

**Оригинальная статья**

УДК 537.9

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-4(46)-21-29

**ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЯХ**

© 2023 г. Е. А. Ожиганов<sup>1</sup>, С. В. Коновалов<sup>2</sup>, И. А. Панченко<sup>2</sup>, М. М. Баженова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Кузбасский центр сварки и контроля» (Россия, 650040, Кемерово, ул. Радищева, 1Б)

<sup>2</sup>Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Работа выполнена с применением физических методов материаловедения, разрушающих и неразрушающих испытаний. Исследованы образцы конструкционных углеродистых и низколегированных сталей марок Ст3сп, 10, 09Г2С, 17ГС. Проведен анализ изменений в структуре сварных соединений из конструкционных сталей под действием пластической деформации. Материалом для искусственных дефектов служили графит и толченое стекло, которые вводили в сварочную ванну. Представлены результаты исследования образцов с искусственными дефектами и бездефектных образцов, выполненных ручной дуговой сваркой и сваркой модулированным током. На основе математических закономерностей изменения параметров акустической эмиссии (АЭ) сигнала для исследуемых сталей марок Ст3сп, 10, 09Г2С, 17ГС разработан четырехпараметрический трехуровневый критерий определения стадии пластической деформации. Рассматриваемый критерий позволяет качественно оценить степень пластической деформации при стресс-испытаниях трубопроводов (по всей области локации АЭ), что особенно важно для труб с различным утонением стенки. В тонкой структуре зоны термического влияния сварки у линии сплавления и в наплавленном металле выявлены изгибные экстинкционные контуры, свидетельствующие о наличии внутренних напряжений. Число контуров возрастает по мере приближения к линии сплавления. Морфологическими составляющими независимо от способа сварки в структуре основного металла являются пластинчатый перлит и феррит, в структуре металла шва – пластинчатый перлит, феррит и мартенсит (объемная доля зависит от способа сварки).

**Ключевые слова:** ручная дуговая сварка, модулированный ток, микроструктура, углеродистая сталь, низколегированная сталь

**Для цитирования:** Ожиганов Е.А., Коновалов С.В., Панченко И.А., Баженова М.М. Влияние дефектов на структурно-фазовое состояние сварных соединений и параметры сигналов акустической эмиссии в конструкционных сталях. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;(4(46)):21–29. [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-4\(46\)-21-29](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-4(46)-21-29)

**Original article**

**INFLUENCE OF DEFECTS ON THE STRUCTURAL-PHASE STATE OF WELDED JOINTS AND PARAMETERS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS IN STRUCTURAL STEELS**

© 2023 E. A. Ozhiganov<sup>1</sup>, S. V. Konovalov<sup>2</sup>, I. A. Panchenko<sup>2</sup>, M. M. Bazhenova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LLC «Kuzbass Welding and Control Center» (1B Radishchev Str., Kemerovo, Russian Federation)

<sup>2</sup>Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

**Abstract.** The work was performed using physical methods of materials science, destructive and non-destructive testing. Samples of structural carbon and low-alloy steels of grades St3sp, 10, 09G2S, 17GS have been studied. The analysis of changes in the structure of welded joints made of structural steels under the influence of plastic deformation is carried out. The material for artificial defects was graphite and crushed glass, which were introduced into the welding bath. The results of the study of samples with artificial defects and defect-free samples made by manual arc welding and modulated current welding are presented. Based on the mathematical patterns of changes in the parameters of acoustic emission (AE) of the signal for the studied steels of grades St3sp, 10, 09G2S, 17GS, a four-parameter three-level criterion for determining the stage of plastic deformation has been developed. The criterion under consideration allows us to qualitatively assess the degree of plastic deformation during stress tests of pipelines (throughout the AE location area), which is especially important for pipes with different wall thinning. In the fine structure of the zone of thermal influence of welding at the fusion line and in the deposited metal, bending extinction contours were revealed, indicating the presence of internal stresses. The number of contours increases as you approach the fusion line. The morphological components, regardless of the welding method, in the structure of the base metal are lamellar perlite and ferrite, in the structure of the seam metal – lamellar perlite, ferrite and martensite (the volume fraction depends on the welding method).

**Keywords:** manual arc welding, manual arc welding with modulated current, microstructure, carbon and low alloy steels

**For citation:** Ozhiganov E.A., Konovalov S.V., Panchenko I.A., Bazhenova M.M. Influence of defects on the structural-phase state of welded joints and parameters of acoustic emission signals in structural steels. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;(4(46)):21–29. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-4\(46\)-21-29](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-4(46)-21-29)

## Введение

В настоящее время, несмотря на разработку и внедрение большого количества новых материалов, основными материалами, применяемыми в промышленности, остаются конструкционные углеродистые и низколегированные стали марок СтЗсп, 10, 09Г2С, 17ГС. Эксплуатация промышленного оборудования зачастую проходит в экстремальных условиях: при повышенных механических и циклических нагрузках, под воздействием агрессивных сред, коррозионного и эрозийного износа. Надежность и долговечность промышленного оборудования, изготовленного из конструкционных сталей, напрямую зависят от своевременности и качества проведения работ по оценке их состояния. Известно, что традиционные испытания не всегда способны выявить существующие повреждения металла и деградацию его свойств, что зачастую приводит к крупным авариям и разрушениям в процессе эксплуатации [1 – 3]. Кроме разрушающих и неразрушающих методов испытаний, для оценки состояния основного металла и сварных швов применяют стресс-тест [4]. В результате испытания должно происходить снижение локальных остаточных напряжений и деформаций, возникших при производстве и монтаже, локализация и торможение развития трещиноподобных дефектов, а также установление реального запаса прочности по отношению к рабочим нагрузкам [5]. Вопрос обеспечения эффективности этих испытаний изучен недостаточно, а выбор испытательных нагрузок не учитывает множество факторов (структурное состояние основного и наплавленного металла, поля внутренних напряжений,

влияние дефектов сварных соединений и другое). Испытательные нагрузки выбираются эмпирическим путем. Для успешного выбора параметров испытаний конструкционных сталей необходимы знания структурных и фазовых превращений в процессе их проведения. Таким образом, установление закономерностей изменения структурно-фазовых состояний и внутренних напряжений конструкционных сталей при деформации актуально и имеет большое практическое значение.

## Материалы и методы исследования

Работа выполнена на основе физических методов материаловедения, разрушающих и неразрушающих испытаний. Проведены механические испытания по ГОСТ 6996 – 66 (на универсальной разрывной машине Walter + Bai AG LFM-125 (Швейцария); средняя скорость нагружения составляла 20 Н/с). Регистрация АЭ-сигналов (АЭ-система *A-Line 32D* («Интерюнис», Россия) представляет собой восьмиканальную систему сбора и обработки информации акустической эмиссии (АЭ), получаемой в реальном масштабе времени, для исследуемого объекта от акустических датчиков при проведении эксперимента. Просвечивающая дифракционная электронная микроскопия проведена на тонких фольгах (электронный микроскоп ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ). Рабочее увеличение в колонне микроскопа составляло 25000 крат. Рентгеноструктурный анализ (дифрактометр ДРОН-7) проводили при комнатной температуре при напряжении 30 кВ и анодном токе 30 мА. В

эксперименте была применена рентгеновская трубка с медным катодом.

### Основные результаты

Образцы под сварку представляли собой пластины  $250 \times 125 \times 5$  мм, разделка кромок – С17 (ГОСТ 5264 – 80). Сварку одной половины исследуемых образцов проводили ручной дуговой сваркой (РДС), другой половины – ручной дуговой сваркой модулированным током (РДСМТ). Для имитации условий реальных производственных объектов, а также исследования часть образцов выполняли с искусственными дефектами. Материалом для искусственных дефектов служили графит и толченное стекло, которые вводили в сварочную ванну. Таким образом, моделировали графитные и силикатные неметаллические включения.

Введение искусственных дефектов при ручной дуговой сварке приводит к тому, что в структуре основного металла объемная доля фрагментированного феррита несколько увеличивается, а нефрагментированного уменьшается. Перлит отсутствует полностью. В структуре материала шва присутствует феррит (только фрагментированный) и мартенсит.

При РДСМТ введение искусственных дефектов приводит к тому, что в структуре основного металла присутствует только феррит. Доля нефрагментированного феррита по сравнению с РДС уменьшается до 15 %, а фрагментированного – увеличивается до 85 %. В структуре материала шва введение искусственных дефектов

также уменьшает объемную долю феррита (55 % фрагментированного, 15 % нефрагментированного) и увеличивает долю пластинчатого перлита (10 % неразрушенного, 10 % разрушенного) и мартенсита.

Ручная дуговая сварка в металле шва приводит к самым низким значениям  $\rho$  (рис. 1, *a*). Введение искусственных дефектов при РДС приводит к резкому увеличению  $\rho$ . Отметим, что введение искусственных дефектов при РДС приводит к более заметным изменениям, чем при РДСМТ [6, 7].

В основном металле средняя скалярная плотность дислокаций слабо зависит от способа сварки (рис. 1, *a*). Тем не менее, как при РДС, так и при РДСМТ введение искусственных дефектов приводит к уменьшению средней скалярной плотности дислокаций  $\rho$  (рис. 1, *a*).

Дислокационная структура при всех способах сварки, как в основном металле, так и в металле шва поляризована. Об этом свидетельствует присутствие в структуре изгибных экстинкционных контуров. По параметрам изгибных экстинкционных контуров были определены избыточная плотность дислокаций (рис. 1, *b*) и амплитуда внутренних дальнедействующих напряжений ( $\sigma_d$ ), средние величины которых при разных методах сварки представлены на рис. 2.

В металле шва при сварке способами РДС и РДС с введением искусственных дефектов скалярная плотность дислокаций  $\rho$  больше избыточной  $\rho_{\pm}$ , амплитуда напряжений сдвига  $\sigma_d$  пре-

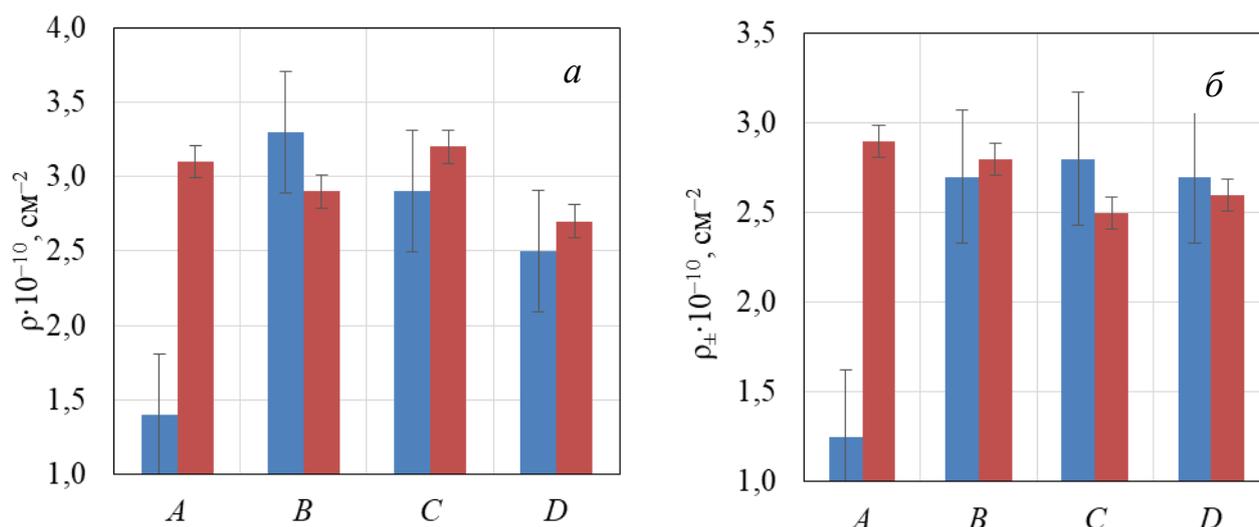


Рис. 1. Влияние искусственных дефектов на средние по материалу скалярную (*a*) и избыточную (*b*) плотности дислокаций: *A* – РДС; *B* – РДС с введением искусственных дефектов; *C* – РДСМТ; *D* – РДСМТ с введением искусственных дефектов; ■ – металл шва; ■ – основной металл (здесь и на рис. 2)

Fig. 1. The effect of artificial defects on the average scalar (*a*) and excess (*b*) dislocation densities of the material: *A* – RDS; *B* – RDS with the introduction of artificial defects; *C* – RDSMT; *D* – RDSMT with the introduction of artificial defects; ■ – seam metal; ■ – base metal (here and in fig. 2)

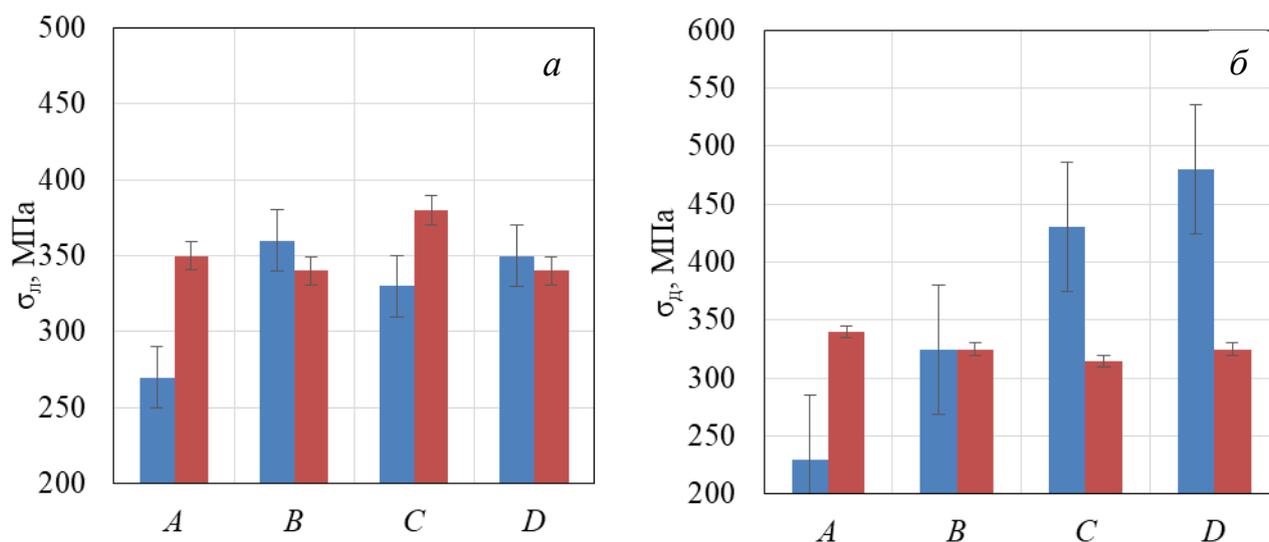


Рис. 2. Влияние искусственных дефектов на среднюю амплитуду внутренних напряжений сдвига  $\sigma_{л}$  (а) и дальнодействующих напряжений  $\sigma_{д}$  (б)

Fig. 2. The effect of artificial defects on the average amplitude of internal shear stresses  $\sigma_{л}$  (a) and long-range stresses  $\sigma_{д}$  (b)

вышает амплитуду внутренних дальнодействующих напряжений  $\sigma_{д}$  ( $\rho > \rho_{\pm}$  и  $\sigma_{л} > \sigma_{д}$ ). Изгиб кристаллической решетки носит пластический характер [8 – 10]. Методы РДСМТ и РДСМТ с введением искусственных дефектов приводят к тому, что  $\rho < \rho_{\pm}$  и  $\sigma_{л} < \sigma_{д}$ . Это означает, что изгиб кристаллической решетки при данных методах сварки является упругопластическим. Структура стали после РДС характеризуется самыми низкими значениями  $\rho$ ,  $\rho_{\pm}$ ,  $\sigma_{л}$  и  $\sigma_{д}$  (рис. 1, 2). Это приведет к самому низкому вкладу в упрочнение на пределе текучести материала шва по сравнению с другими способами сварки. Введение искусственных дефектов при РДС увеличивает все количественные параметры структуры ( $\rho$ ,  $\rho_{\pm}$ ,  $\sigma_{л}$  и  $\sigma_{д}$ ). Введение искусственных дефектов при РДС приводит к более заметным изменениям в структуре материала шва, чем при РДСМТ.

Исследования показали, что независимо от способа сварки сохраняются неравенства  $\rho > \rho_{\pm}$  и  $\sigma_{л} > \sigma_{д}$ . Это означает, что при всех способах сварки изгиб кристаллической решетки носит пластический характер [11].

Деформация включает в себя несколько стадий (макроупругая деформация; легкое скольжение (текучесть); линейное упрочнение; параболическое упрочнение). Сигнал АЭ является отображением процесса разрушения не только макро- (образование и развитие трещин), но и микроуровня (образование, движение и аннигиляция дислокаций). Активность АЭ напрямую связана с характером пластической деформации, хотя для различных материалов будет отличаться между собой [12 – 14]. Резкое изменение активности АЭ

при увеличении деформации свидетельствует об изменении механизма деформации.

Проведя математический анализ [15 – 17] кривых изменения параметров АЭ при деформации исследуемых образцов (рис. 2, 3), которые являются типовыми для углеродистых конструкционных сталей, можно заметить определенные закономерности. Отметим, что в работах [11, 18] установлена пропорциональная зависимость между скоростями деформации и счета (активностью) АЭ, следовательно, скорость деформации в проведенном анализе принимается за положительную константу.

Теоретически упругие деформации не вызывают АЭ, так как активность АЭ-сигнала напрямую связана с характером пластического деформирования. Регистрацию АЭ в области упругих деформаций (рис. 3, область I) можно объяснить появлением в материале пластически деформируемых микрообъемов уже при низкой нагрузке [13, 19 – 21]. Рассматриваемый этап характеризуется возрастанием суммарного счета, высокой активностью АЭ и убыванием (возрастанием) амплитуды сигнала при постоянной скорости деформации. Производные суммарного счета от деформации положительна, амплитуды от деформации не равна нулю, деформации от времени – постоянная положительная величина.

Градиенты пластической деформации на фронте очень велики. Источники АЭ практически полностью сосредоточены на этих фронтах. В работе [22] это было экспериментально подтверждено одновременной регистрацией фронта перемещающейся полосы и локацией источников АЭ.

**Критерий определения стадии пластической деформации по параметрам АЭ сигнала  
при  $\varepsilon > 0$  и  $\dot{\varepsilon} = \text{const} > 0$   
Criterion for determining the stage of plastic deformation according to the parameters of the AE signal  
at  $\varepsilon > 0$  and  $\dot{\varepsilon} = \text{const} > 0$**

| $k_{\text{СИ}}$ | Стадия пластической деформации                            | Параметры АЭ сигнала |                         |                          |   |
|-----------------|---|----------------------|-------------------------|--------------------------|---|
|                 |   | $N''(\varepsilon)$   | $\bar{U}'(\varepsilon)$ | $\bar{U}''(\varepsilon)$ | $\bar{N}_{\Sigma_{i+1}}/\bar{N}_{\Sigma_i}$ |
| <i>A</i>        | Предел текучести ( <i>I</i> → <i>II</i> )                 | < 0                  | –                       |                          | ≤ 1   |
| <i>B</i>        | Площадка текучести ( <i>II</i> )                          | 0                    | > 0                     |                          | 1   |
| <i>C</i>        | Переход к линейному упрочнению ( <i>II</i> → <i>III</i> ) | > 0                  | –                       |                          | > 1   |

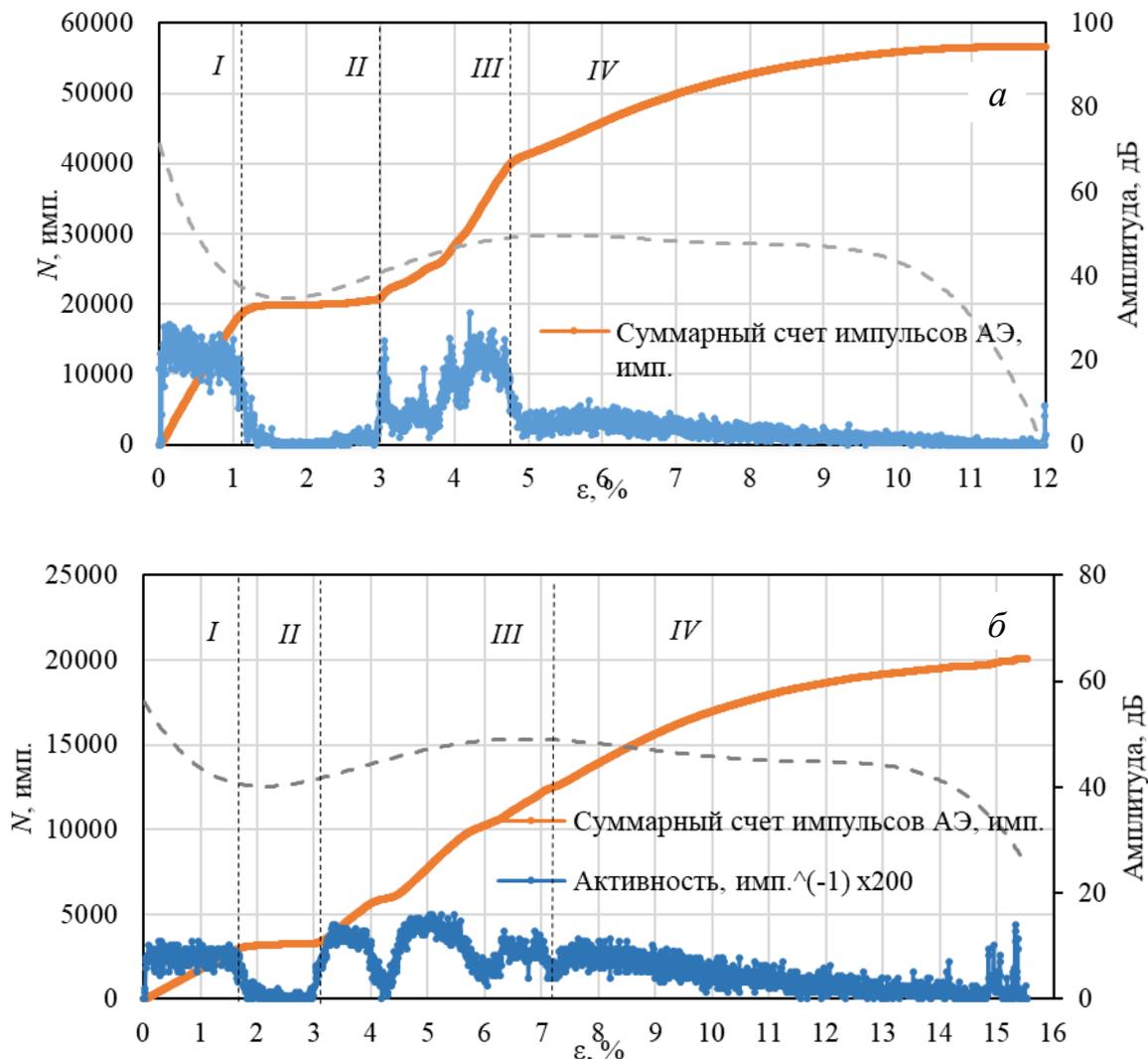


Рис. 3. Изменение АЭ характеристик при нагружении образцов из стали марки 09Г2С, выполненных РДСМТ (*a*) и РДС (*б*) до разрушения:  
*I, II, III* и *IV* – этапы макроупругих деформаций, легкого скольжения (текучести), линейного упрочнения и параболического упрочнения  
Fig. 3. Change of AE characteristics during loading of samples made of steel grade 09G2S, made by DSM (*a*) and RDS (*b*) before destruction  
*I, II, III* and *IV* – stages of macroelastic deformations, light sliding (fluidity), linear hardening and parabolic hardening

Резкое изменение кривой суммарной АЭ с увеличением нагрузки и снижение амплитуды (после 2 % деформации) связаны с тем, что на стадии параболического упрочнения перемещающиеся деформационные фронты отсутствуют. Согласно правилу соответствия типов автоволн

локализованной деформации стадиям деформационной кривой [23] при параболическом упрочнении возникает стационарная диссипативная структура, которая представляет собой эквидистантную систему очагов пластической деформации, в которых амплитуда деформации

выше, чем в окружающих областях [24 – 27]. При этом градиенты деформации на границах очагов существенно ниже, чем на движущихся фронтах на площадке текучести. Естественным образом амплитуды импульсов АЭ на рассматриваемой стадии снижаются. Уменьшается и суммарная АЭ, однако возрастает разброс импульсов по амплитудам.

Одной из важнейших характеристик метода АЭ для понимания процессов, происходящих в исследуемом объекте, являются координаты источников импульсов. Существуют два основных способа локализации источников АЭ: временной (основанный на разности времен прихода (РВП) сигнала на ПАЭ) и амплитудный (основанный на зависимости затухания акустической волны от расстояния между источником АЭ и ПАЭ) [11, 28, 29]. Для полного понимания характера деформации объекта исследования применяли локализацию как по РВП, так по затуханию амплитуды АЭ.

В таблице представлен критерий  $k_{СИ}$  определения стадий пластической деформации по параметрам сигналов АЭ.

Рассматриваемый критерий представляет собой четырехпараметрическую трехуровневую систему. Каждый из параметров (активность, амплитуда и суммарный счет, а также производные от них) является легко вычисляемой современными программно-аналитическими средствами характеристикой. После вычисления эти параметры группируются и логически соотносятся к тому или иному уровню критерия.

Уровню критерия *A* соответствует деформация начала перехода к легкому скольжению (предел текучести). Рассматриваемый уровень критерия является предварительным, сигнализирующим о скором достижении заданной нагрузки при СИ.

Уровню критерия *B* соответствует деформация площадки текучести. Он показывает достижение заданного уровня нагрузки при СИ.

Уровню критерия *C* соответствует деформация перехода от легкого скольжения к линейному упрочнению. При достижении этого уровня критерия необходимо немедленно остановить испытания и сбросить давление, поскольку испытательное давление превышает заданное.

### Выводы

В тонкой структуре зоны термического влияния сварки у линии сплавления и в наплавленном металле выявлены изгибные экстинкционные контуры, свидетельствующие о наличии внутренних напряжений. Число контуров возрастает по мере приближения к линии сплавления. Ручная дуговая сварка модулированным

током углеродистых сталей формирует в зоне линии сплавления поля внутренних напряжений с амплитудами ниже, чем после ручной дуговой сварки, что способствует повышению качества сварных соединений, выполняемых этим способом в сложных условиях.

Морфологическими составляющими независимо от способа сварки в структуре основного металла являются пластинчатый перлит и феррит, в структуре металла шва – пластинчатый перлит, феррит и мартенсит (их объемная доля зависит от способа сварки).

Влияние искусственных дефектов в сварных соединениях конструкционных сталей марок СтЗсп, 10, 09Г2С, 17ГС независимо от способа сварки проявляется в виде снижения уровня напряжения начала стадии микропластичности, уменьшения средних амплитуд сигналов АЭ в этом интервале нагрузок и возрастания дисперсии амплитуд сигналов АЭ.

На основе математических закономерностей изменения параметров АЭ сигнала для исследуемых сталей марок СтЗсп, 10, 09Г2С, 17ГС, разработан четырехпараметрический трехуровневый критерий определения стадии пластической деформации по параметрам АЭ сигнала. Рассматриваемый критерий позволяет качественно оценить степень пластической деформации при стресс-испытаниях трубопроводов (по всей области локации АЭ), что особенно важно для труб с различным утонением стенки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов В.В., Григорьев Е.В., Артющенко А.П., Перетятко С.А. Многоуровневая модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии как основа нанодиагностики состояния технических объектов. В кн.: *Нанопизика и наноматериалы: Сборник научных трудов*. Санкт-Петербургский горный университет. 2019. С. 173–178.
2. Иванов В.И., Барат В.А. *Акустико-эмиссионная диагностика*. Москва: Спектр, 2017. 362 с.
3. Zubova E.M., Strungar E.M., Lobanov D.S., Wildemann V.E. Experimental study of the damage accumulation in composite materials and ceramic coatings by using of acoustic emission technique. *Procedia Structural Integrity*. 2019;17:822–827. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.109>
4. Смирнов А.Н., Ожиганов Е.А. Акустическая эмиссия при различных степенях деформации и способах сварки стали СтЗсп. *Вестник КузГТУ*. 2014;6:68–72.
5. Сыромятникова А. С., Гуляева Е.М., Алексеева К.И. Расчетно-экспериментальная оценка прочностных свойств металла дли-

- тельно эксплуатируемого газопровода. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2016;8:61–65.
6. Nikolaev S., Benin A. Analysis of the possibility of detecting inhomogeneous metal inclusions in welded joints of rails under ultrasonic control. *International scientific siberian transport forum TransSiberia*. 2021;1:674–682. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4\\_73](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_73)
  7. Rafikov S.K., Sharnina G.S., Kozhaeva K.V., Valtolin A.P. analysis of reliability of welded connections liquefied gas and condensate pipelines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;988:022053 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022053>
  8. Grin' E.A., Zelenskii A.V. Performance of a steam pipeline with defects in knot welded joints. *Power technology and engineering*. 2021;54(5):714–719 <https://doi.org/10.1007/s10749-020-01275-y>
  9. Chen H., Liu H., Chen Zh. Failure pressure of welded hollow spherical joints containing grooving corrosion defects and wall reduction. *International Journal of Steel Structures*. 2021;21(1):35–51. <https://doi.org/10.1007/s13296-020-00414-5>
  10. Malikov V., Ishkov A., Nikonov L. Application of an ultra-compact eddy-current transducer for investigation of defects in welded joints of high-strength steel. *Materials Science Forum*. 2021;1037:400–408. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.400>
  11. Смирнов А.Н., Абабков Н.В., Попова Н.А., Никоненко Е.Л., Ожиганов Е.А., Калашников М.П., Конева Н.А. Влияние способа сварки на структурно-фазовое состояние зоны термического влияния сварного соединения стали 09Г2С. В кн.: *Структура. Напряжения. Диагностика. Ресурс. Сборник трудов, посвященный 70-летию доктора технических наук, профессора А.Н. Смирнова*. Кемерово: КузГТУ, 2017:266–276.
  12. Гомера В. П., Смирнов А. Д., Нефедьев Е. Ю., Потапов А.И., Зотов К.В. Обнаружение методом акустической эмиссии трещин в сварном шве в процессе сварки. *Контроль. Диагностика*. 2016;7:25–32.
  13. Науменко А.П., Язовский А.В. Эмпирические характеристики акустико-эмиссионных сигналов. *Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018) Сборник материалов*. 2018:144–145.
  14. Ожиганов Е.А., Коновалов С.В. Акустическое отображение стадийности процесса деформации конструкционной стали 09Г2С. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2021;18(1):43–48.
  15. Смирнов А.Н., Попова Н.А., Ожиганов Е.А., Никоненко Е.Л., Абабков Н.В., Калашникова М.П., Конева Н.А. Формирование структурно-фазового состояния в сварном шве при деформации. В кн.: *Структура. Напряжения. Диагностика. Ресурс. Сборник научных трудов, посвященный 70-летию доктора технических наук, профессора А.Н. Смирнова*. Кемерово: КузГТУ, 2017:153–166.
  16. Зорич В.А. *Математический анализ. Ч. I*. Москва: МЦНМО, 2019:564.
  17. Туганбаев А.А. *Математический анализ. Ряды*. Москва: Флинта, 2012:48.
  18. Ghader Faraji, Kim H.S., Hessam Torabzadeh Kashi. *Severe plastic deformation: methods, processing and properties*. 2018:324.
  19. Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф. Физические основы акустико-эмиссионного мониторинга. *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2017;10-4(30):145–152.
  20. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Иванов В.И., Елизаров С.В. Акустико-эмиссионные свойства оксидных тензоиндикаторов и распознавание сигналов при образовании трещин в хрупком слое покрытия. *Дефектоскопия*. 2015;2:48–60.
  21. Крюков Л.Т. Определение момента перехода материала из пластичного состояния в хрупкое с использованием параметров микропластической деформации. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2013;5(102):48–53.
  22. Никитин Е.С., Семухин Б.С., Зуев Л.Б. Локализованное пластическое течение и пространственно-временное распределение сигналов акустической эмиссии. *Письма в Журнал Технической Физики*. 2008;34(15):70–74.
  23. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. *Физика макролокализации пластического течения*. Новосибирск: Наука, 2008:327.
  24. Szyakin R., Voronin V., Gapon N., Zelensky A., Pizurica A. Automatic detection of welding defects using the convolutional neural network. *Proceedings of spie the international society for optical engineering*. 2019:110610E. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2525643>
  25. Bovyryn D.A., Surikov P.V., Filippova O.V., Kalugina E.V. On the causes of defects in the welded joints of pipes made of pe100. *Moscow University Chemistry Bulletin*. 2020:142–147. <https://doi.org/10.3103/S0027131420020030>
  26. Muravyov S.V., Pogadaeva E.Y. Computer-aided recognition of defects in welded joints during visual inspections based on geometric attributes. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020: 259–267. <https://doi.org/10.1134/S1061830920030055>

27. Szeziński A., Murawski L., Muc A., Muchowski T., Kluczyk M. Application of laser vibrometry to assess defects in ship hull's welded joints' technical condition. *Sensors*. 2021;21(3):895. <https://doi.org/10.3390/s21030895>
28. Терентьев В.Ф., Рошупкин В.В., Пенкин А.Г., Пенкин М.А. Влияние содержания марганца на механическое поведение и акустико-эмиссионные характеристики тонколистовой трип-стали при статическом растяжении. *Деформация и разрушение материалов*. 2019;2:36–41. <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2019-2-36-41>
29. Иншаков Д.В., Кузнецов К.А. Диагностика технического состояния теплообменных аппаратов методом акустической импульсной рефлектометрии на опасных производственных объектах. *Наука и техника*. 2019;12:24–29. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-12-24-29>
- #### REFERENCES
- Nosov V.V., Grigor'ev E.V., Artyushenko A.P., Peretyatko S.A. Multilevel model of time dependences of acoustic emission parameters as a basis for nanodiagnostics of the state of technical objects. In: *Nanophysics and Nanomaterials: Collection of scientific papers*. St. Petersburg Mining University. 2019:173–178. (In Russ.).
  - Ivanov V.I., Barat V.A. *Acoustic emission diagnostics*. Moscow: Spektr, 2017, 362 p. (In Russ.).
  - Zubova E.M., Strungar E.M., Lobanov D.S., Wildemann V.E. Experimental study of the damage accumulation in composite materials and ceramic coatings by using of acoustic emission technique. *Procedia Structural Integrity*. 2019;17:822–827. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.109>
  - Smirnov A.N., Ozhiganov E.A. Acoustic emission at various degrees of deformation and welding methods of steel St3sp. *Vestnik KuzG-TU*. 2014;6:68–72. (In Russ.).
  - Syromyatnikova A.S., Gulyaeva E.M., Alekseeva K.I. Computational and experimental evaluation of the strength properties of the metal of a long-term gas pipeline. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2016;8:61–65. (In Russ.).
  - Nikolaev S., Benin A. Analysis of the possibility of detecting inhomogeneous metal inclusions in welded joints of rails under ultrasonic control. *International scientific siberian transport forum TransSiberia*. 2021;1:674–682. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4\\_73](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_73)
  - Rafikov S.K., Sharnina G.S., Kozhaeva K.V., Vatolin A.P. analysis of reliability of welded connections liquefied gas and condensate pipelines. *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;988:022053 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022053>
  - Grin' E.A., Zelenskii A.V. Performance of a steam pipeline with defects in knot welded joints. *Power Technology and Engineering*. 2021;54;5:714–719 <https://doi.org/10.1007/s10749-020-01275-y>
  - Chen H., Liu H., Chen Zh. Failure pressure of welded hollow spherical joints containing grooving corrosion defects and wall reduction. *International Journal of Steel Structures*. 2021;21(1):35–51. <https://doi.org/10.1007/s13296-020-00414-5>
  - Malikov V., Ishkov A., Nikonov L. Application of an ultra-compact eddy-current transducer for investigation of defects in welded joints of high-strength steel. *Materials Science Forum*. 2021;1037:400–408. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.400>
  - Smirnov A.N., Ababkov N.V., Popova N.A., Nikonenko E.L., Ozhiganov E.A., Kalashnikov M.P., Koneva N.A. The influence of the welding method on the structural and phase state of the zone of thermal influence of the welded joint of steel 09G2S. In: *Structure. Tension. Diagnostics. Resource: collection of works dedicated to the 70th anniversary of Doctor of Technical Sciences, Professor A.N. Smirnov*. Kemerovo: KuzSTU, 2017:266–276. (In Russ.).
  - Gomera V.P., Smirnov A.D., Nefed'ev E.Yu., Potapov A.I., Zotov K.V. Detection by acoustic emission of cracks in the weld during welding. *Kontrol'. Diagnostika*. 2016;7:25–32. (In Russ.).
  - Naumenko A.P., Yazovskii A.V. Empirical characteristics of acoustic emission signals. *Aktual'nye problemy metoda akusticheskoi emissii (APMAE-2018) Sbornik materialov*. 2018:144–145. (In Russ.).
  - Ozhiganov E.A., Kononov S.V. Acoustic display of the stages of the deformation process of structural steel 09G2S. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2021;18(1):43–48. (In Russ.).
  - Smirnov A.N., Popova N.A., Ozhiganov E.A., Nikonenko E.L., Ababkov N.V., Kalashnikova M.P., Koneva N.A. Formation of the structural-phase state in the weld during deformation. In: *Structure. Tension. Diagnostics. Resource collection of scientific papers dedicated to the 70th anniversary of Doctor of Technical Sciences, Professor A.N. Smirnov*. Kemerovo: KuzSTU, 2017:153–166. (In Russ.).
  - Zorich V.A. *Mathematical analysis. Part I*. Moscow: MTsNMO, 2019:564. (In Russ.).
  - Tuganbaev A.A. *Mathematical analysis. Rows: textbook*. Moscow: Flinta, 2012:48. (In Russ.).

18. Ghader Faraji, Kim H.S., Hessam Torabzadeh Kashi. *Severe plastic deformation: methods, processing and properties*. 2018:324.
19. Tomilin N.G., Makhmudov Kh.F. Physical fundamentals of acoustic emission monitoring. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*. 2017;10-4(30):145–152. (In Russ.).
20. Matvienko Yu.G., Vasil'ev I.E., Ivanov V.I., Elizarov S.V. Acoustic-emission properties of oxide strain indicators and signal recognition during crack formation in a brittle coating layer. *Defektoskopiya*. 2015;2:48–60. (In Russ.).
21. Kryukov L.T. Determination of the moment of transition of a material from a plastic state to a brittle one using the parameters of microplastic deformation. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2013;5(102):48–53. (In Russ.).
22. Nikitin E.S., Semukhin B.S., Zuev L.B. Localized plastic flow and spatio-temporal distribution of acoustic emission signals. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 2008;34(15):70–74. (In Russ.).
23. Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A. *Physics of macrolocalization of plastic flow*. Novosibirsk: Nauka, 2008:327. (In Russ.).
24. Szyzakin R., Voronin V., Gapon N., Zelensky A., Pizurica A. Automatic detection of welding defects using the convolutional neural network. *Proceedings of spie the international society for optical engineering*. 2019:110610E. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2525643>
25. Bovyryn D.A., Surikov P.V., Filippova O.V., Kalugina E.V. On the causes of defects in the welded joints of pipes made of pe100. *Moscow University Chemistry Bulletin*. 2020:142–147. (In Russ.). <https://doi.org/10.3103/S0027131420020030>
26. Muravyov S.V., Pogadaeva E.Y. Computer-aided recognition of defects in welded joints during visual inspections based on geometric attributes. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020:259–267. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1061830920030055>
27. Szeleziński A., Murawski L., Muc A., Muchowski T., Kluczyk M. Application of laser vibrometry to assess defects in ship hull's welded joints' technical condition. *Sensors*. 2021;21(3):895. <https://doi.org/10.3390/s21030895>
28. Terent'ev V.F., Roshchupkin V V., Penkin A.G., Penkin M.A. Influence of the martensite content on the mechanical behavior and acoustic emission characteristics of thin-sheet trip steel under static tension. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2019;2:36–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2019-2-36-41>
29. Inshakov D.V., Kuznetsov K.A. Diagnostics of the technical condition of heat exchangers by acoustic pulse reflectometry at hazardous production facilities. *Nauka i tekhnika*. 2019;12:24–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-12-24-29>

**Сведения об авторах**

**Евгений Анатольевич Ожиганов**, главный специалист по неразрушающему контролю, ООО «Кузбасский центр сварки и контроля»

**E-mail:** zhigan84@mail.ru

**ORCID:** 0009-0002-0741-0291

**Сергей Валерьевич Коновалов**, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** konovalov@sibsiu.ru

**ORCID:** 0000-0003-4809-8660

**Ирина Алексеевна Панченко**, к.т.н., заведующий научной лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** i.r.i.ss@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0002-1631-9644

**Мария Михайловна Баженова**, лаборант в управлении научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** kotok04@bk.ru

**ORCID:** 0000-0002-1751-7554

**Information about the authors**

**Evgenii A. Ozhiganov**, Chief Specialist For Non-Destructive Testing, Limited Liability Company «Kuzbass Center for Welding and Control»

**E-mail:** zhigan84@mail.ru

**ORCID:** 0009-0002-0741-0291

**Sergey V. Konovalov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities, Siberian State Industrial University

**E-mail:** konovalov@sibsiu.ru

**ORCID:** 0000-0003-4809-8660

**Irina A. Panchenko**, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

**E-mail:** i.r.i.ss@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0002-1631-9644

**Mariya M. Bazhenova**, Laboratory assistant, Siberian State Industrial University

**E-mail:** kotok04@bk.ru

**ORCID:** 0000-0002-1751-7554

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 05.09.2023

После доработки 13.09.2023

Принята к публикации 15.09.2023

Received 05.09.2023

Revised 13.09.2023

Accepted 15.09.2023