



# ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 12X18H10T ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 560°C

## Сообщение 1. Методика и некоторые результаты

**А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, А. А. ГРУЗД, М. А. ЯРЕМЕНКО, Л. Ф. ХАРЧЕНКО,  
И. Г. ВОЛОШКЕВИЧ** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

*Исследованы акустико-эмиссионные характеристики широко используемой в промышленности стали 12X18H10T в условиях нормальных и высоких (до 560 °C) температур при испытаниях на статическую прочность. Показаны особенности, характерные для процесса ее деформирования и разрушения, возникновения сопутствующей этому процессу АЭ. Установлено, что модернизированный испытательный стенд, выбранные образцы и методика испытаний обеспечивают получение АЭ характеристик стали 12X18H10T в условиях высокотемпературного нагружения, необходимых для диагностики состояния данного материала.*

*The acoustic-emission characteristics of steel 12Kh18N10T widely used in industry under the conditions of normal and high (up to 560 °C) temperatures during static strength tests were investigated. The peculiarities are shown peculiar for the process of its deformation and fracture, formation of AE followed this process. It was established, that modified test stand, selected specimens and test methods provide obtaining AE characteristics of steel 12Kh18N10T under conditions of high-temperature loading necessary for diagnostics of state of the given material.*

Учитывая широкое распространение в нефтехимических производствах и энергетике металлоконструкций и сложного технологического оборудования, работающих при высоких температурах (до 560 °C) и при этом малодоступных для применения традиционных средств неразрушающего контроля, разработка средств акустико-эмиссионного (АЭ) их диагностирования представляет чрезвычайно важную задачу [1].

Высокие температуры оказывают существенное влияние на прочностные свойства и эксплуатационные характеристики конструкционных сталей [2–4]. Исследование в лабораторных условиях АЭ характеристик наиболее часто применяемых в условиях высоких температур материалов является необходимым этапом при переходе к периодическому АЭ контролю, а затем и непрерывному АЭ мониторингу потенциально опасных объектов промышленности, в первую очередь химических производств, где температуры могут изменяться в диапазоне от криогенных до весьма высоких. Результаты высокотемпературных испытаний могут также быть полезны при АЭ исследованиях процессов сварки и плавки.

В качестве модельного материала, широко используемого в конструкциях предполагаемых объектов контроля, в данной работе изучена сталь 12X18H10T, проведены ее испытания на статическую прочность в условиях нормальных и высоких температур с целью определения особенностей возникновения сопутствующей этому процессу акустической эмиссии.

Сталь 12X18H10T — коррозионно-стойкая конструкционная сталь аустенитного класса. Приведем некоторые ее характеристики и особенности (по данным источника [5]). Назначение: изготовление деталей, выдерживающих температуры до 600 °C, сварных аппаратов и сосудов для разбавленных растворов азотной, уксусной, фосфорной кислот, растворов щелочей и солей, других деталей, работающих под давлением при температурах от –196 до +600 °C, а при наличии агрессивных сред — до +350 °C. Продукция из стали 12X18H10T используется в строительной, пищевой промышленности, в медицинском оборудовании. Бесшовные трубы из стали 12X18H10T широко применяются в нефтехимической отрасли, автомобилестроении, машиностроении и прочих областях промышленности. Сталь используют и в криогенной технике для изготовления сварных конструкций, работающих при температурах до –269 °C, и при изготовлении высокотемпературного емкостного, теплообменного и реакционного оборудования, в том числе паронагревателей и трубопроводов высокого давления с температурой эксплуатации до 600 °C, для деталей печной аппаратуры, муфелей, коллекторов выхлопных систем. Максимальная температура применения жаростойких изделий из этих сталей в течение 10000 ч составляет 800 °C, температура начала интенсивного окалинообразования — 850 °C. При непрерывной работе сталь устойчива против окисления на воздухе, в атмосфере продуктов сгорания топлива при температурах до 900 °C, в условиях резких изменений температур до 800 °C.



Химический состав стали 12X18H10T следующий, мас. %: не более 0,8 Si; не более 0,30 Cu; не более 2,0 Mn, 9,0...11,0 Ni; 0,6...0,8 Ti; не более 0,035 P; 17,0...19,0 Cr; не более 0,020 S.

Механические свойства стали 12X18H10T (состояние поставки — прутки сечением 60 мм, термообработка — закалка при 1020...1100 °С, воздух, масло или вода):  $\sigma_{0,2} = 196$  МПа;  $\sigma_b = 510$  МПа;  $\delta_5 = 40\%$ ;  $\psi = 55\%$ . Механические характеристики при высоких температурах приведены в табл. 1.

После стандартной термической обработки, состоящей из закалки с 1050 °С с охлаждением в воде, сталь имеет структуру раствора. Она не претерпевает каких-либо превращений при нагреве под горячую пластическую деформацию и при охлаждении до -196 °С. При длительных выдержках в интервале 450...650 °С наблюдается выделение карбидов хрома типа Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, что вызывает появление склонности к межкристаллитной коррозии с минимальным инкубационным периодом 8...10 ч при 600 °С (испытание в кипящей 65%-ной азотной кислоте, три цикла по 48 ч).

Хром, содержание которого в стали составляет 17...19 %, представляет собой основной элемент, обеспечивающий способность металла к пассивации и обеспечивающий ее высокую коррозионную стойкость. Легирование никелем при достаточном его количестве (8...12 %) приводит к образованию стали с аустенитной структурой, т.е. переводит сталь в аустенитный класс, что имеет принципиально важное значение, так как позволяет сочетать высокую технологичность стали с уникальным комплексом эксплуатационных характеристик. Такие стали имеют повышенную (по сравнению с ферритными) коррозионную стойкость в агрессивных средах, в том числе в серной и ряде других кислот. Они хорошо прокатываются в горячем и холодном состояниях, свариваются без охрупчивания околошовных зон. Влияние никеля на коррозионную стойкость в стали этого класса проявляется в том, что он, имея повышенное сопротивление действию кислот, передает это свойство стали.

Таким образом, проводимое исследование актуально как ввиду широкого применения данного

материала в промышленности, так и его высоких эксплуатационных качеств.

Представленному в работе исследованию предшествовали разработки:

- специализированного испытательного и контрольного оборудования для получения и исследования высокотемпературных АЭ характеристик конструкционных материалов;
- методики проведения высокотемпературных АЭ испытаний образцов стали 12X18H10T.

**Методика исследования** предусматривала отработку и изготовление специализированных образцов, предназначенных для нагрева, статическое растяжение их вплоть до момента разрушения, измерение и запись акустических характеристик исследуемого материала.

Разработано и изготовлено испытательное оборудование: печь с электронагревом до температур 560...600 °С и теплоизоляцией, захваты-переходники, адаптированные к разрывной машине Р-20.

Система получения акустических характеристик испытываемого материала представляет собой:

- акустические датчики-преобразователи типа ДАЭ-150;
- волноводы, рассчитанные для понижения рабочих температур в диапазоне от 120 °С на захвате разрывной машине до 25 °С на преобразователе АЭ;
- контрольно-диагностический комплекс на базе системы АЭ диагностики ЕМА-3.

Система получения, записи и обработки данных по испытательным температурам  $T_{исп}$  °С и испытательным нагрузкам  $P_{исп}$  включает:

- контролирующие термодары типа ТП 0188 с диапазоном измеряемых температур от -140 до +1000 °С;
- потенциометр с рабочим диапазоном 0...+5 В, контролирующий уровень нагрузки на испытываемый образец;
- АЭ комплекс ЕМА-3.

Таким образом, обеспечен комплексный и синхронный контроль параметров, необходимых для получения и анализа высокотемпературных АЭ характеристик испытываемого материала.

Проведенное ранее исследование [3] показало, что в диапазоне нагрева до 350 °С акустические характеристики сталей остаются практически неизменными, затем происходит уменьшение амплитуд принятых датчиками сигналов и снижение скорости прохождения волны через материал. Скорость определяли по задержкам времени прихода АЭ на установленные на объекте контроля датчики, учитывая, что известно расстояние между ними.

Предварительно была решена задача по отработке формы и геометрических размеров образцов материала 12X18H10T с целью оптимизации уровня затухания получаемых АЭ сигналов. Обеспечению условий эксперимента и поставленным задачам исследования удовлетворяет образец ци-

Таблица 1. Механические свойства стали 12X18H10T при повышенных температурах

$T_{исп.}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$	$KCU_{\frac{1}{2}}, \text{Дж/м}^2$
20	225...315	550...650	46...74	66...80	215...372
500	135...205	390...440	30...42	60...70	196...353
550	135...205	380...450	31...41	61...68	215...353
600	120...205	340...410	28...38	51...74	196...358
650	120...195	270...390	27...37	52...73	245...353
700	120...195	265...360	20...38	40...70	255...353



цилиндрической формы с концентратором напряжений в средней части — надрезом размером 1,0×2,5 мм (рис. 1), обеспечивающим сравнительно невысокий уровень затухания сигналов АЭ — амплитуда  $A$  не более 9...12 дБ.

Схема стенда для высокотемпературных АЭ испытаний конструкционных материалов представлена на рис. 2.

При испытаниях на статическое растяжение регистрировали температуру в рабочей части образца, нагрузку и акустическую эмиссию, а также проверяли алгоритм прогноза разрушающей нагрузки АЭ системы ЕМА-3 в условиях различной акустической активности.

Принятая в испытаниях схема использования электропечи с теплоизоляцией обеспечила равномерное прогревание и поддержание постоянной температуры по всему периметру испытуемого образца материала, а встроенные в печи термодатчики позволяют контролировать и обеспечивать постоянную температуру. С учетом эксплуатационных свойств материала 12Х18Н10Т при нагружении поддерживалась постоянная температура 560 °С с внесением ее величины в систему контроля.

Поддержание параметров нагружения разрывной машиной Р-20: нагрузка  $P_{исп}$  (0...10000 кгс) и ско-

рость нагружения  $V_{исп}$  ( $\approx 1000$  кгс/мин) также осуществлялось системой контроля.

В выбранной схеме испытаний особое внимание уделялось разработке и расчету применяемых волноводов [6, 7], обеспечивающих качественную передачу получаемых АЭ характеристик и низкий уровень затухания сигналов АЭ — не более 3...5 дБ. В качестве волновода использовали цилиндрический стержень из стали Ст3 диаметром 16 мм длиной 176 мм с винтовой нарезкой на концах — для крепления волновода к захватной части системы нагружения (длиной 27 мм) и для присоединения датчика АЭ (14 мм). Между датчиком и головкой волновода расположен тонкий слой акустопрозрачного материала для обеспечения надежной передачи сигналов. Расчет уменьшения температуры от нагреваемого торца до рабочей поверхности проводили по формуле:

$$T = T_{ср} + T_{нач} \exp\left(-z\sqrt{\frac{b}{a}}\right), \quad b = \frac{2\alpha a}{\lambda_0 r_c}, \quad a = \frac{\lambda_0}{c\gamma},$$

где  $T_{ср} = 20$  °С — температура окружающей среды на момент проведения измерения;  $T_{нач}$  — начальная температура;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $\gamma$  — удельный вес;  $c$  — удельная теплоемкость;  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности;  $r_c$  — радиус стержня;  $z$  — расстояние по длине волновода от переходника до датчика (100 мм).

Теплофизические постоянные для материала волновода выбирали из справочных материалов. Проведенные исследования показали, что при сделанном выборе геометрических размеров, формы и материала волноводов практически не уменьшается чувствительность датчиков АЭ в рабочем диапазоне частот, применение волноводов не оказывает существенного влияния на форму и амплитуду принимаемого сигнала.

**Основные результаты проведенного исследования.** На основании статистического анализа испытаний образцов из данного материала, учитывая его низкую акустическую активность, оценим, как влияет наличие концентраторов на повышение информативности метода АЭ. Данные табл. 2 четко показывают, что наличие надреза или сварного шва в материале обеспечивает в отличие от образцов без концентратора получение достаточно большого числа событий АЭ (рис. 3)

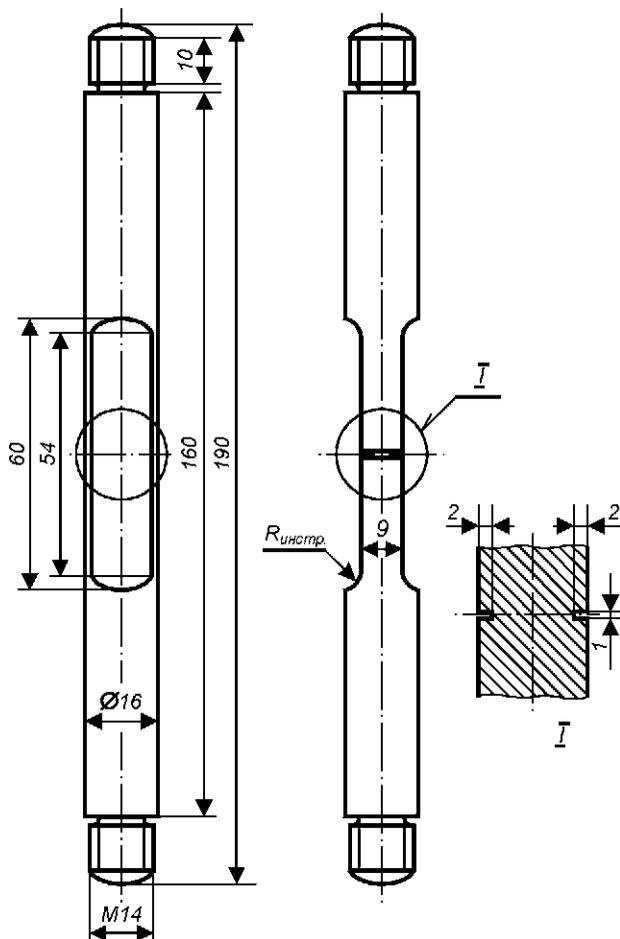


Рис. 1. Круглый образец с головкой диаметром 14 мм и надрезом-концентратором в рабочей части

Таблица 2. Снижение среднего числа событий АЭ при высоких температурах

Материал	Число событий АЭ	
	при нормальной температуре	при температуре 560 °С
Без шва	12	3
Со сварным швом	240	70
С надрезом	154	48

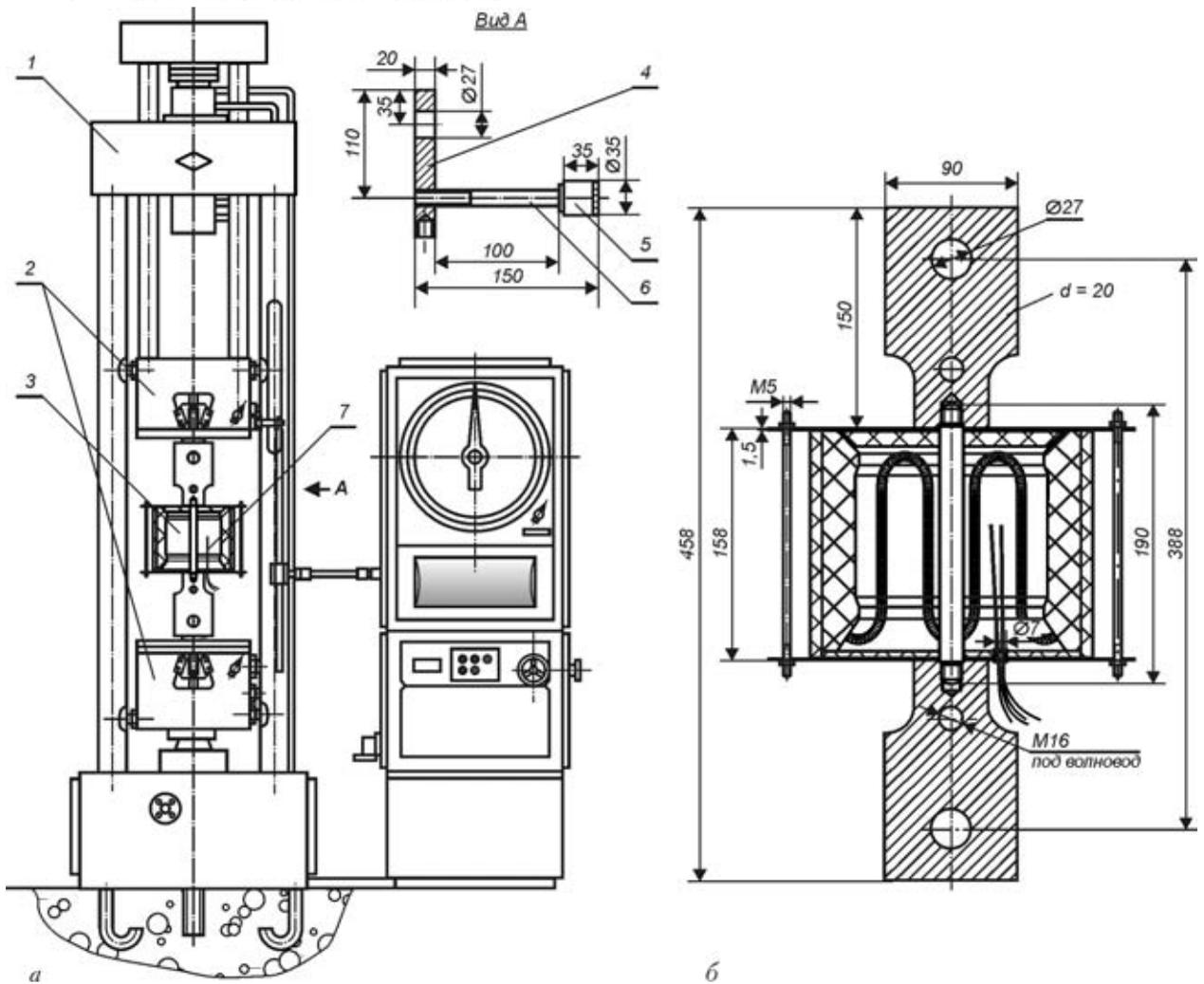


Рис. 2. Стенд для высокотемпературных испытаний образцов на основе машины Р-20 (а) и фрагмент установки с образцом круглого сечения в электропечи (б): 1 — система нагружения образца машины Р-20; 2 — верхняя и нижняя траверсы; 3 — высокотемпературная печь; 4 — переходник для составного захвата; 5 — датчик АЭ; 6 — волновод; 7 — термопара

даже при общем снижении АЭ активности в условиях высоких температур [3].

Поскольку образцы с надрезом менее АЭ активны по сравнению с образцами со сварным швом, наибольший интерес представляло исследование возможностей оценки именно их характеристик. Испытания показали, что с использованием принятой методики исследований может быть получено достаточно большое число событий АЭ, а определение их координат и кластерный анализ работают эффективно (рис. 3).

На рис. 4–6 представлены диаграммы испытаний образцов с зависимостью АЭ параметров от времени:

– рис. 4, а; 5, а, в; 6, а: синего цвета — столбчатый график амплитуд событий АЭ ( $A$ , дБ), красного — график нагрузки ( $P$ , кг), зеленого — график среднего уровня непрерывной АЭ ( $A_v$ , мВ), фиолетового — график суммарного числа событий АЭ ( $N$ , безразмерный);

– рис. 4, б; 5, б, г; 6, б: синего цвета — ступенчатый график амплитуд событий АЭ ( $A$ , дБ), красного — график нагрузки ( $P$ , кг), зеленого —

ступенчатый график времени нарастания сигнала до максимума ( $R$ , мкс), фиолетового — ступенчатый график числа осцилляций ( $C$ , безразмерный).

В нижней части графика указан параметр, откладываемый по оси абсцисс, и его размерность (в данном случае время, прошедшее от начала испытания).

Результаты испытания, приведенные на рис. 4, показывают крайне незначительную активность АЭ на протяжении всего процесса нагружения, хотя на стадии развития трещины зафиксированы пять событий АЭ из общего числа, равного восьми. Учитывая требования, предъявляемые системами семейства ЕМА к распознаванию процесса накопления повреждений, такого объема данных для прогнозирования развития разрушения по данным АЭ недостаточно. Тем не менее, отметим некоторые очевидные закономерности. Процесс накопления повреждений в данном случае происходит дискретно [8], но эта дискретность проявляется фактически через одинаковые интервалы времени. Каждый такой скачок поврежденности материала сопровождается ростом амплитуды АЭ



сигналов, увеличением числа осцилляций и времени нарастания сигнала.

В целом такая картина характерна для материалов с изначально низкой поврежденностью. Следует также отметить незначительные колебания непрерывной АЭ. Всплеск ее наблюдается только при возникновении первого события АЭ, соответствующего, вероятнее всего, началу развития пластической деформации в материале.

Разрушение образца визуально происходило плавно, слышимый при разрыве образца звук был негромким, что практически полностью соответствует невысокому уровню амплитуд АЭ сигналов при разрушении в сравнении с амплитудами, регистрируемыми в процессе нагружения. Контроль АЭ системой стали 12Х18Н10Т

требует особых методических подходов, поскольку при отсутствии концентраторов или накопленных в процессе эксплуатации дефектов такой материал является одним из наименее акустически активных материалов.

Испытание образцов с концентратором-выточкой (рис. 5), показывает наличие достаточно большого по сравнению с гладким образцом числа событий АЭ. В то же время картина распределения сигналов во времени и их численные характеристики для двух представленных образцов существенно отличаются. Наиболее важным является отличие АЭ картины в момент разрушения. Для образца № 1 характерным является сохранение в период развития трещины и при разрушении величин амплитуд сигналов  $A$ , числа осцилляций  $C$  и времени

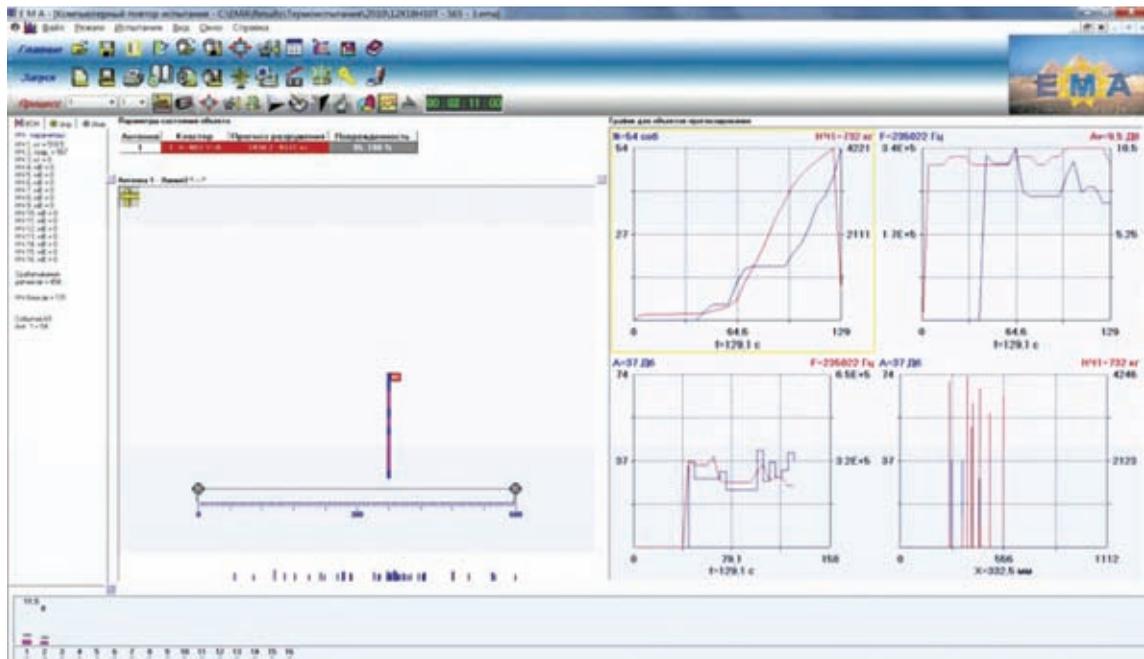


Рис. 3. Окно программы EMA-3.5. Испытание образца при температуре 560 °С. Левый большой экран — область отображения координат событий АЭ и их кластеризации. Над ним — экран прогноза разрушения и предупреждения об опасности. Правый экран — графики реального времени с различными параметрами процесса испытаний

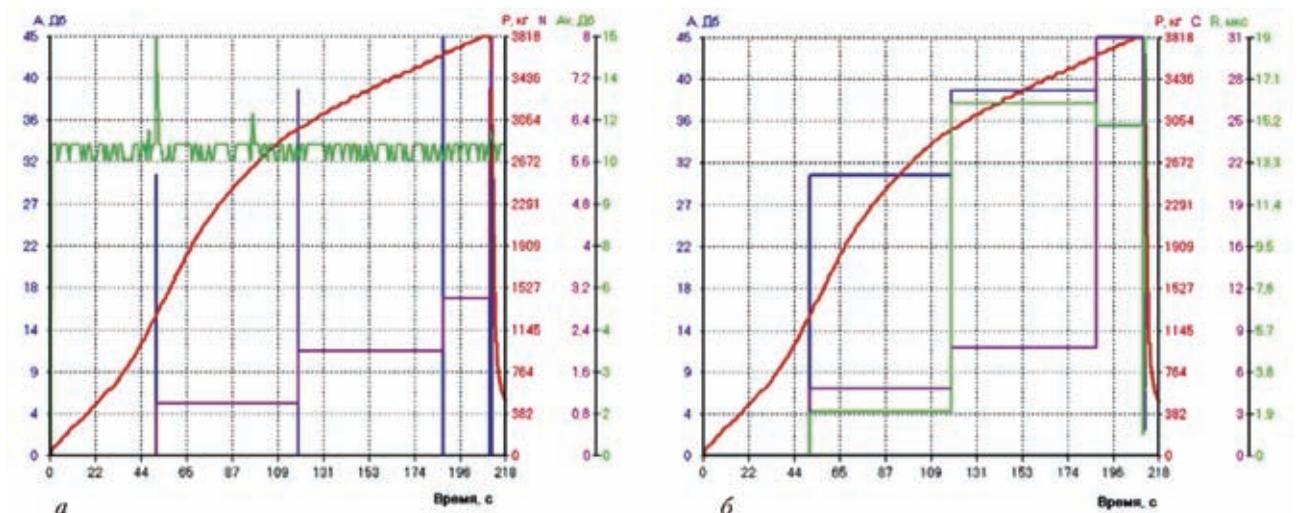


Рис. 4. Результаты испытаний образца без концентратора при нормальной температуре (+20 °С)

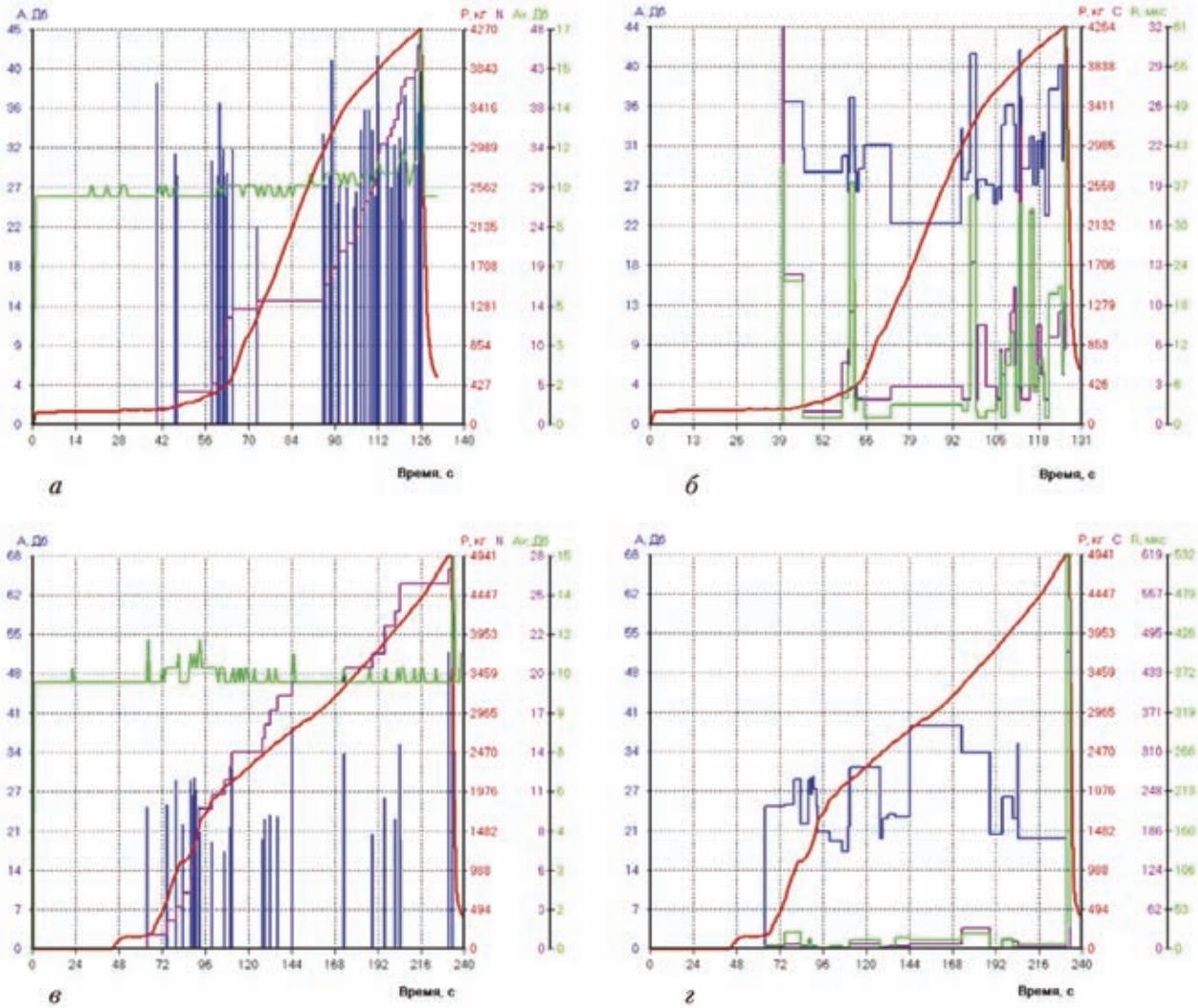


Рис. 5. Результаты испытаний двух образцов с концентратором при температуре 560-°С: а, б — образец № 1; в, г — № 2

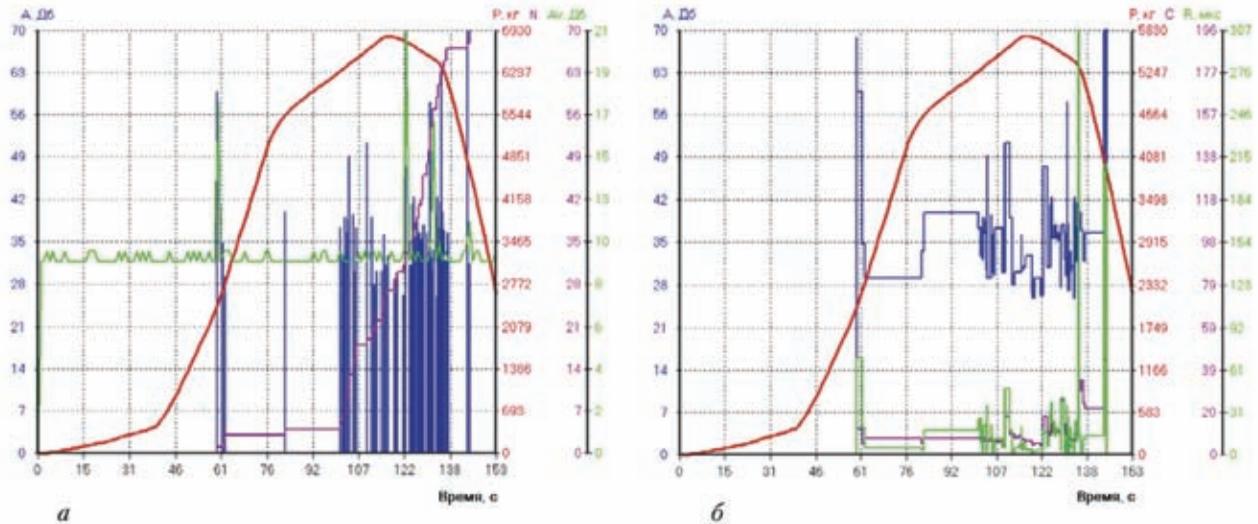


Рис. 6. Результаты испытаний образца со сварным швом при температуре 450 °С

нарастания сигнала до максимума  $R$  примерно в том же диапазоне, в котором они находились в процессе всего нагружения.

Для образца № 2, напротив, при в целом меньшей АЭ активности при разрушении наблюдается

существенный рост упомянутых выше характеристик. Так, амплитуда в процессе нагружения меняется в диапазоне 17...36 дБ, а при разрушении достигает 68 дБ, число осцилляций — соответственно 1...16 и 619, время нарастания до макси-



му — 1...29 и 582 мкс. Это очень существенные изменения, которые свидетельствуют о том, что для образца № 2 процесс образования и роста трещины происходит более динамично, с выделением большей энергии. Таким образом, единая картина разрушения одинаковых образцов из стали 12X18H10T в условиях высокотемпературного нагружения отсутствует.

Испытание сварного образца (рис. 6) по кинетике возникновения сигналов АЭ и их изменения в процессе нагружения наиболее соответствует образцу с надрезом № 2, представленному на рис. 5. Также наблюдается существенный рост амплитуд сигналов А, числа осцилляций С и времени нарастания сигнала до максимума R при переходе к развитию трещины и разрушению. Отличие состоит в том, что периодически возникают достаточно мощные сигналы и всплески непрерывной АЭ еще на ранних стадиях нагружения. Это можно предварительно объяснить наличием в образце остаточных сварочных напряжений и повреждений, внесенных процессом сварки, которые приводят к более раннему началу развития разрушения, формированию зон локализации пластических деформаций и образования пор [9].

Приведенные результаты свидетельствуют о достаточно высокой информативности метода в условиях высоких температур при условии наличия концентраторов напряжений, в качестве которых в проведенных экспериментах выступали надрезы в центральной части образца и сварные соединения.

Учитывая, что в данной серии испытаний, в отличие от приведенных в работах [2, 3], был обеспечен равномерный нагрев рабочей части образцов, результаты имеют ряд отличий. Их детальное изучение — предмет дальнейшего исследования. Тем не менее, следует отметить важность такой работы, поскольку здесь приведены данные типовых лабораторных исследований с равномерным нагревом рабочей части образцов, в упомянутых же выше статьях исследования проведены при неравномерном нагреве рабочей части, что соответствует условиям, приближенным к промышленным. Установление природы этих отличий и их описание является серьезным шагом к последующему промышленному применению систем АЭ мониторинга на высокотемпературных объектах контроля с эффективной оценкой их состояния.

## Выводы

Модернизированный испытательный стенд, выбранные образцы и волноводы, а также методика

испытаний обеспечивают получение АЭ характеристик стали 12X18H10T в условиях высокотемпературного нагружения, необходимых для диагностики данного материала.

Состояние объектов из стали 12X18H10T, работающих при высоких температурах (до 560 °С), может быть оценено при помощи метода АЭ. Это касается как определения координат развивающихся дефектов, так и отслеживания по данным АЭ процесса накопления повреждений в материале в процессе его нагружения.

При высоких температурах использование специальных волноводов, снижающих температуру рабочего участка датчиков, решает проблему обеспечения процедуры АЭ контроля.

Количественные параметры сигналов АЭ, регистрируемые для разных образцов в аналогичных температурно-силовых условиях нагружения, существенно отличаются и не могут быть однозначно истолкованы при описании процесса накопления повреждений и разрушения.

Перспективным представляется исследование и установление различий акустических свойств конструкционных материалов при высоких температурах в условиях равномерного и неравномерного нагрева.

1. Недосека А. Я., Недосека С. А. Об оценке надежности эксплуатирующихся конструкций (состояние вопроса и перспектива развития) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2010. — № 2. — С. 7–17.
2. Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 1. Методика / Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека, и др. // Там же. — 2009. — № 1. — С. 5–10.
3. Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 2 / Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека и др. // Там же. — 2009. — № 4. — С. 5–13.
4. 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.
5. Зубченко А. С., Колосков М. М., Каширский Ю. В. и др. Марочник сталей и сплавов / Под ред. А. Зубченко. — Изд. 2-е. — М.: Машиностроение, 2003. — 784 с.
6. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностика сварных конструкций. — Киев: Индпром, 2008. — 815 с.
7. Оптимизация акустико-электронного тракта при применении волноводов / А. Я. Недосека, М. А. Овсиенко, Л. Ф. Харченко, М. А. Яременко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 1. — С. 14–17.
8. Недосека А. Я., Недосека С. А. Акустическая эмиссия и квантовый характер разрушения материалов // Там же. — 2009. — № 3. — С. 11–17.
9. Недосека С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии // Там же. — 2007. — № 2. — С. 3–9.

Поступила в редакцию  
30.11.2010