

Физические методы диагностики сварных соединений в алюминиевых сплавах Часть 2. Акустическая эмиссия*

В.В. Поляков^{1,2}, А.В. Егоров¹, Д.С. Салита¹, Е.А. Колубаев^{2,3}

¹ Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

² Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия)

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск, Россия)

Physics Methods of Welded Joints Diagnostics in Aluminum Alloys. Part 2. Acoustic Emission

V.V. Polyakov^{1,2}, A.V. Egorov¹, D.S. Salita¹, E.A. Kolubaev^{2,3}

¹ Altai State University (Barnaul, Russia)

² Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia)

³ National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia)

Проведено исследование акустической эмиссии при статическом растяжении алюминий-магниевого сплава, содержащего сварные соединения, полученные по технологии сварки трением с перемешиванием. В качестве измеряемых информативных характеристик акустической эмиссии использовались среднеквадратичные значения напряжения. Образцы для исследований специально изготавливались при технологических режимах со значительными отклонениями от оптимальных параметров сварки, что приводило к формированию различных дефектов в зоне соединения и существенным различиям в протекании процессов пластической деформации, предразрушения и разрушения. Выявлены и описаны существенные различия зависимости характеристик акустической эмиссии от основных параметров режимов сварки, проявляющиеся в изменении вида кривых «среднеквадратичное напряжение — степень деформации». Такие различия обусловлены сменой источников и механизмов акустического излучения при изменении вида дефектной структуры сварного шва и могут быть использованы для диагностики особенностей этой структуры.

Полученные результаты являются научной основой для разработки новых методов и устройств, предназначенных для контроля и диагностики сварных соединений в алюминиевых сплавах с помощью измерений акустической эмиссии.

In this paper, we investigate acoustic emission properties under static tension of aluminum-magnesium alloys with welded joints produced with a friction stir welding technology. Root mean square (RMS) values of stress rate are used as informative parameters of acoustic emission. Test samples are produced under specific operating conditions with significant deviations from optimal parameters of welding, thus, resulting in structure defects at the welding area and significant differences in processes of plastic deformation, prefracture, and fracture. We reveal significant differences in dependences of acoustic emission informative parameters from welding parameters. It is presented in a set of «RMS of stress rate — strain rate» curves with noticeable change of curves shape. These differences are caused by changes of sources and mechanisms of acoustic emission due to changes of welded joint structure defects. Such effect can be used for defect structure testing.

The obtained results can be used as a basis for future development of new acoustic emission techniques and devices for testing of welded joints in aluminum alloys.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 (договор № 02. G25.31.0063) и в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 288).

Ключевые слова: акустическая эмиссия, диагностика материалов, структура, разрушение, алюминиевые сплавы, сварка трением с перемешиванием (friction stir welding).

Key words: acoustic emission, testing of materials, structure, fracture, mechanical tests, aluminum alloys, friction stir welding.

DOI 10.14258/izvasu(2015)1.1-08

Введение. Многие изделия, изготавливаемые из современных конструкционных материалов на основе алюминиевых сплавов с помощью сварочных технологий, предназначены для использования в экстремальных условиях внешних механических полей. Это обстоятельство предъявляет повышенные требования к структуре и прочностным свойствам областей соединения отдельных элементов, характеризующихся резко неоднородной структурой с большим количеством дефектов [1; 2]. Использование традиционных методов диагностики сварных соединений (рентгеновского, вихретокового, ультразвукового) не всегда позволяет надежно выявить деформационные процессы, развивающиеся при нагружении материала на стадиях предразрушения и разрушения. В связи с этим перспективным представляется дополнительное привлечение новых методов диагностики. В настоящей работе рассматривается использование метода акустической эмиссии для контроля процессов пластической деформации и разрушения в соединениях алюминиевых сплавов, полученных с помощью сварки трением с перемешиванием [3–5].

Измерение параметров акустической эмиссии. В качестве основного информативного параметра использовалось среднеквадратичное значение напряжения U_{eff} , характеризующее энергию акустической эмиссии. Эта величина определялась, согласно [6; 7], по следующей методике. Сигналы, соответствовавшие одному акту акустической эмиссии, имели вид волновых пакетов с затухающей по экспоненте амплитудой колебаний с циклической частотой заполнения ω , при этом каждая пульсация в пакете характеризовалась порядковым номером i , пиковым напряжением U_{mi} и временем регистрации t_i (рис. 1).

Среднеквадратичное значение напряжения U_{eff} определялось по массиву данных, содержащему амплитуду каждой пульсации и время ее прихода, как [6]

$$U_{eff} = \left(\frac{\pi}{2t_0\omega} \sum_{i=1}^n U_{mi}^2 \right)^{1/2},$$

где n — число пульсаций, зарегистрированных за время t_0 . Экспериментальные результаты представлялись в виде зависимостей среднеквадратичного значения напряжения от времени нагружения, при этом для удобства анализа использовалось отношение величины U_{eff} к величине $U_{шум}$, соответствовавшей значению шума, измерявшегося в свободном состоянии.

Регистрация акустического излучения проводилась в условиях статического растяжения исследуемых образцов с постоянной скоростью деформации [8]. При нагружении одновременно с U_{eff} регистрировались прилагаемая нагрузка F и абсолютная деформация Δl . Это обеспечивало возможность сопоставления информативных параметров, описывавших процесс акустической эмиссии, с соответствующими участками кривых деформационного упрочнения. Для испытаний использовалась автоматизированная экспериментальная установка, описанная в [6].

Материалы для испытаний. Исследования проводились на образцах алюминий-магниевого сплава, содержащих сварное соединение, полученное по технологии сварки трением с перемешиванием [9; 10]. Образцы имели стандартный вид для испытаний на статическое растяжение, их длина составляла 160 мм, толщина — 5 мм, размер рабочей части, содержащей по своему центру сварной шов, — 50×15 мм [1].

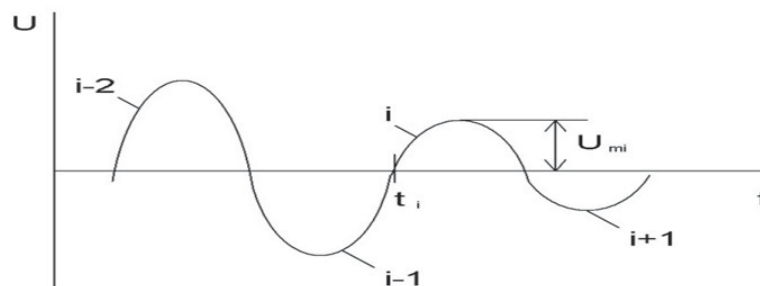


Рис. 1. Регистрируемые параметры акустико-эмиссионных сигналов

Особенностью исследований являлось выявление зависимостей между дефектной структурой сварного соединения, определяемой режимом сварки, и видом информативных параметров акустической эмиссии. Для получения таких зависимостей специально задавались различные технологические параметры сварки. Именно наряду с режимом, обеспечивавшим наиболее качественное соединение (скорость вращения инструмента — 560 об/мин., прикладываемое к соединяемым элементам усилие — 2600 кг, скорость подачи вращающегося инструмента — 500 мм/мин (режим 1) — применялись режимы со значительными отклонениями, при которых в сварном соединении заведомо формировались дефекты структуры. В настоящей работе проводились испытания для сварных соединений, возникавших при увеличенной скорости подачи — 700 мм/мин. с тем же усилием 2600 кг (режим 2) и при уменьшенном усилии — 2100 кг с той же скоростью подачи 500 мм/мин. (режим 3), скорость вращения инструмента при этом не изменялась и составляла по-прежнему 560 об/мин. Для сопоставления измерения проводились также на сплошных образцах алюминий-магниевого сплава, не содержащих сварного соединения.

Акустическое излучение при нагружении материала обусловлено локальной перестройкой его структуры, т. е. формированием и развитием дефектов. В качестве основных дефектов сварных швов выступают различные виды несплошностей, прежде всего поры, трещины и инородные включения. Микроструктура сварных соединений исследовавшихся образцов изучалась с помощью послойного металлографического анализа. С этой целью специально готовились металлографические шлифы по сечению сварных швов. Типичная микрофотография поперечного сечения шва на глубине 2 мм от лицевой стороны приведена на рисунке 2 на примере образца, изготовленного по режиму 2. На рисунке 2 отчетливо наблюдаются крупные дефекты в виде пустот, пронизывающих шов.

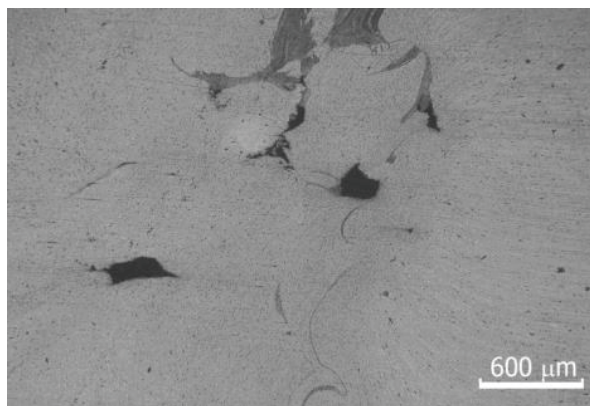


Рис. 2. Микроструктура поперечного сечения сварного соединения

Очевидно, что подобные крупные несплошности должны играть роль доминирующих концентраторов упругих напряжений при деформировании материала. Релаксация этих напряжений осуществляется путем образования и распространения трещин. Именно скачки движущихся в области сварного соединения трещин выступают в качестве основных источников акустико-эмиссионных сигналов, регистрируемых при деформировании материала.

Результаты акустико-эмиссионных испытаний. Полученные экспериментальные данные в виде типичных зависимостей информативных параметров акустической эмиссии от абсолютного удлинения приведены на рисунках 3–6.

Как показывает сопоставление этих рисунков, акустико-эмиссионные кривые, описывающие сплошные образцы и образцы, изготовленные при различных режимах сварки, существенно различаются. Все кривые характеризовались двумя группами отчетливых максимумов. Первые из этих максимумов, приходящиеся на малые деформации, соответствовали изменению наклона кривой деформационного упрочнения в области предела текучести. Вторая группа максимумов описывала стадии предразрушения и разрушения.

Из рисунка 3 следует, что на стадии разрушения образцов без сварного соединения кривая акустической эмиссии характеризовалась одним мощным пиком. Этот пик отвечал распространению магистральной трещины, приводящему к разрыву образца на две части, и полностью коррелировал с видом кривой нагружения $F - \Delta l$, отражавшим разрушение в один этап [1]. Совершенно аналогичный вид имела кривая акустической эмиссии на рисунке 4 для образцов, изготовленных в оптимальном режиме 1. Одинаковый вид этих кривых отражал, по-видимому, общие доминирующие механизмы разрушения и свидетельствовал о достаточно высоких прочностных свойствах сварного соединения.

Результаты испытаний для образца, изготовленного по режиму 2, с повышенной скоростью подачи инструмента, приведены на рисунке 5, а для образца, полученного по режиму 3, с пониженным усилием прижатия элементов, — на рисунке 6. Из рисунков 5 и 6 следует, что для образцов, изготовленных с отклонениями от оптимального режима, на стадиях разрушения наблюдалось несколько пиков акустической эмиссии. Такой вид кривых акустической эмиссии также коррелировал с кривыми нагружения для этих образцов и, по-видимому, отражал возникновение и скачки нескольких магистральных трещин [1]. Подобные трещины могли зарождаться возле острых краев крупных пустот, приведенных на рисунке 2. Таким образом, информативные параметры акустической эмиссии отражали изменения в протекании процесса разрушения, обусловленные сменой технологических режимов изготовления образцов.

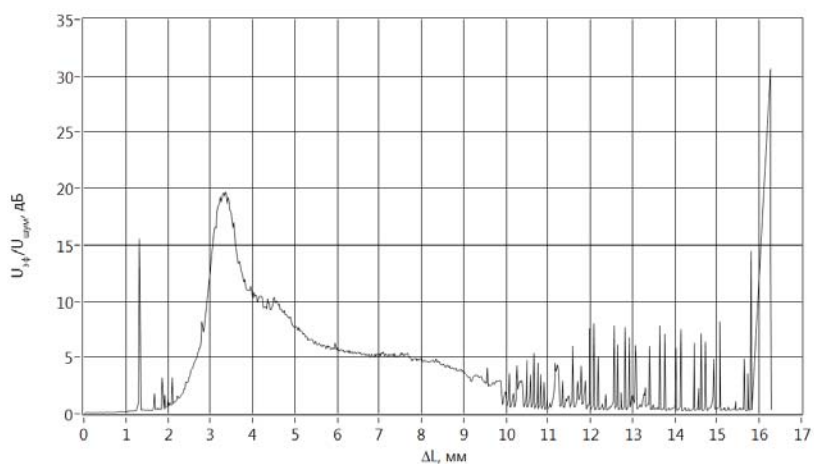


Рис. 3. Акустическая эмиссия при пластической деформации и разрушении алюминиевого сплава без сварного соединения

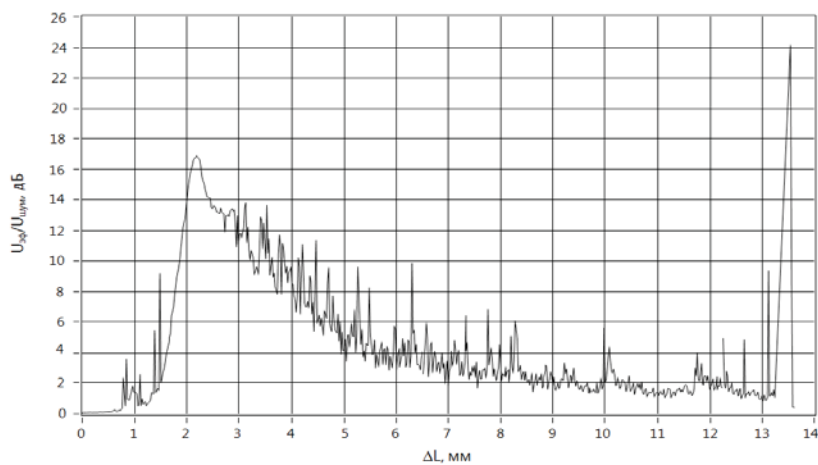


Рис. 4. Акустическая эмиссия при пластической деформации и разрушении алюминиевого сплава со сварным соединением (режим 1)

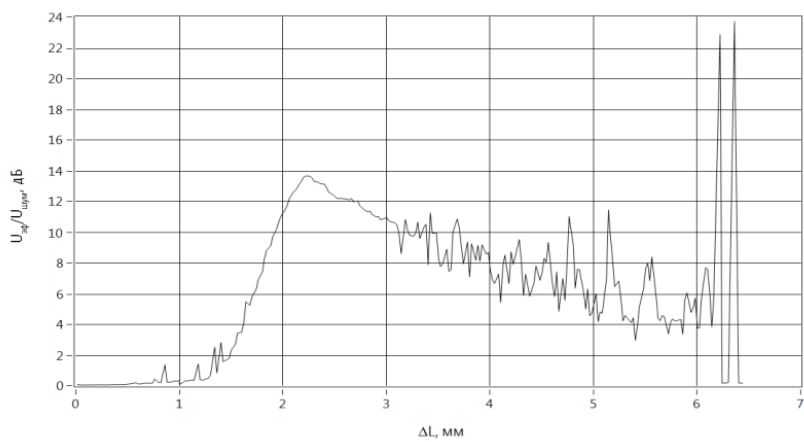


Рис. 5. Акустическая эмиссия при пластической деформации и разрушении алюминиевого сплава со сварным соединением (режим 2)

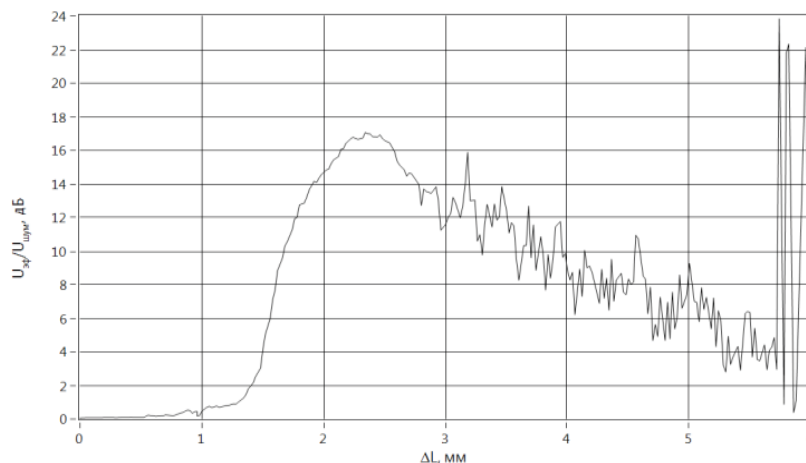


Рис. 6. Акустическая эмиссия при пластической деформации и разрушении алюминиевого сплава со сварным соединением (режим 3)

Заключение. Результаты испытаний образцов алюминиевого сплава, содержащих сварные соединения элементов, показывают, что информативные параметры акустической эмиссии отражают изменения в структуре этих соединений. Сигналы акустической эмиссии, регистрируемые при нагружении сварных соединений низкого качества, содержащих большое количество крупных дефектов, существенно отличаются от сигналов, получаемых при нагружении аналогичных образцов с качественным сварным

соединением или сплошных образцов. Это означает, что анализ параметров акустической эмиссии позволяет контролировать используемые технологические режимы сварки, выявляя повышенную генерацию дефектов структуры при отклонении этих режимов от оптимального. Применение метода акустической эмиссии дает также возможность прогнозировать развитие процесса разрушения в сварных соединениях и диагностировать особенности протекания этого процесса.

Библиографический список

1. Поляков В.В., Колубаев Е.А., Салита Д.С., Дмитриев А.А. Физические методы диагностики сварных соединений в алюминиевых сплавах. Часть 1. Механические испытания // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2015. — № 1/1.
2. Ищенко А.Я., Подбельников С.В. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. — 2007. — № 11.
3. Поляков В.В., Егоров А.В. Применение метода акустической эмиссии для исследования разрушения порошковых металлов // Порошковая металлургия (Минск). — 2007. — № 30.
4. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. — Киев, 1989.
5. Потехаев А.И., Плотников В.А. Акустическая диссипация энергии при термоупругих мартенситных превращениях. — Томск, 2004.
6. Егоров А.В., Поляков В.В. Применение метода акустической эмиссии к исследованию деформационного поведения структурно-неоднородных материалов. — Барнаул, 2008.
7. Егоров А.В., Поляков В.В., Гумиров Е.А., Лепендин А.А. Регистрация сигналов акустической эмиссии с помощью модифицированного метода осцилляций // Приборы и техника эксперимента. — 2005. — № 5.
8. Поляков В.В., Егоров А.В., Свистун И.Н. Исследование особенностей акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении пористых металлов // Дефектоскопия. — 2001. — № 9.
9. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction Stir Welding and Processing // Mater. Sci. Eng. R. — 2005. — Vol. 50.
10. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H.K.D.H. Recent Advances in Friction-Stir Welding — Process, Weldment Structure and Properties // Pros. Mater. Sci. — 2008. — Vol. 53.