

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО И АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ДЕФЕКТОБРАЗОВАНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

© 2020 г. К.А. Степанова^{1,*}, И.Ю. Кинжагулов¹, Ю.О. Яковлев², А.С. Ковалевич¹, Д.С. Ашихин¹, И.Е. Алифанова³

¹Университет ИТМО, Россия 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49

²БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Россия 190005 Санкт-Петербург, ул. Красноармейская, 1

³Учреждение науки ИКЦ СЭКТ, Россия 197343 Санкт-Петербург, ул. Матроса Железняка, 57, лит. А

*E-mail: ledy.xs93@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.07.2019; после доработки 15.11.2019

Принята к публикации 30.12.2019

Приведены результаты применения лазерно-ультразвукового и акустико-эмиссионного методов неразрушающего контроля для исследования процессов деформации и разрушения сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием. Получены диаграммы деформирования и определены механические характеристики образцов сварных соединений из алюминий-магниевого сплава. Лазерно-ультразвуковым методом на основе эффекта акустоупругости проведены измерения механических напряжений сварных соединений, возникающих при одноосном нагружении образцов в области упругих деформаций. Проведена регистрация акустико-эмиссионных сигналов, возникающих в ходе растяжения образцов сварных соединений. Установлено, что характер распределения параметров акустической эмиссии при разрушении сварных соединений с дефектами имеет отличительные особенности. В условиях статического одноосного нагружения образцов сварных соединений в качестве информативных параметров рассматривались активность и суммарный счет акустической эмиссии.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, сварка трением с перемешиванием, сварное соединение, лазерно-ультразвуковой контроль, напряжения, деформация, акустоупругость, испытания на одноосное растяжение.

DOI: 10.31857/S013030822003001X

ВВЕДЕНИЕ

Совокупность технологических и конструкционных свойств изделий, выполненных с применением технологии сварки трением с перемешиванием (СТП), обуславливает ее широкое использование в различных отраслях промышленности. Одними из основных областей применения указанной технологии являются авиа- и ракетостроение (изготовление несущих и оболочечных конструкций ракет-носителей из высокопрочных алюминиевых сплавов), а также судостроение (производство тонкостенных профилированных алюминиевых панелей) [1, 2].

Процессы дефектообразования при формировании соединений сваркой трением с перемешиванием обусловлены несоответствием значений технологических параметров сварочного процесса заданным значениям и приводят к снижению качества сварных соединений [3].

Таким образом, для обеспечения качества сварных соединений, получаемых СТП, необходимо выполнение активного многопараметрического контроля технологического процесса сварки.

Вероятность образования микродефектов сложной морфологии в сварных соединениях ограничивает применимость традиционных методов неразрушающего контроля и диагностики сварных соединений (рентгеновского, вихретокового, ультразвукового) и осложняет внедрение данной технологии в производство изделий ответственного назначения [4].

Целью исследований являлась оценка применимости метода акустической эмиссии (АЭ) для контроля дефектообразования в процессе СТП изделий из алюминиевых сплавов и повышение его информативности за счет использования лазерно-ультразвукового контроля.

Для разработки методологии АЭ-контроля дефектообразования в процессе сварки исследовались деформационные процессы, происходящие при нагружении сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов, на стадиях упругой и пластической деформаций, вплоть до разрушения сварных соединений.

В ходе исследований были выявлены отличительные особенности в поведении АЭ при статическом растяжении образцов стыковых сварных соединений и установлены закономерности распределения информативных параметров АЭ, наиболее чувствительных к процессам пластической деформации и разрушения металла сварного соединения [4, 5].

Для повышения информативности исследований деформационных процессов лазерно-ультразвуковым методом, основанном на эффекте акустоупругости, были определены значения действующих напряжений в околошовной зоне и корневой области сварных соединений при нагружении в области упругих деформаций образцов с дефектной и бездефектной структурами сварного соединения [6, 7].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалы для исследований

Образцы для исследований были изготовлены из стыковых сварных соединений, выполненных СТП, из высокопрочного алюминий-магниевого сплава. Образцы № 1, 2 изготовлены из основного металла сварного соединения. Образцы № 3А, 4А, 6А, 9Ад, 10Ад представляли собой соединение со сварным швом в средней части (см. рис. 1). Сварные соединения в образцах № 9Ад, 10Ад изготовлены с отклонением значений технологических параметров СТП. Характеристики образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики образцов для исследований

№	Начальная толщина a_0 , мм	Начальная ширина b_0 , мм	Рабочая длина образца l , мм	Начальная площадь поперечного сечения F_0 , мм ²	Сплав
1	7,4±0,2	20,0±0,2	50,0±0,2	148,0 ±0,4	АМг6
2	7,4±0,2	20,0±0,2	50,0±0,2	148,0 ±0,4	
3А	7,4±0,2	19,5±0,2	50,0±0,2	144,3 ±0,4	
4А	7,4±0,2	20,0±0,2	50,0±0,2	148,0 ±0,4	
6А	7,4±0,2	19,8±0,2	50,0±0,2	146,5 ±0,4	
9Ад*	7,4±0,2	19,9±0,2	50,0±0,2	147,3 ±0,4	
10Ад**	7,4±0,2	20,0±0,2	50,0±0,2	148,0 ±0,4	

*Образец 9Ад был изготовлен из области свариваемой заготовки, где в начальный момент времени осуществлялось внедрение сварочного инструмента, после чего данная область была переварена, в связи с этим, сварной шов имел структурные особенности ядра и околошовной зоны: резкий переход от сварного ядра к основному металлу.

**Образец 10Ад имел дефект типа смещение свариваемых кромок — угловое отклонение свариваемых кромок относительно друг друга из-за некачественной сборки конструкции под сварку [8].

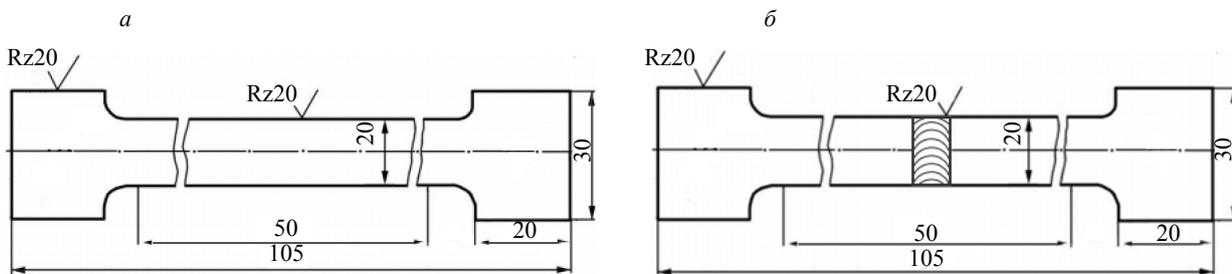


Рис. 1. Эскиз образцов для исследований: *а* — № 1, 2 (основной металл); *б* — № 3А, 4А, 6А, 9Ад, 10Ад (металл сварного шва).

Измерения механических напряжений лазерно-ультразвуковым методом

Измерение механических напряжений в исследуемых образцах осуществляли на основе эффекта акустоупругости. Для генерации упругих колебаний использовали один из методов лазерной оптоакустики, основанный на термооптическом возбуждении наносекундных ультразвуковых импульсов, — лазерно-ультразвуковой метод [6]. Информативным параметром для измерений механических напряжений в металлических конструкциях ультразвуковым методом

является скорость распространения ультразвуковых продольных подповерхностных (головных) волн (далее — УЗВ) [7].

Для измерения механических напряжений в образцах использовали дефектоскоп лазерно-ультразвуковой (ЛУД) УДЛ-2М (ООО «Линкс 2000», Россия). Для генерации и приема головной УЗВ применяли специализированный раздельно-совмещенный лазерно-ультразвуковой преобразователь, реализующий термоакустический способ возбуждения упругих колебаний с приемом акустических сигналов пьезопленкой. Акустический контакт при измерениях обеспечивается прижимом преобразователя к контролируемой поверхности через тонкий слой контактной жидкости.

Для термооптического возбуждения наносекундных ультразвуковых импульсов использовали излучение основной гармоники лазера с диодной накачкой (длительность импульса 75 нс, энергия в импульсе 100 мкДж, частота повторения импульсов 1000 Гц).

Акустическая эмиссия при испытании образцов на одноосное растяжение

Регистрацию акустико-эмиссионных данных осуществляли в условиях статического нагружения исследуемых образцов. Статические испытания на одноосное растяжение выполняли с постоянной скоростью нагружения, равной 0,2 кН/с, при комнатной температуре (20 °С). Для нагружения образцов использовали универсальную испытательную машину LFM-150 (Walter+Bai AG, Швейцария).

При исследовании распределения значений параметров АЭ при разных уровнях приложенных нагрузок в качестве информативных параметров анализировали: число импульсов акустической эмиссии N_{Σ} , активность акустической эмиссии \dot{N}_{Σ} , время нарастания импульса АЭ Δt . Данные параметры сопоставляли с уровнем приложенной нагрузки P и относительной деформацией ε .

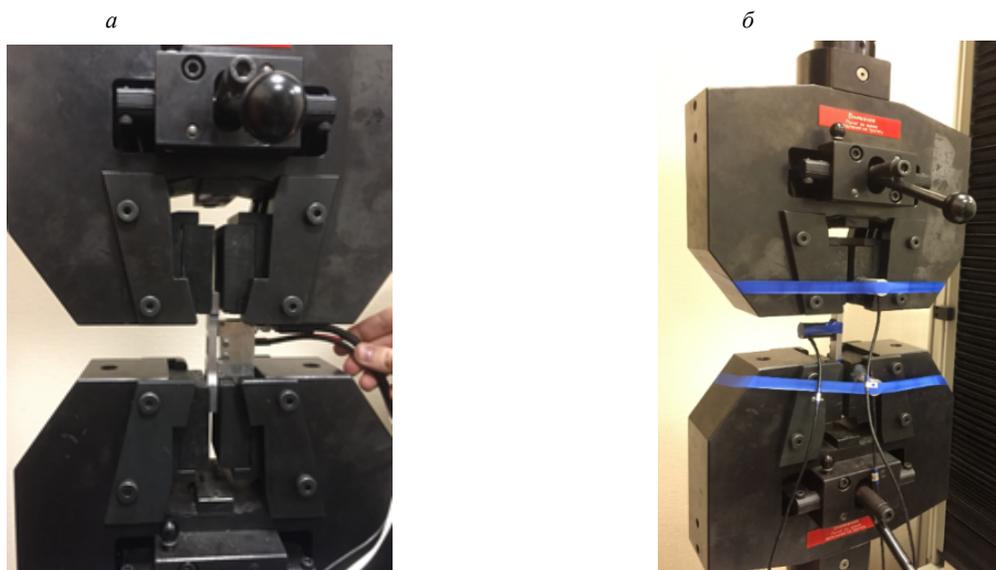


Рис. 2. Элементы стенда для испытаний:

а — размещение лазерно-ультразвукового преобразователя на образце; *б* — размещение ПАЭ.

Для регистрации, обработки и вывода АЭ-информации использовали цифровая акустико-эмиссионная диагностическую систему СЦАД-16.10 (ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина», Россия). АЭ регистрировалась пьезоэлектрическими преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ) с полосой пропускания 100—700 кГц. Сигналы АЭ, принимаемые ПАЭ, усиливались с помощью предварительного усилителя на 40 дБ. Элементы стенда для испытаний приведены на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений механических напряжений

На подготовительном этапе выполнялась градуировка средств измерений механических напряжений для получения значений коэффициента акустоупругости материала K_{ν} , позволяющего

рассчитать механические напряжения по измеренным значениям скорости распространения УЗВ. Данный коэффициент позволяет рассчитать механические напряжения по измеренным значениям скорости распространения УЗВ.

Расчет значений коэффициента акустоупругости материала K_v выполняли согласно формуле [7]:

$$K_v = \sigma \frac{v}{v - v_0}, \quad (1)$$

где σ — механическое напряжение в образце (в соответствии с приложенным растягивающим усилием), МПа; K_v — коэффициент акустоупругости материала образца, кг/(м·с²); v — скорость распространения головной подповерхностной волны в материале образца при измерениях, м/с; v_0 — скорость распространения головной подповерхностной волны в материале образца в ненапряженном состоянии, м/с.

Для построения градуировочной характеристики измеряли скорости распространения головной подповерхностной волны в материале образца под действием растягивающих усилий от 0 до 28 кН. Измерения скорости v проводили по схеме, приведенной на рис. 3.

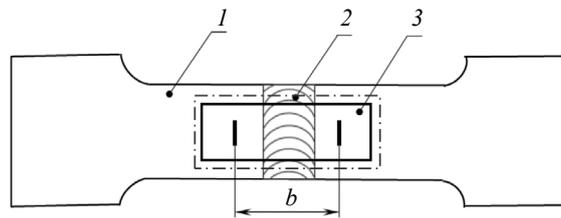


Рис. 3. Схема проведения измерений скорости распространения УЗВ:

1 — образец; 2 — область измерений в корневой области сварного шва, 3 — преобразователь; b — база преобразователя.

Измерения скорости v осуществляли в следующей последовательности:

- 1) рабочая поверхность преобразователя ЛУД приводилась в контакт с поверхностью образца (см. рис. 3);
- 2) выполнялось нагружение образцов с помощью испытательной машины;
- 3) посредством программного обеспечения ЛУД определялась скорость распространения УЗВ для различных значений механических напряжений.

По результатам измерений строили градуировочную характеристику зависимости напряжений σ от скорости распространения УЗВ v и рассчитывался коэффициент K_v . Среднее значение коэффициента K_v находилось по результатам двух циклов нагружения и разгрузки в области упругих деформаций образца № 1. Среднее значение коэффициента K_v вычисляли также при нагрузке в области упругих деформаций образца сварного соединения № 6А. На рис. 4 приведены результаты градуировки, выполненной на образцах основного металла № 1 и сварного соединения № 6А.

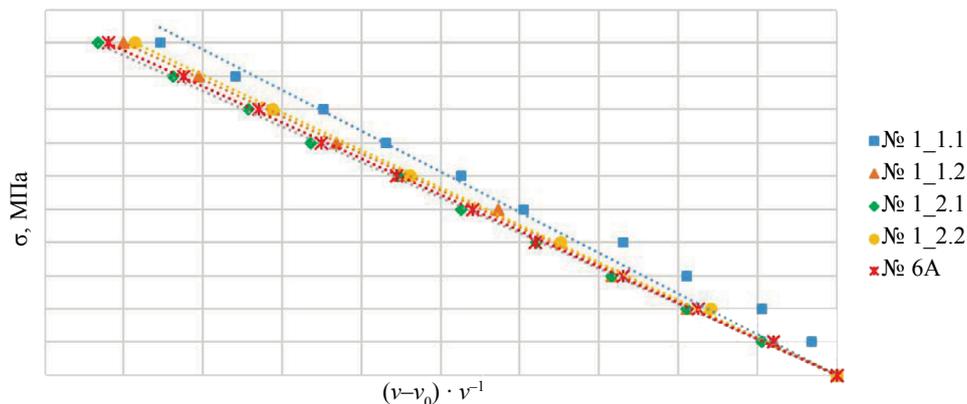


Рис. 4. Градуировочная характеристика для алюминий-магниевого сплава (№ 1_1.1, № 1_2.1 — первый и второй циклы нагружения образца № 1; № 1_1.2, № 1_2.2 — первый и второй циклы разгрузки образца № 1).

В ходе анализа результатов градуировки выявлено, что стандартное отклонение среднего значения коэффициента K_v , рассчитанного для образца сварного соединения № 6А, принадлежит доверительному интервалу коэффициента K_v , полученного для основного металла на образце № 1 с доверительной вероятностью 0,95. Таким образом, градуировку средств измерения механических напряжений лазерно-ультразвуковым методом возможно проводить на образцах сварного соединения, выполненного СТП, при условии нулевого значения сварочных напряжений в околошовной зоне в ненагруженном состоянии.

С учетом среднего значения коэффициента K_v , полученного при градуировке, выполненной на образцах основного металла № 1 и сварного соединения № 6А, были измерены напряжения σ при нагружении образцов со сварным швом № 4А и № 9Ад (см. табл. 2, рис. 5).

Относительная погрешность $\bar{\Delta}\sigma$ результата измерений σ определялась по формуле:

$$\bar{\Delta}\sigma = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_p} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $\Delta\sigma$ — абсолютная погрешность результата измерения σ , МПа.

За истинное значение σ_p принималось расчетное значение напряжений в поперечном сечении образца, определенное как отношение прикладываемой нагрузки P к начальной площади поперечного сечения F_0 .

Таблица 2

Результаты измерений напряжений в образцах сварных соединений

Прикладываемая нагрузка		Результаты измерений механических напряжений ЛУД					
		Образец № 4А		Образец № 9Ад			
				Нагрузка 1		Разгрузка 2	
P , кН	σ_p , МПа	σ , МПа	$\bar{\Delta}\sigma$, %	σ , МПа	$\bar{\Delta}\sigma$, %	σ , МПа	$\bar{\Delta}\sigma$, %
0,0	0	0	0	0	0	0	0
2,8	20	18	10	6	72	26	30
5,6	40	40	1	24	41	39	2
8,4	60	61	2	49	19	61	1
11,2	80	86	8	67	16	78	3
14,0	100	104	4	93	7	97	3
16,8	120	126	5	107	11	121	1
19,6	140	148	5	139	1	141	1
22,4	160	165	3	142	11	158	1
25,2	180	187	4	173	4	170	5
28,0	200	209	4	233	17	191	5

В результате сравнения расчетных и измеренных напряжений относительная погрешность измерений на образце № 4А не превысила 10 %. Сходимость результатов измерений свидетельствует о том, что развитие напряжений в корневой области и околошовной зоне сварного соединения образца № 4А при действии растягивающих усилий происходит аналогично развитию напряжений основного металла. Действующие напряжения в околошовной зоне образца сварного соединения № 4А в ненагруженном состоянии равны нулю.

Данные выводы справедливы для изделий из алюминиевых сплавов и физически обоснованы тем, что максимальная температура в области сварки трением с перемешиванием ниже температуры плавления свариваемых материалов, что позволяет минимизировать значения сварочных напряжений и еще раз подтверждает возможность создания более прочных соединений СТП в сравнении со сваркой плавлением.

Приложенная нагрузка, соответствующая расчетному напряжению $\sigma_p = 200$ МПа, привела к возникновению микропластических деформаций в корневой области сварного шва образца № 9Ад,

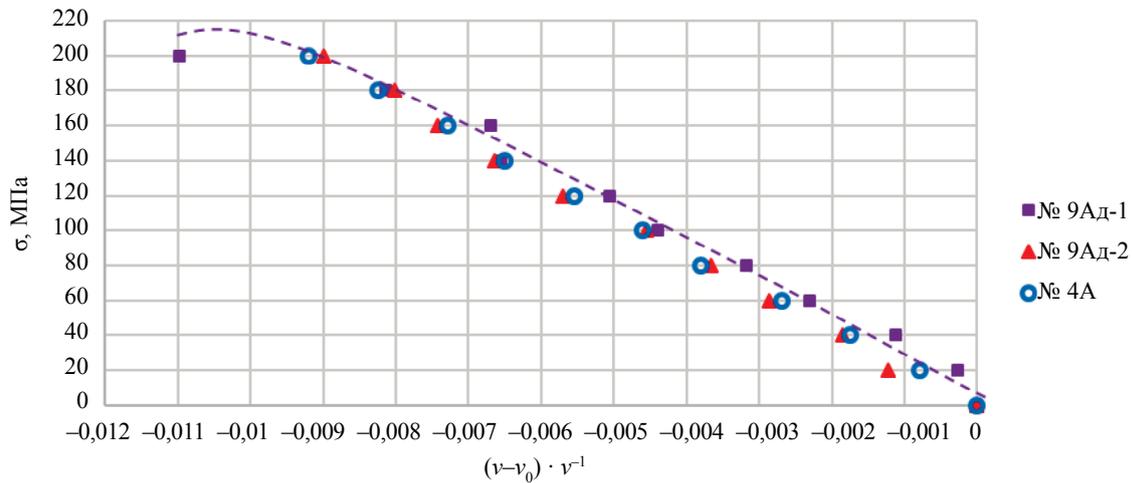


Рис. 5. Графики изменения скорости распространения УЗВ под действием механических напряжений (№ 9Ад-1 — диаграмма нагрузки, № 9Ад-2 — диаграмма разгрузки).

о чем свидетельствует нелинейный участок диаграммы (см. рис. 5) при нагрузке 1 образца № 9Ад и отсутствие данного участка при его разгрузке 2.

Величины погрешностей на этапах нагрузки-разгрузки образца № 9Ад позволяют сделать вывод об изменении характера напряженно-деформированного состояния в зоне измерений сварного соединения, выполненном с отклонением параметров сварки.

Результаты статических испытаний на одноосное растяжение

Структура соединений СТП имеет ряд характерных особенностей. В ядре сварного шва формируются ультрамелкодисперсные зерна, образование которых является результатом динамической или собирательной динамической полигонизации. Структура ядра получила название «опион ринг» из-за характерного кольцеобразного строения (см. рис. 6а (4)). Зона термомеханического влияния (ЗТМВ) (см. рис. 6а (1)) является промежуточной между зоной термического влияния (ЗТМ) (см. рис. 6а (2)) и ядром и представляет собой переход от одного типа структуры к другому — от зернистой текстурированной структуры основного металла (см. рис. 6а (3)) к слоистой структуре центральной части сварного шва [9, 10].

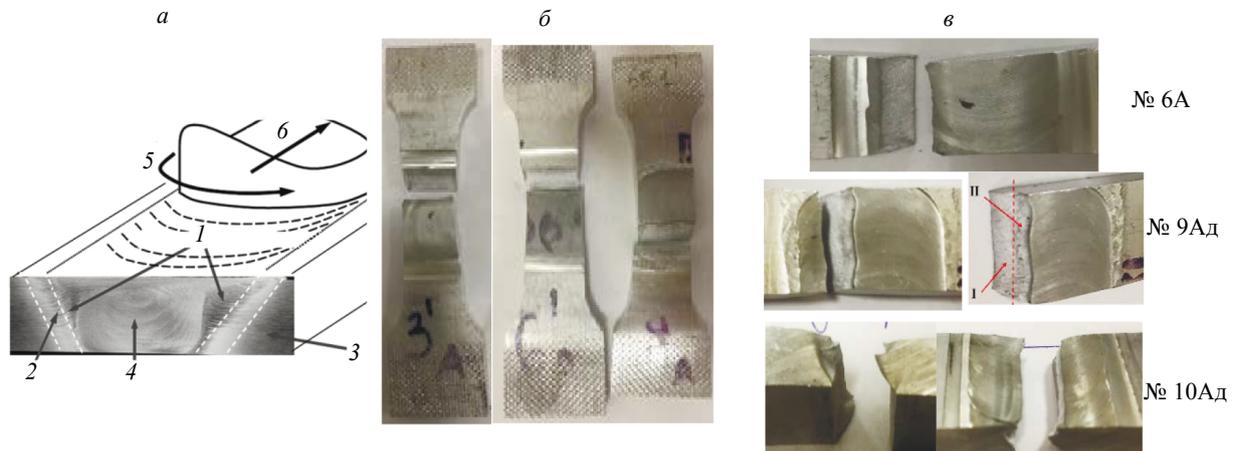


Рис. 6. Результаты испытаний образцов сварных соединений:

а — схема структурных зон (1 — ЗТМВ; 2 — ЗТМ; 3 — основной металл; 4 — ядро сварного шва; 5 — направление вращения сварочного инструмента; 6 — направление сварки); б, в — результаты испытаний образцов.

В образцах соединений СТП плоскость разрушения была перпендикулярна слоям трения, образованным скольжением опорного бурта сварочного инструмента по поверхности.

При испытании на растяжение образцов сварных соединений было отмечено, что разрушение образцов № 3А, 4А, 6А происходило в два этапа. Первичная трещина образовывалась от корня шва, далее разрушение происходило по границе ЗТМВ и ЗТВ (см. рис. 6) и заканчивалось разрывом в верхней части сварного соединения. В нижней части шов менее прочен из-за недостаточного перемешивания металла, обусловленного повышенным теплоотводом в сварочную подложку, что уменьшает пластичность.

Разрушение образцов № 9Ад и № 10Ад происходило иначе по материалу шва. Зародилась макротрещина в корневой области сварного соединения в зоне ядра. Поверхность излома визуально делится на две части: зону I с шероховатым рельефом, характерным для статического разрушения ультрадисперсных материалов, и верхнюю зону II с ямочным рельефом, похожим на долом (см. рис. 6) [10].

Разрушение ядра сварного шва не характерно для условий растяжения образцов. Данное обстоятельство связано с наличием дефектов структуры сварного соединения. Характер разрушения качественно отражал первоначальное структурное состояние сварного соединения. Результаты статических испытаний на одноосное нагружение приведены в табл. 3 и на рис. 7.

Таблица 3

Результаты статических испытаний на одноосное нагружение

№ образца	Деформация ϵ_{\max} , %	Среднее значение деформации ϵ_{\max} , %	Предел прочности σ_b , МПа	Снижение прочности сварного соединения $\Delta\sigma_b$, %
1	16,2	16,4	398	Среднее значение $\sigma_b = 389$
2	16,6		380	
3А	17,8	17,4	363	6,8
4А	17,5		354	9,0
6А	17,0		356	8,6
9Ад	14,5	12,3	337	13,5
10Ад	10,1		341	12,3

Модуль упругости испытанных сварных соединений отличается не более, чем на 2-3 %, при этом модуль упругости основного металла больше модуля упругости сварных соединений на 5-7 %, что объясняется большей пластичностью материала шва вследствие измельчения поликристаллов материала в процессе сварки.

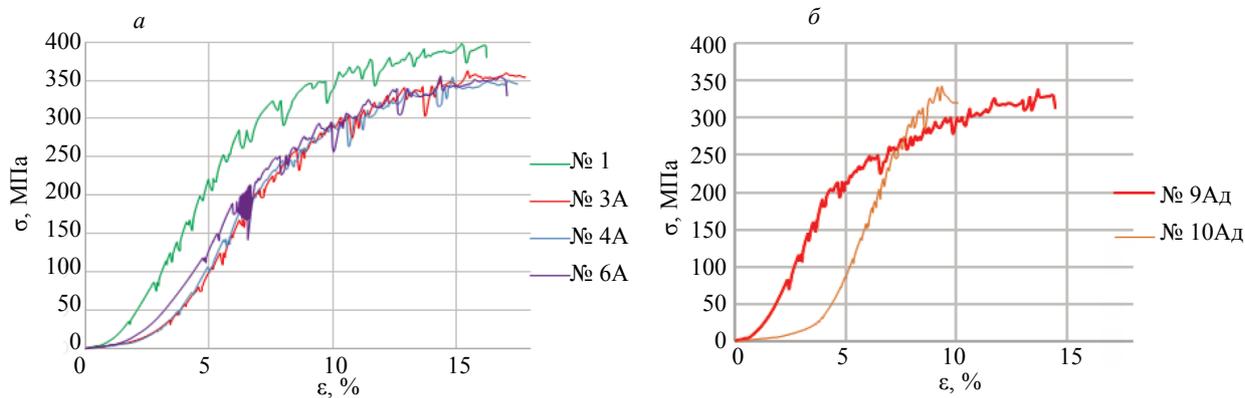


Рис. 7. Диаграммы растяжения образцов:
 а — основного металла и сварного шва без дефектов; б — сварного шва с дефектами.

Результаты испытаний на одноосное нагружение приведены на рис. 7.

Пониженная пластичность и прочность образца № 10Ад связаны с наличием дефекта типа угловое смещение [8]. В ходе нагружения в образце возникли как растягивающие напряжения, так и изгибные, вызванные давлением захватов испытательной машины на закрепленные части образца.

Пониженная пластичность и прочность образца № 9Ад объясняется тем, что сварное соединение было сформировано за два прохода сварочного инструмента, что привело к формированию дважды рекристаллизованной структуры сварного шва.

Результаты анализа параметров акустической эмиссии

При АЭ-контроле был реализован линейный тип локации с использованием трех ПАЭ, два из которых устанавливались на захватах испытательной машины, третий ПАЭ размещался в корневой области образца сварного соединения через акустическую контактную среду (см. рис. 3).

Анализируются параметры сигналов, принятые в зоне между ПАЭ, соответствующей области последующего разрушения образца. Таким образом исключались из обработки сигналы АЭ, вызванные трением в захватах испытательной машины.

При обработке АЭ данных для исключения сигналов, вызванных технологическим шумом испытательного оборудования и трения образцов в захватах, осуществлялась фильтрация сигналов АЭ в соответствии со следующими критериями:

- амплитуда сигналов АЭ более 150 мВ (порог дискриминации);
- время нарастания переднего фронта сигнала меньше или равно 20 мкс.

Амплитудный критерий фильтрации определен исходя из соотношения амплитуды полезного сигнала, превышающего более чем в 10 раз уровень шума. По времени нарастания переднего фронта Δt были выбраны сигналы, характеризующие дискретную АЭ, так как именно данный вид АЭ многие авторы связывают с эволюцией макроскопических дефектов (с процессами гетерофазной деформации: двойникованием, возникновением и ростом полос скольжения, пор, с механизмами трещинообразования) [11—13].

Результаты распределения числа импульсов АЭ N_{Σ} и активности АЭ \dot{N}_{Σ} при испытаниях образцов основного металла (№ 1, № 2) приведены на рис. 8.

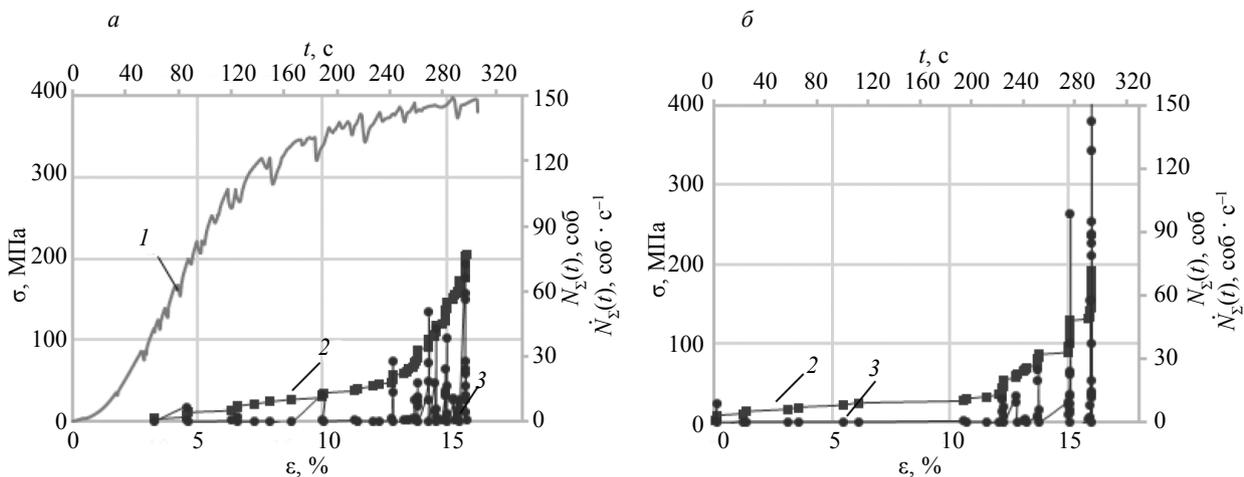


Рис. 8. Диаграммы распределения параметров АЭ образцов основного металла (1 — напряжения $\sigma(\varepsilon)$, 2 — числа импульсов АЭ $N_{\Sigma}(t)$, 3 — активности АЭ $\dot{N}_{\Sigma}(t)$): а — № 1; б — № 2.

С позиций кинетического подхода снижение активности АЭ на этапе пластического течения образцов № 1, 2 может быть вызвано замедлением движения дислокационных скоплений, связанное с их большой плотностью. Начало активного роста числа импульсов АЭ с возрастанием нагрузки обусловлено процессами соединения дислокационных скоплений, разрушение дислокационных петель с образованием очагов разрушения (микротрещин), приводящих к образованию макротрещины [11—13].

Результаты распределения числа импульсов АЭ N_{Σ} и активности АЭ \dot{N}_{Σ} при испытаниях образцов сварных соединений (№ 3А, 4А, 6А) приведены на рис. 9.

Микроструктура сварных соединений, с точки зрения акустической эмиссии, имеет свои особенности, обусловленные спецификой протекания процесса пластического течения материала [4, 5].

Для образцов № 3А, 4А, 6А локальные максимумы активности АЭ приходятся на предел текучести материала, что с точки зрения дислокационной теории пластической деформации кристал-

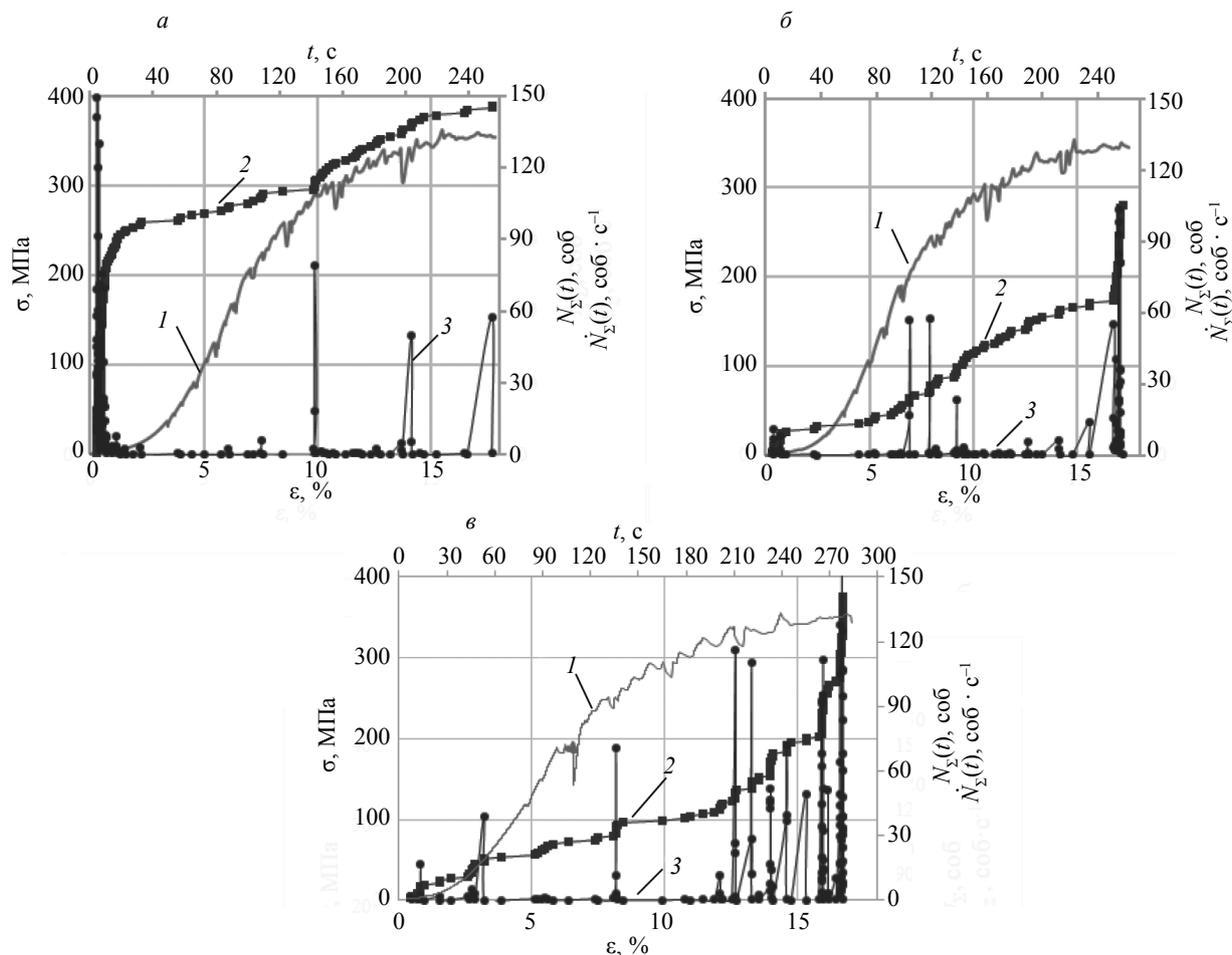


Рис. 9. Диаграммы распределения параметров АЭ образцов сварных соединений (1 — напряжения $\sigma(\epsilon)$, 2 — числа импульсов АЭ $N_{\Sigma}(t)$, 3 — активности АЭ $\dot{N}_{\Sigma}(t)$): а — № 3А; б — № 4А; в — № 6А.

лических материалов объясняется как образование скоплений дислокаций, их миграция, аннигиляция и выход дислокаций на поверхность [13].

Число импульсов, зарегистрированных на этапе пластического течения материала образцов сварных соединений (№ 3А, 4А, 6А), превосходит данный параметр для образцов основного металла (№ 1, 2), что свидетельствует о наличии дополнительных источников АЭ, связанных со структурой сварного шва, а именно с генерацией дислокаций на границах зоны ядра и ЗТМВ.

Для образцов № 4, 6А характерным является скачкообразное накопление сигналов АЭ (максимум активности АЭ), предшествующее разрушению образцов. Источниками АЭ в этом случае являлись процессы соединения дислокационных скоплений с образованием локализованных микротрещин и последующим их объединением в макротрещину, рост которой привел к разрушению [13].

Для образца № 6А характерным является наличие локальных максимумов активности АЭ при уровне нагрузке $(0,85-0,9) \sigma_{\text{в}}$, связанных, вероятно, со скоплением дислокаций на границах зоны ядра и ЗТМВ, преодолевающих препятствия с выделением запасенной энергии в виде АЭ-излучения.

Результаты распределения числа импульсов АЭ N_{Σ} и активности АЭ \dot{N}_{Σ} при испытаниях образцов сварных соединений (№ 9Ад, 10Ад) приведены на рис. 10.

Для образцов №1, 4А, 6А, 9Ад в области упругой деформации (до $\sigma = 200$ МПа) наблюдалась низкая активность АЭ, что обусловлено эффектом Кайзера, вызванным предварительным нагружением данных образцов для определения коэффициента акустоупругости.

Распределение параметров АЭ для образцов № 9Ад, 10Ад, изготовленных с отклонением значений технологических параметров сварки, имеет ряд особенностей.

Для образца № 9Ад первый локальный максимум активности АЭ соответствует уровню напряжений $\approx 0,7 \cdot \sigma_{\text{в}}$. Для данного образца, имеющего дважды рекристаллизованную структуру, вероят-

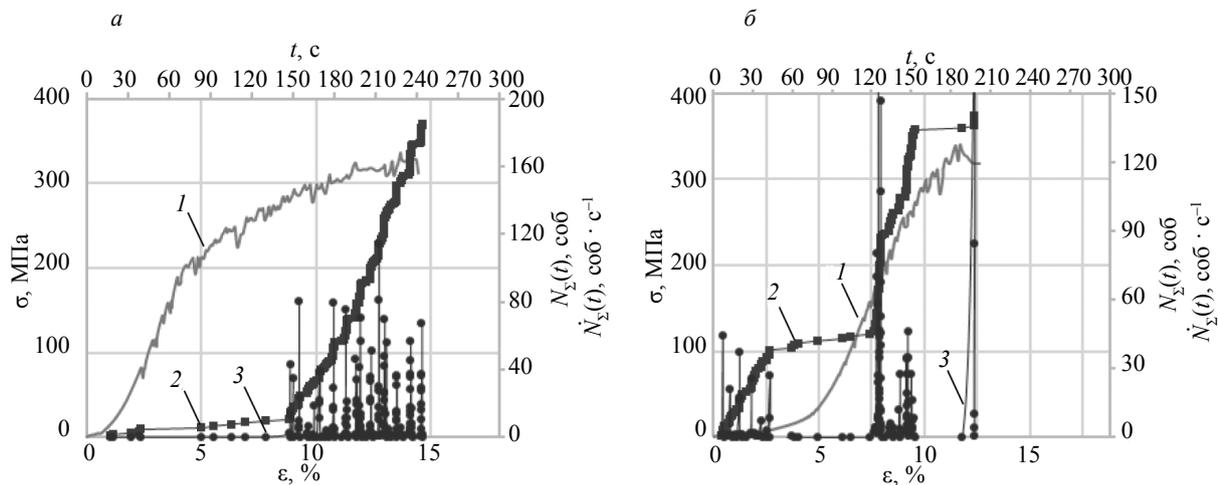


Рис. 10. Диаграммы распределения параметров АЭ образцов сварных соединений с дефектами (1 — напряжения $\sigma(\epsilon)$, 2 — числа импульсов АЭ $N_{\Sigma}(t)$, 3 — активности АЭ $\dot{N}_{\Sigma}(t)$): а — № 9Ад; б — № 10Ад.

но, дискретная АЭ связана с процессами двойникования, возникновения и роста полос скольжения, с механизмами трещинообразования, вызывающими пространственную и временную неоднородность деформации [12].

Для образца № 10Ад первый локальный максимум активности АЭ зарегистрирован при уровне напряжений $\approx 0,4 \cdot \sigma_b$. Данный уровень напряжений находится в поле упругих деформаций образцов без структурных дефектов. Данная особенность вызвана изначальной деформацией образца № 10Ад (дефект типа угловое смещение кромок). Одноосная нагрузка, прикладываемая в ходе испытаний, приводила к образованию в образце дополнительных изгибных напряжений в зоне сварного шва.

Корреляция параметров сигналов АЭ с параметрами разрушения и пластической деформацией образцов сварных соединений, изготовленных с отклонением значений технологических параметров сварки и без таковых, позволит перейти к исследованию процессов дефектообразования в ходе формирования сварных соединений.

ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных исследований показали потенциальную применимость метода акустической эмиссии для контроля дефектообразования в процессе СТП изделий из алюминиевых сплавов.

Использование лазерно-ультразвукового контроля параметров напряженно-деформированного состояния сварных соединений позволило повысить информативность результатов АЭ-контроля. В частности, полученные значения позволили детерминировать источники АЭ, связанные с образованием областей структурных неоднородностей (дефектов), и источники АЭ, связанные с технологическим изменением напряженно-деформированного состояния материала.

Дополнение метода АЭ результатами лазерно-ультразвукового контроля позволяет получать целевую акустико-эмиссионную информацию о дефектообразовании в процессе СТП изделий из алюминиевых сплавов без влияния факторов технологического процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, Грант 08-08.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prohorovich V.E., Kuznetsov S.V., Polovtsev V.A., Bychenok V.A. RSNTTD Main Activities for the Benefit of Development of Modern Production Base of Defense Industry Enterprises and Roskosmos // NDT WORLD. 2018. V. 21. No. 4. P. 68—74.
2. SLS Core Stage Test Welds Begin at NASA's Welding Wonder in Michoud [Электронный ресурс]. <https://www.americaspace.com/2014/10/19/sls-core-stage-test-welds-begin-at-nasas-welding-wonder-in-michoud/>

3. Ашихин Д.С., Беркутов И.В., Степанова К.А., Федоров А.В., Алифиренко Е.А., Спирков А.Б., Быченко В.А., Яковлев Ю.О. Анализ факторов, определяющих качество сварных стыковых алюминиевых соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием // Технология машиностроения. 2018. № 7. С. 18—23.
4. Поляков В.В., Колубаев Е.А., Салита Д.С., Дмитриев А.А. Физические методы диагностики сварных соединений в алюминиевых сплавах. Часть 2. Акустическая эмиссия // Известия Алтайского гос. ун-та. 2015. Т. 1. № 1 (85). С. 50—54.
5. Дмитриев А.А., Поляков В.В., Рудер Д.Д. Применение метода главных компонент к исследованию сигналов акустической эмиссии в алюминиевых сплавах // Известия Алтайского гос. ун-та. 2018. Т. 1. № 1 (99). С. 19—23.
6. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
7. Marusina M.Y., Fedorov A.V., Berkutov I.V., Bychenok V.A. Evaluation of the Influence of External Factors in Ultrasonic Testing of Stress-Strain States // Measurement Techniques. 2017. V. 59. No. 11. P. 1165—1169.
8. American Welding Society 2016 Specification for friction stir welding of aluminum alloys for aerospace applications (AWS—D17.3/D17.3M:2016) Retrieved from <https://standards.globalspec.com/std/13041310/aws-d17-3-d17-3m>. Введ. 1.07.2009.
9. Schneider J.A., Nunes A.C. Characterization of Plastic Flow and Resulting Microtextures in a Friction Stir Weld // Metallurgical and Materials Transactions. 2004. V. 35. No. 4. P. 777—783.
10. Sizova O.V., Kolubaev A.V., Kolubaev E.A., Zaikina A.A., Rubtsov V.E. Fracture of friction stir welded butt joints structure of aluminum-magnesium alloy // Metal working and material science. 2014. No. 3(64). P. 14—20.
11. Петров М.Г., Равикович А.И. О деформировании и разрушении алюминиевых сплавов с позиций кинетической концепции прочности // Прикладная механика и техническая физика. 2004. Т. 45. № 1. С. 151—161.
12. Lebyodkin M.A., Shashkov I.V., Lebedkina T.A. et al. Multiscale analysis of acoustic emission during plastic flow of Al and Mg alloys: from microseconds to minutes // Materials Science Forum. 2014. V. 783—786. P. 204—209.
13. Kok S., Bharathi M.S., Beaudoin A.J. et al. Spatial coupling in jerky flow using polycrystal plasticity // Acta Materialia. 2003. V. 51. P. 3651—3662.