистрации параметров испытаний. Проведены предварительные анализы параметров нагружения образцов и распространения АЭ в условиях высоких температур.

Для исследования выбран ряд модельных материалов, достаточно часто используемых в конструкциях объектов нефтехимической промышленности. Испытания материалов проведены в условиях нормальных и высоких температур с целью определения особенностей их повреждаемости и формирования источников АЭ.

В работе описаны результаты выполненных экспериментов и исследований применительно к образцам из четырех модельных материалов разных классов (рис. 2, табл. 1).

Предварительные опыты по изучению изменения параметров АЭ сигналов в условиях прохождения их через нагретый материал были проведены на полосе из стали Ст3 размерами 960×60 мм, толщиной 3 мм, установленной на двух опорах, расстояние между которыми 500 мм. По краям полосы установили два датчика АЭ на расстоянии 875 мм один от другого. Вначале при комнатной температуре, а затем на различных стадиях нагрева центральной части пластины вплоть до 620 °С

выполняли АЭ сканирование. Датчики по очереди переводили в режим излучения тестовых сигналов амплитудой 32 В, длительностью 2 мкс, которые повторяли через 1 с. Всего в каждом эксперименте подавали 20 тестовых сигналов, что позволяет говорить о статистически корректных результатах. При нагреве свыше 600 °С в материале начал интенсивно протекать процесс пластического деформирования, что зафиксировано АЭ системой, после чего процесс нагрева был остановлен.

Исследование показало, что в диапазоне нагрева до 350 °С акустические характеристики материала остаются практически неизменными, затем происходит уменьшение амплитуд принятых

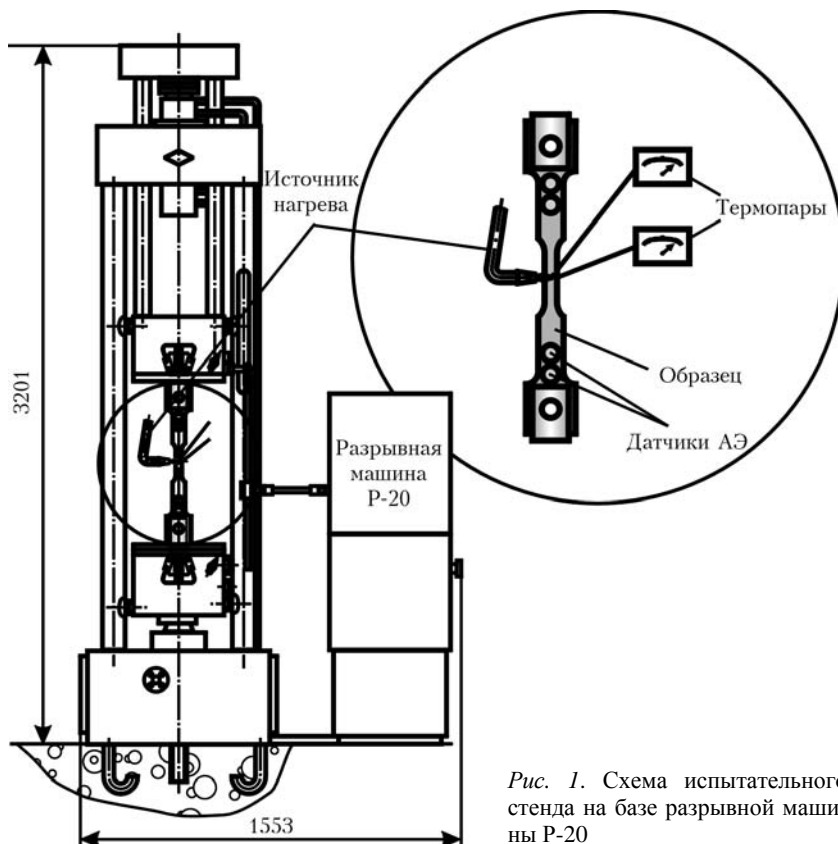


Рис. 1. Схема испытательного стенда на базе разрывной машины Р-20



**Таблица 1.** Свойства исследованных материалов в исходном состоянии

Материал	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\psi$ , %	$\delta$ , %	Тип образца
Ст3	220	400	25	72	АЭ-01Р
Сталь 20	288	440	28	34	АЭ-01Р
15Х1М1Ф	376	545	55	21	Круглый
X18H10T	285	560	55	71	»»

датчиками сигналов (на рис. 3 представлены усредненные данные для двух датчиков АЭ). Характерным является также снижение скорости прохождения волны через материал (на рис. 4 — усредненные данные для двух датчиков АЭ). Скорость определяли по задержкам времени прихода волн АЭ на первый и второй датчики, учитывая, что расстояние между ними известно.

Дополнительная проверка полученных результатов выполнена с использованием другого имитатора сигналов АЭ — ломающегося графитного стержня. Такая процедура часто используется при калибровке АЭ систем. Результаты аналогичны представленным выше, но следует отметить меньшую точность такого метода, поскольку излом стержня осуществляли вручную.

При испытаниях на статическое растяжение регистрировали температуру в рабочей части образца, нагрузку и акустическую эмиссию. Для материалов, показавших низкую акустическую активность при высоких температурах, были проведены испытания при нормальной температуре. Дополнительно проводили испытания образцов со сварными соединениями. В процессе испытаний проверяли также алгоритм прогноза разрушающей нагрузки АЭ системы ЕМА-3 в условиях различной акустической активности.

Рассмотрим некоторые результаты проведенных исследований. Для примера приведем вид экрана программы ЕМА-3 после окончания испытания стали 20 (рис. 5), на котором представлена локационная антенна, некоторые графики процесса испытания и результаты окончательного прогноза разрушающей нагрузки. В данном случае прогноз программой был выполнен, но для неко-

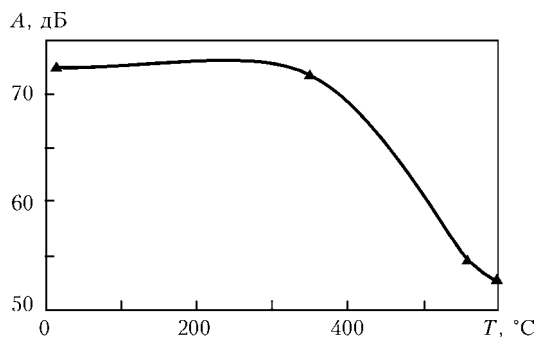


Рис. 3. Изменение амплитуд сканирующих АЭ сигналов в зависимости от температуры нагрева пластины

торых материалов полученной АЭ информации было недостаточно. В верхней части окна расположена область прогноза разрушающих нагрузок, ниже — отображение локационной схемы и координат событий АЭ. Справа — графики реального времени, количество которых и выбор отображаемых параметров осуществляет пользователь. Внизу — столбчатая диаграмма непрерывной АЭ по каждому измерительному каналу с отметкой установленных порогов. Во всех проведенных испытаниях данной серии использовали локационную схему из двух датчиков АЭ.

Белая полоса в нижней части локационной схемы предназначена для отображения координат событий АЭ столбиками синего цвета до их кластерного анализа. Столбец с флажком отображает результаты кластеризации с восстановлением истинных координат предполагаемого развивающегося дефекта — источника АЭ.

Для всех проведенных испытаний характерно возникновение АЭ в центральной части образцов, где впоследствии и происходило разрушение. Результаты кластеризации позволяют определить истинное место разрушения с погрешностью не более 5 %. Испытанные материалы показали различную акустическую активность как в холодном, так и нагретом состояниях. Общим свойством, характерным для всех испытанных материалов, является снижение числа событий АЭ в условиях нагрева. Поэтому одной из целей анализа проведенных испытаний является определение возможности локации источников АЭ и прогнозирования разрушающих нагрузок при высоких температурах.

Наименее информативна сталь X18H10T. Следует учесть, что при испытаниях данного материала в условиях обычных температур возникает малое число событий АЭ, а имеющийся опыт АЭ исследований такого класса материалов показывает, что даже на стадиях образования и роста трещин они излучают крайне мало сигналов АЭ [1]. Особенно существенно этот факт сказывается при высокотемпературных испытаниях. Прочие стали при высокой температуре также существенным образом теряют акустическую активность, но

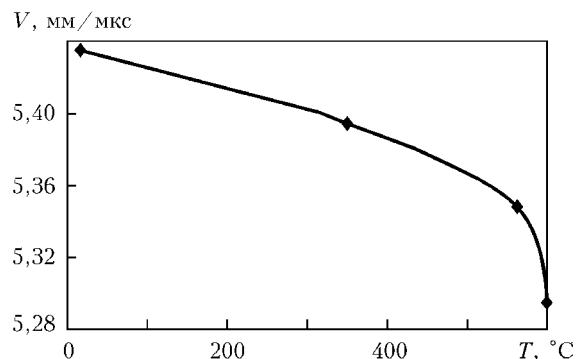


Рис. 4. Изменение скорости сканирующих АЭ сигналов в зависимости от температуры нагрева пластины

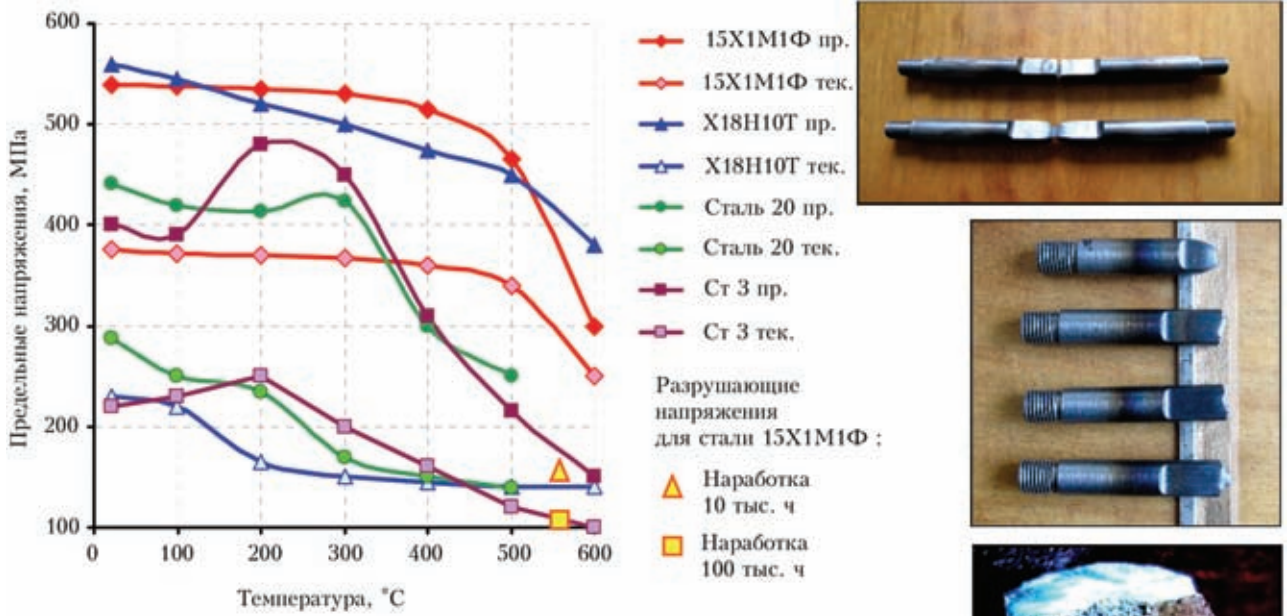


Рис. 2. Пределные напряжения в различных материалах при растяжении в зависимости от температуры. Для стали 15X1M1Φ приведены также разрушающие нагрузки после наработки 10 и 100 тыс. ч при температуре 560 °С. На фото — образцы для высокотемпературных испытаний до и после разрушения, а также типичная поверхность разрушения образцов



Рис. 5. Окно программы EMA-3.5. Испытание стали 20 при нормальной температуре

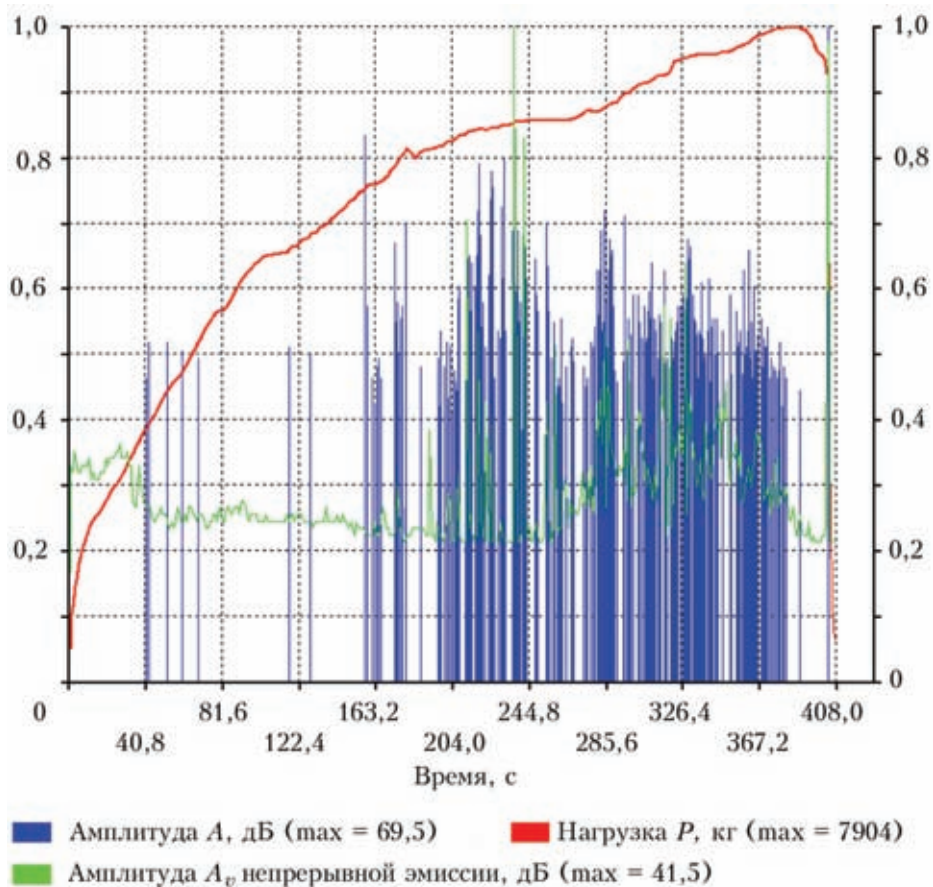


Рис. 6. Испытание стали Ст.3 при нормальной температуре

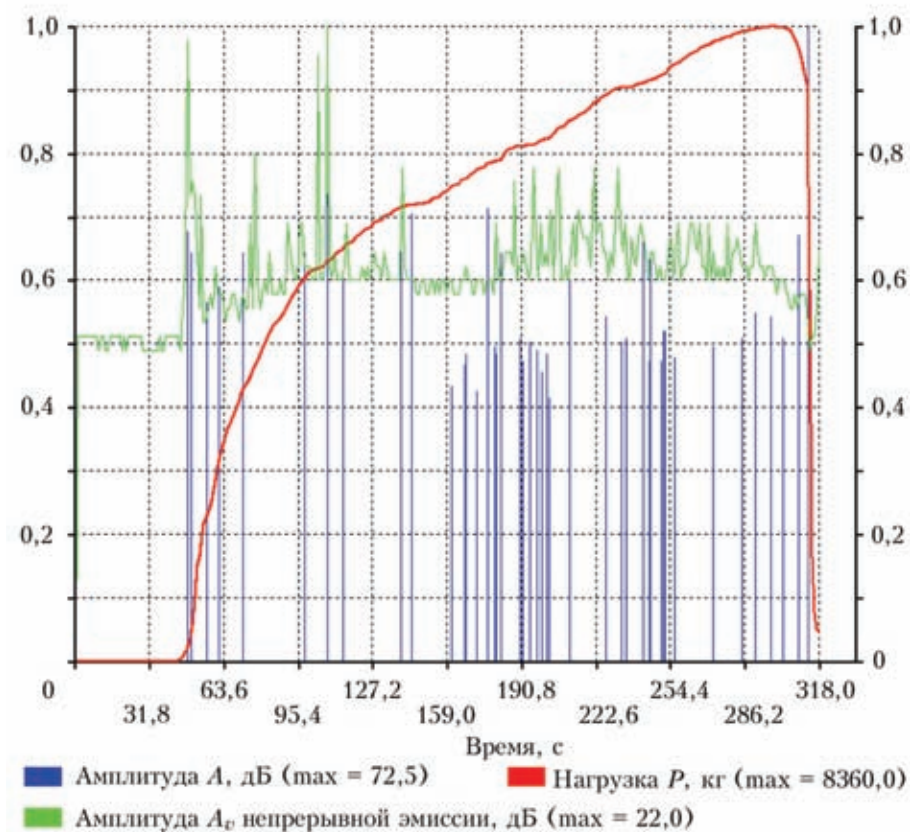


Рис. 7. Испытание стали 15X1M1Ф при нормальной температуре

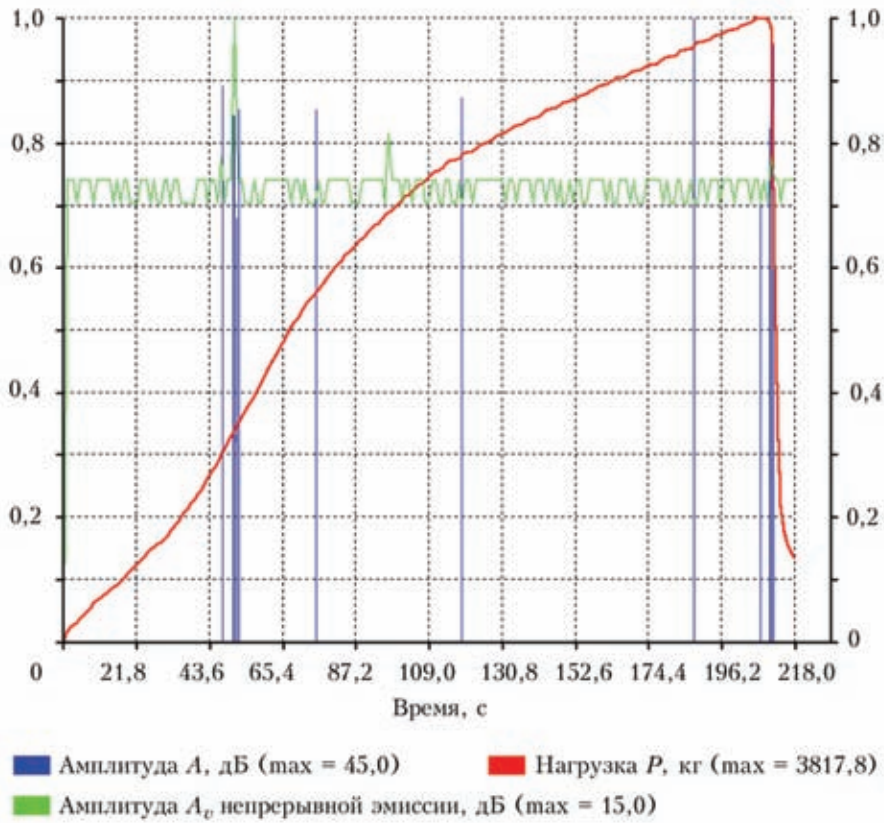


Рис. 8. Испытание стали X18N10T с надрезом при нормальной температуре

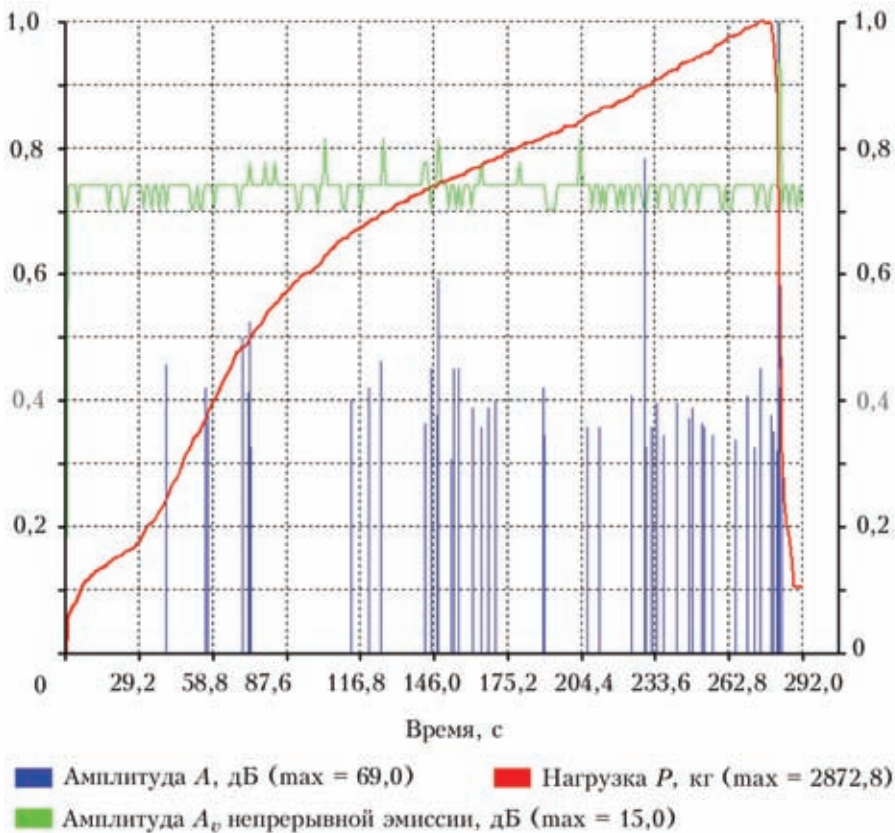


Рис. 9. Испытание стали X18N10T с надрезом при температуре 450 °С в режиме зонного контроля

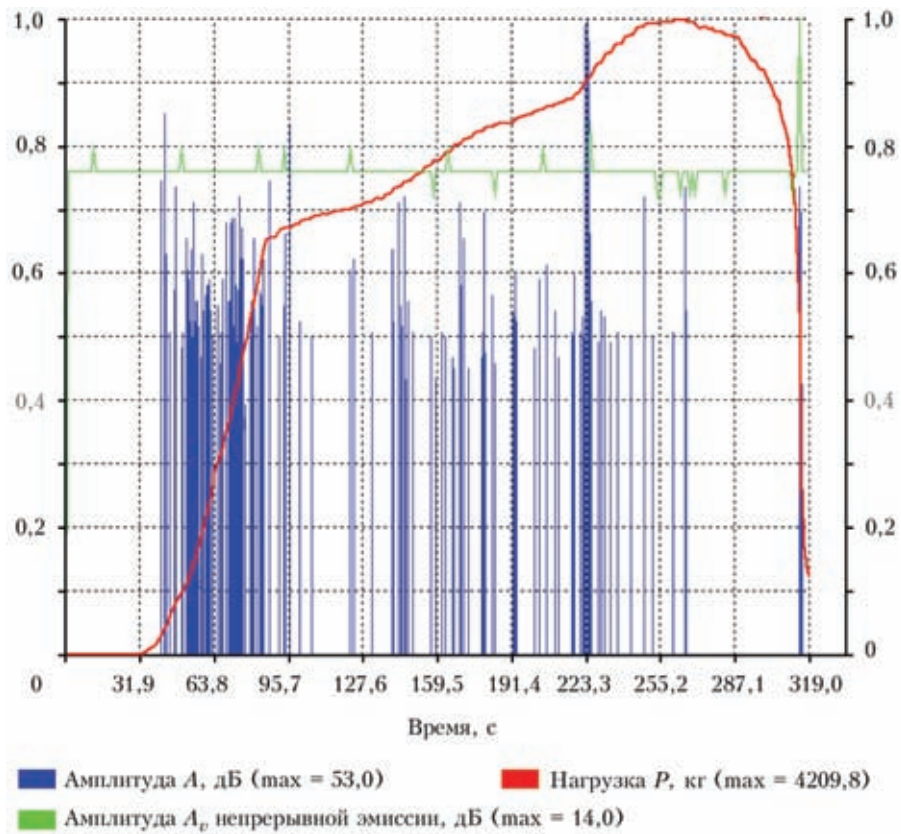


Рис. 10. Испытание стали 15X1M1Ф при температуре 500 °С в режиме зонного контроля

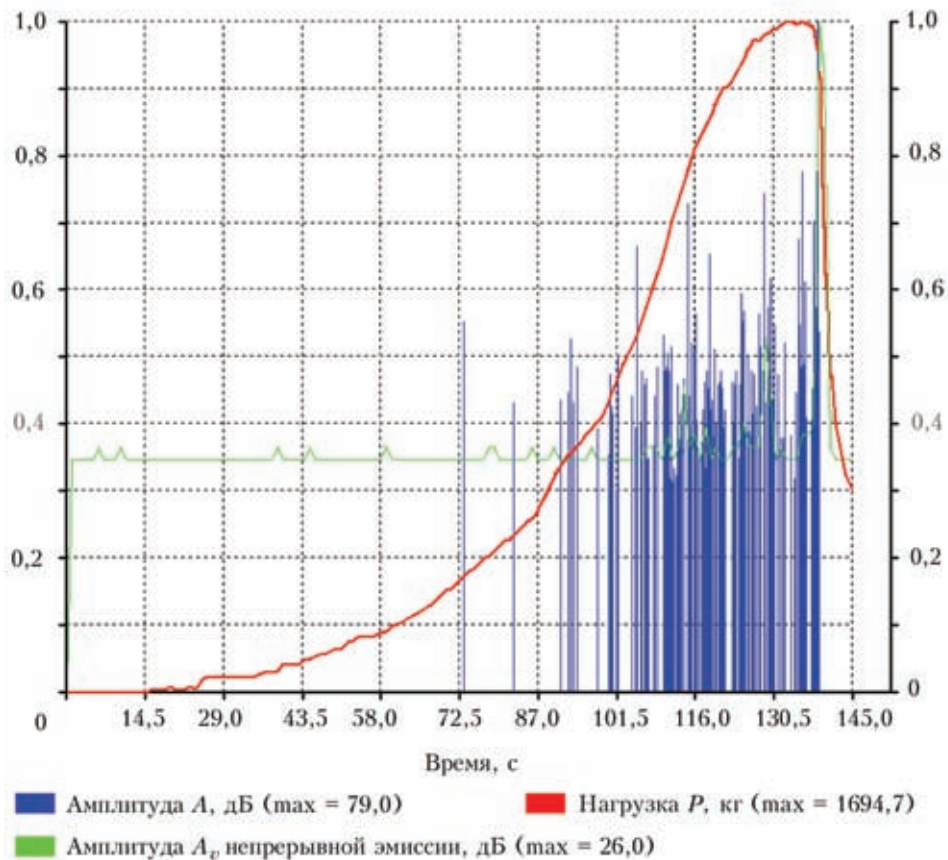


Рис. 11. Испытание стали 20 при температуре 450 °С. Образец со сварным швом



получаемой информации может быть достаточно для оценки состояния материала.

Испытания стали 15X1M1Ф при температуре 500 °С показали, что имеются некоторые потенциальные проблемы при регистрации АЭ с использованием традиционной схемы крепления датчиков. Возможно, сильный нагрев датчика, расположенного выше источника пламени, привел к потере им чувствительности, в результате чего количество принятых импульсов было во много раз меньше, чем принятых датчиком, расположенным ниже источника пламени. Еще одной вероятной причиной незначительного количества событий, формируемого системой по результатам срабатываний двух датчиков АЭ, может быть снижение акустической проводимости металла в диапазоне излучения сигналов внутренними дефектами. Проверка в начальный период испытания срабатываний датчиков от внешнего источника, имитирующего АЭ, показала нормальную работу датчиков. Таким образом, данный вопрос нуждается в более детальном исследовании.

В целом, установлены следующие общие закономерности. Наличие области концентрации напряжений (в данной работе создаваемой за счет надреза в центральной части образца) повышает информативность метода. Еще более информативным метод является для образцов со сварным соединением, наличие которого в большинстве случаев увеличивает акустическую активность в 10 и более раз.

Данные, приведенные в табл. 2 для некоторых испытанных образцов, показывают общую тенденцию снижения событий АЭ при высоких температурах.

Тем не менее, следует отметить, что даже при одном работоспособном датчике информации, принятой АЭ системой, может быть вполне достаточно для принятия решения о состоянии объекта контроля, работающего при данных температурных условиях.

Представим графики некоторых испытаний материалов в следующих координатах: по оси абсцисс — время от начала испытания, по оси ординат — три параметра (нагрузка — красная кривая, уровень непрерывной АЭ — зеленая, гистограмма синего цвета — амплитуды событий дискретной АЭ). Численные результаты испытаний приведены в табл. 3.

Образец из стали Ст3, испытанный в условиях нормальной температуры (рис. 6), разрушился при нагрузке 7904 кг.

Образец из стали 15X1M1Ф, испытанный в условиях нормальной температуры (рис. 7), разрушился при нагрузке 8360 кг.

Данные, приведенные в табл. 3 для образцов из этих сталей, показывают эффективность реализованной в программе ЕМА-3 технологии прог-

Таблица 2. Снижение числа событий АЭ при высоких температурах

Материал	Число событий АЭ по данным испытаний трех образцов каждой стали	
	при нормальной температуре	при температуре выше 450 °С
Сталь Ст3	439...512	43...57
Сталь 20	837...879	19...23
Сталь 20 со сварным швом	1121...1174	173...216
15X1M1Ф	1132...1151	217...298
X18H10T	10...17	3...5
X18H10T со сварным швом	179...240	63...70

ноза разрушающей нагрузки при оценке состояния материалов в условиях нормальных температур. Первое предупреждение о возможном разрушении стали Ст3 получено на 117 с, второе с более точным прогнозом разрушающей нагрузки — на 163 с, за 245 с до разрушения, что составляет менее половины общего времени испытания (408 с). Предупреждение о возможном разрушении стали 15X1M1Ф получено на 98 с, за 216 с до разрушения, что составляет около трети общего времени испытания (306 с).

Выполненный прогноз соответствует величинам реальных нагрузок и укладывается в пределы установленных для системы ЕМА-3 погрешностей: ±15 % с вероятностью 0,95.

Показательным является также то, при каком числе зарегистрированных событий АЭ осуществляется прогноз разрушения. Для принятия решения о состоянии материала системе ЕМА-3 достаточно в некоторых случаях менее 10 событий АЭ, обработанных предварительно методами кластерного анализа.

Аналогичные результаты получены и для других испытанных материалов, кроме стали X18H10T (см. табл. 2), для которой число событий АЭ даже при нормальной температуре настолько мало, что не позволяет выполнить полноценного прогноза разрушения. Для материалов такого типа актуальным является изучение вопроса об увеличении числа источников АЭ за счет внесения в конструкцию образца концентратора либо сварного соединения, что и было выполнено.

Вначале были испытаны образцы с боковым двухсторонним сквозным надрезом в центральной части. Внесение данного концентратора в конструкцию образца привело (рис. 8) к трехкратному увеличению числа событий АЭ и, в результате, к корректному прогнозу разрушающей нагрузки (реальное разрушение произошло при нагрузке 3817,8 кг).

При температуре 350 °С и выше число событий АЭ существенно снижается и у некоторых материалов становится недостаточным для определе-



ния прогнозной разрушающей нагрузки. Здесь следует остановиться подробнее на принципе формирования событий в системе ЕМА-3. Под событием понимают результат близкого по времени срабатывания группы датчиков, ответственной за локацию АЭ в определенной области объекта контроля. Такая группа, позволяющая определить координаты источника АЭ сигнала по разнице времен прихода на различные датчики, называется локационной антенной.

В отличие от локации при помощи антенны так называемый зонный контроль основан на индивидуальной работе каждого датчика. Существенным преимуществом данного вида контроля является то, что он позволяет трактовать каждое срабатывание датчика как отдельное событие АЭ, а не объединяет в событие срабатывания всех входящих в антенну датчиков. При малом числе событий АЭ это иногда позволяет решить задачу прогноза, поскольку число событий увеличивается за счет такого технического приема минимум в два раза. Если же АЭ регистрирует преимущественно или только один датчик АЭ, при переходе к зонному контролю число зарегистрированных событий можно увеличить еще больше.

На рис. 9 приведен график испытания образца с поперечным надрезом из стали X18N10T при температуре 450 °С в режиме зонного контроля, за счет которого число событий удалось увеличить с 11 до 55, т. е. в 5 раз.

При этом события регистрируются практически на всех стадиях деформирования образца. Следует отметить и недостаток такого способа обработки АЭ данных: поскольку координаты событий АЭ в режиме зонного контроля не определяют, отбраковку технологических шумов, например,

связанных с работой системы нагружения, выполнить более сложно.

Указанный подход наиболее хорошо проявил себя применительно к стали 15X1M1Ф. Полученных в результате данных оказалось достаточно для того, чтобы в условиях нагрева до 500 °С корректно (с высокой вероятностью) спрогнозировать разрушение образца на самой начальной стадии при нагрузке 347 кг, т. е. менее 10 % от разрушающей (4209,8 кг). Видно (рис. 10), что при таком способе анализа АЭ информации высокая активность АЭ регистрируется уже на ранних стадиях нагружения, до достижения материалом пластичного состояния. Это представляется важным для контроля конструкций из данного материала, работающих в условиях высоких температур, и может послужить основой для создания соответствующих методов контроля.

Наиболее существенный вклад в увеличение числа событий АЭ, в том числе регистрируемых при высоких температурах, вносит сварка (см. табл. 2). При этом «заполненность» процесса нагружения событиями АЭ становится более равномерной (например, на рис. 11), что является хорошей предпосылкой для обнаружения развивающихся дефектов в конструкциях со сварными швами, работающих при высоких температурах, на различных, в том числе на ранних, стадиях деформирования.

Прогноз разрушения при таком числе событий АЭ корректен. В частности, образец, результаты испытания которого представлены на рис. 11, разрушился при максимальной нагрузке 1694 кг.

Обобщая полученные данные, можно отметить, что применительно к методу АЭ контролепригодность испытанных материалов различна. При высоких температурах метод АЭ наиболее

**Т а б л и ц а 3. Испытание образцо при нормальной температуре. Прогноз разрушения**

Время, с	Число событий АЭ	Текущее значение нагрузки, кг	Прогноз-минимум, кг	Прогноз-максимум, кг	Время до разрушения, с / разр. нагрузка, кг
<b>Сталь Ст3 при нормальной температуре</b>					
117	6	5206	10959	12047	291 / 7 904
163	11	6023	7830	9035	245 / 7 904
<b>Сталь 15X1M1Ф при нормальной температуре</b>					
98	7	5035	8392	9070	216 / 8360
<b>Сталь X18N10T с надрезом при нормальной температуре</b>					
52	7	1329	1901	3337	166 / 3818
188	10	3647	3101	3830	210 / 3818
<b>Сталь X18N10T с надрезом при температуре 450 °С</b>					
113	9	1903	2721	3673	179 / 2873
<b>Сталь 15X1M1Ф при температуре 500 °С</b>					
44	8	347	2748	4824	275 / 4210
<b>Сталь 20 при температуре 450 °С. Образец со сварным швом</b>					
117	67	1204	1390	1756	138 / 1695





чувствителен к развитию разрушения в стали 15Х1М1Ф, наименее чувствителен — в стали Х18Н10Т. Тем не менее, с применением дополнительных методических приемов даже в этом материале при высоких температурах методом АЭ может быть обнаружено развитие дефектов и выполнен прогноз разрушения.

### Выводы

Установлено изменение акустических характеристик исследованных материалов при повышении нагрева рабочей части образца свыше 350 °С. Нагрев приводит к уменьшению амплитуд тестовых сигналов и скорости АЭ в материале.

Состояние объектов, работающих при высоких температурах, может быть оценено при помощи метода АЭ для всех исследованных в настоящей работе классов материалов. Исключение составляет сталь Х18Н10Т, которая дает положительные результаты при наличии концентраторов напряжений.

Материал без дефектов или с незначительным их количеством с точки зрения проведения АЭ испытаний менее информативен при высоких температурах, и для определения состояния объектов контроля требуется высокая чувствительность измерительной аппаратуры и специальная методика измерений.

Для материала объектов с концентраторами напряжений, сварными соединениями или существенно развитыми дефектами АЭ испытания могут быть проведены с использованием стандартных методик.

При высоких температурах актуальной проблемой является обеспечение работы датчиков АЭ,

в связи с чем целесообразным представляется использование специальных волокон, снижающих температуру рабочего участка датчиков.

Выполняемый системой ЕМА-3 прогноз разрушающей нагрузки по данным АЭ зависит от объема получаемой АЭ информации. В тех случаях, когда ее недостаточно для принятия решения о состоянии объекта контроля, следует разрабатывать специальные приемы, позволяющие повысить информативность метода.

1. *Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 1* / Л.М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2009. — № 1. — С. 5–10.
2. *Особенности функционирования технологических трубопроводов при высоких температурах* / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, О. И. Бойчук и др. // Там же. — 2009. — № 2. — С. 5–10.
3. *Березина Т. Г., Бугай Н. В., Трунин И. И.* Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок. — Киев: Техника, 1991. — 120 с.
4. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2008. — 814 с.
5. *Недосека А. Я.* Техническая диагностика сварных конструкций / Машиностроение: Энциклопедия в 40 т. — Т. III–4. Технология сварки, пайки и резки / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 2006. — С. 742–744.
6. *Недосека С. А.* Исследование кинетики разрушения металлов на заключительных стадиях деформирования методом акустической эмиссии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев: Изд-во Ин-та проблем прочности, 1994. — 16 с.
7. *Стрижало В. А.* Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. — Киев: Наук. думка, 1978. — 238 с.
8. *Механические свойства металлов и сплавов* / Л. В. Тихонов, В. А. Кононенко, Г. И. Прокопенко, В. А. Рафаловский. — Киев: Наук. думка, 1968. — 468 с.