

УДК 621.791:534

## Мониторинг образования несплошностей методом акустической эмиссии в процессе сварки трением с перемешиванием

*А.В. Левихина, В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев*

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия)

## Defect Formation Monitoring Using Acoustic Emission Method During Friction Stir Welding Process

*A.V. Levihina, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev*Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the  
RAS (Tomsk, Russia)

Рассматривается возможность применения метода акустической эмиссии в качестве онлайн-мониторинга процесса сварки трением с перемешиванием. В качестве свариваемого материала использовали листовую прокат плакированного алюминиевого сплава А2024 толщиной 5 мм. Для формирования дефектной структуры сварка осуществлялась с отклонением от оптимального режима. Показано, что акустическая эмиссия в режиме реального времени позволяет идентифицировать наличие дефектов сварного шва, а также их локализацию. В качестве информативных параметров предложено использовать энергию акустического сигнала и медианную частоту. Энергия акустических сигналов, записанных в ходе сварки, позволяет выделить четыре стадии процесса: процесс начального взаимодействия инструмента со свариваемым материалом, вход инструмента на всю толщину материала, формирование сварного соединения и выход инструмента. Для выявления корреляционных связей между дефектной структурой сварных соединений и характеристиками сигналов акустической эмиссии, полученных во время сварки, применялась методика расчета медианной частоты с использованием оконного преобразования Фурье. Показано, что в области формирования несплошности происходит существенное увеличение медианной частоты, что связывается с ухудшением условий конвективного переноса свариваемого материала вокруг инструмента.

**Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием, пластическая деформация, неразрушающий контроль, акустическая эмиссия.

The paper considers the possibility of applying the acoustic emission method for online monitoring of the friction stir welding process. A rolled sheet of clad aluminum alloy A2024 with a thickness of 5 mm has been used as the welded material. Welding has been carried out with some deviations from the optimum to get a defective structure formation. It is shown that acoustic emission in real time mode allows for identification of defects presence in the weld seam, as well as defects localization. It is proposed to use the energy and the median frequency of the acoustic emission signal as informative parameters. The energy of acoustic emission signals recorded during welding permits to distinguish four stages of the process: the initial interaction of the tool with the welded material, the input of the tool for the entire thickness of the material, the formation of a welded joint and the output of the tool. A Fourier window transformation technique has been used to calculate the median frequency required to determine the correlation between the defective structure of welded joints and the characteristics of the acoustic emission signals obtained during welding. It is shown that there is a significant increase in the median frequency in the defect formation zone which is linked to deterioration of convective transfer conditions of the welded material around the tool.

**Ключевые слова:** friction stir welding, plastic deformation, nondestructive control, acoustic emission

DOI 10.14258/izvasu(2017)4-06

**Введение.** В настоящее время в машиностроении при создании неразъемных соединений все большую популярность приобретает технология сварки трением с перемешиванием (СТП). Отличительной особенностью технологии СТП является соединение материалов без их плавления в твердом состоянии за счет интенсивной пластической деформации и конвективного массопереноса материала вокруг сварочного инструмента. Как было показано в работе [1], формирование структуры шва осуществляется по механизму, реализующемуся при трении скольжения — образование слоистой ультрадисперсной структуры вследствие пластической деформации сдвига и поворота структурных фрагментов. В свою очередь в работе [2] показано, что процесс деформирования поверхностного слоя осуществляется путем последовательного сдвига слоев металла конечной толщины, которая зависит от теплофизических и физико-механических свойств материала, что и наблюдается в структуре СТП-соединения в виде «луковых колец». Таким образом, при условиях, реализующихся в процессе послойного сдвига материала при СТП возможно образование несплошностей, обусловленных несовместностью деформации переносимого сварочным инструментом материала слоя и материала, не подвергаемого в данный момент интенсивной пластической деформации.

В настоящее время данная технология используется высокоответственных отраслях промышленности, поэтому вопрос качества СТП-соединений является первостепенным. Существует целый ряд способов диагностики СТП-соединений — это рентгеновский, вихретоковый, ультразвуковой и др. [3–6] Однако эти методы, как правило, применяют после изготовления сварного соединения или конструкции целиком, что в свою очередь, при обнаружении дефектов, приводит к значительным затратам, на их исправление. В связи с этим актуальным является решение проблемы диагностики формирования качественного сварного соединения в режиме реального времени, основанной на эффектах динамического взаимодействия свариваемого материала с рабочим инструментом, что позволит разработать интеллектуальную систему настройки режимов сварки на основе обратной связи.

Одним из наиболее перспективных методов онлайн-мониторинга процесса формирования СТП-соединения является метод акустической эмиссии (АЭ). Данный метод основан на регистрации и анализе акустических волн, вызванных локальной динамической эволюцией внутренней структуры материала [7]. Метод АЭ широко применяется для контроля при ручной электродуговой сварке под флюсом [8], лазерной сварке [9, 10]. Кроме того, этот метод используется для изучения износа инструмента при резке металла, фрезеровании [11] и т.д. Существуют методики,

позволяющие оценивать износ инструмента при СТП [12]. Применение метода АЭ к изучению процесса СТП является перспективным подходом. При СТП динамически взаимодействующими элементами являются сварочный инструмент, пластифицированный и непластифицированный материал. Интенсивная пластическая деформация и послойный перенос материала вокруг инструмента приводят к формированию интегрального акустического сигнала. Изменения во взаимодействии динамической системы, например, формирование несплошности или взаимодействие штифта инструмента с подложкой приведут к изменению акустического сигнала.

**Материалы и методика исследований.** В качестве свариваемого материала использовали листовую прокат плакированного алюминиевого сплава А2024 толщиной 5 мм. Для формирования дефектной структуры сварных соединений использовался режим сварки с отклонением от оптимальных параметров: частота вращения инструмента 750 об./мин, скорость инструмента 100 мм/мин, усилие прижима 1700 кгс. Длина шва составляла от 300 до 400 мм.

Запись сигналов акустической эмиссии проводилась с момента контакта инструмента со свариваемыми пластинами и велась в течение всего процесса сварки. Регистрация осуществлялась с помощью модуля регистрации ЭЯ-2 и датчика MSAE-L2 30-1000 кГц. Датчик закрепляли на одной из свариваемых пластин. Частота дискретизации составляла 6,25 МГц. Для фильтрации помех сигналы АЭ пропускались через фильтр верхних частот 27 кГц. Запись сигналов производилась отдельными фреймами. Для обработки сигналов был применен метод оконного преобразования Фурье.

Для определения местоположения дефектов производился рентгенографический контроль. Затем проводилось сопоставление рентгенографических снимков СТП-соединений, и медианной частоты сигналов АЭ, записанных в процессе сварки. Металлографические исследования выполнялись с помощью цифрового металлографического микроскопа Альтами МЕТ 1С.

**Результаты исследований.** Одним из общепринятых информативных параметров АЭ является энергия акустического сигнала. Изменения энергии акустического сигнала во времени обычно отражают изменения в динамическом взаимодействии исследуемой системы. На рисунке 1 представлен типичный график зависимости энергии акустического сигнала от времени процесса формирования СТП-соединения. Энергия акустического сигнала имеет четыре ярко выраженных области, которые соответствуют процессу начального взаимодействия инструмента со свариваемым материалом (I), входу инструмента на всю толщину материала (II), формированию сварного соединения (III) и выходу инструмента (IV).

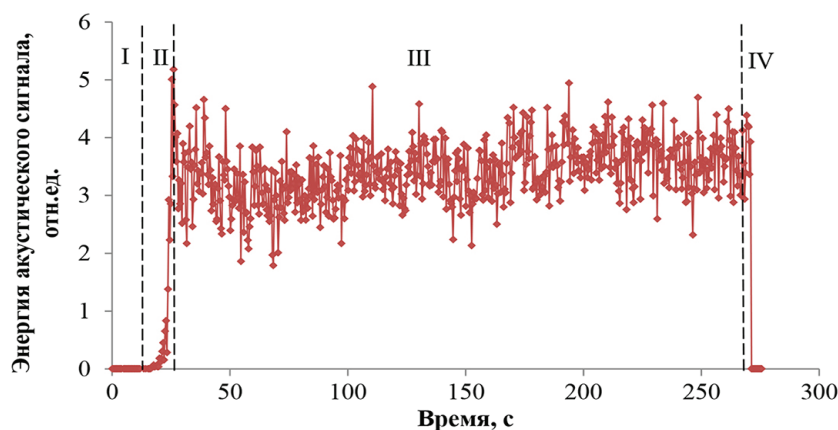


Рис. 1. График зависимости энергии акустического сигнала от времени

В первой области происходит разогрев кромок свариваемых пластин за счет сил трения, их пластическая деформация и резание материала, поскольку на данном этапе разогрев материала недостаточен. Энергия акустической эмиссии на данном этапе достаточно низкая, что обусловлено малым вовлечением материала во взаимодействие с инструментом. Вторая область быстрого возрастания энергии акустического сигнала соответствует нагреванию свариваемого металла до состояния подобного сверхпластичности в процессе заглупления инструмента и вовлечению все большего объема пластифицированного материала вокруг сварочного инструмента, приводит к интенсивному конвективному массопереносу и росту энергии сигналов акустической эмиссии. Третья область характеризует процесс формирования СТП-соединения в результате механического перемешивания пластифицированного материала при поступательном движении инструмента. Формирование сигналов акустической эмиссии на данном этапе связано с послойным [1] вовлечением свариваемого материала в процессы интенсивной пластической деформации. Четвертая область резкого падения энергии акустического сигнала соответствует моменту

сброса прижимающей нагрузки, прекращению конвективного массопереноса и выходу инструмента. Кроме того, на рисунке 1 можно наблюдать некоторое увеличение энергии сигналов акустической эмиссии во второй половине процесса сварки. Это может быть связано с постепенным увеличением температуры сварочного процесса, что приводит к увеличению количества вовлекаемого в процесс интенсивной пластической деформации материала и увеличению энергии сигналов акустической эмиссии соответственно.

Общепринятым подходом к анализу сигналов АЭ является использование данных об изменении медианной частоты. Медианная частота сигналов АЭ является достаточно информативным параметром. Она отражает интегральные изменения в спектре мощности сигнала и ее изменения обычно связаны с изменением процесса взаимодействия элементов исследуемой динамической системы.

Исследования показали, что медианная частота сигналов акустической эмиссии регистрируемых во время процесса СТП претерпевает стадии возрастания и уменьшения. На рисунке 2 представлен типичный график зависимости медианной частоты акустической эмиссии, записанной в ходе процесса сварки,

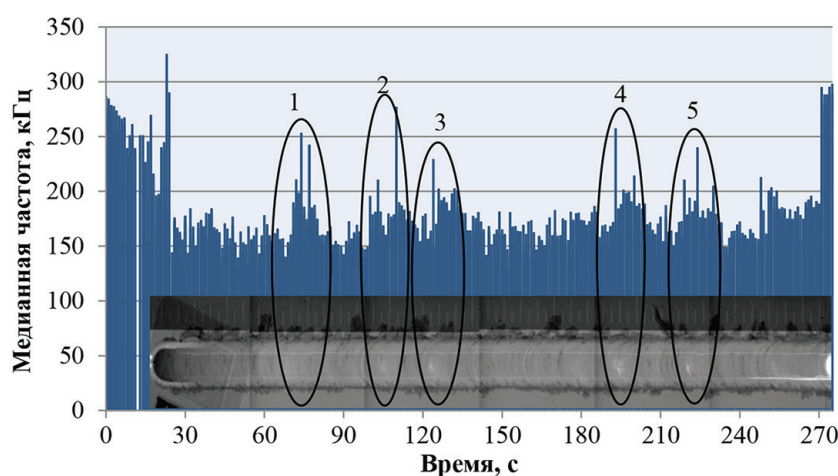


Рис. 2. Сопоставление графика зависимости медианной частоты акустической эмиссии, записанной в ходе процесса сварки, с рентгенографическим снимком полученного сварного соединения

Начальный этап сварки, когда происходит внедрение инструмента встык между свариваемыми пластинами, характеризуется относительно высокими значениями медианной частоты 180 кГц...340 кГц, что объясняется фрикционным взаимодействием сварочного инструмента с неразогретым металлом, что вызывает процессы адгезионного взаимодействия, резания и пластической деформации. По мере разогрева и внедрения инструмента медианная частота падает, что свидетельствует об увеличении объема свариваемого материала, вовлеченного в пластическое деформирование. Затем после внедрения инструмента и нагрева материала до пластического состояния происходит падение медианной частоты до 110 кГц...170 кГц. Как было показано в работе [13], падение медианной частоты связано с интенсивной пластической деформацией свариваемого материала в области взаимодействия с инструментом. Как видно из рисунка 2, такой диапазон медианной частоты сохраняется на участках формирования бездефектной структуры сварного соединения. При возникновении дефектов, изображенных на рентгенографических снимках

в виде светлых пятен, наблюдается всплеск медианной частоты до 275 кГц (области 2–5, выделенные на рисунке 2). Однако область 1, выделенная на рисунке 2 на рентгенографическом снимке, не показала видимого дефекта, хотя медианная частота изменилась так же как при видимых дефектах. Стоит отметить, что формирование дефектов обусловлено отклонением параметров сварки от оптимального режима. В данном случае было занижено усилие прижима инструмента, что в свою очередь приводит к отсутствию надлежащего контакта между плечами инструмента и свариваемым материалом, как следствие, к недостаточному нагреву для пластификации материала со стороны поверхности и образованию дефектов.

Для изучения структуры сварных соединений в области всплеска медианной частоты были подготовлены макрошлифы образцов, вырезанных в областях 1, 3-5. Фотографии макрошлифов представлены на рисунке 3. В этих областях обнаружены дефекты, представляющие собой скопления несплошностей и заглаженных непроваров, в том числе выявлен дефект, не обнаруженный на рентгенографическом снимке (рис. 3а).

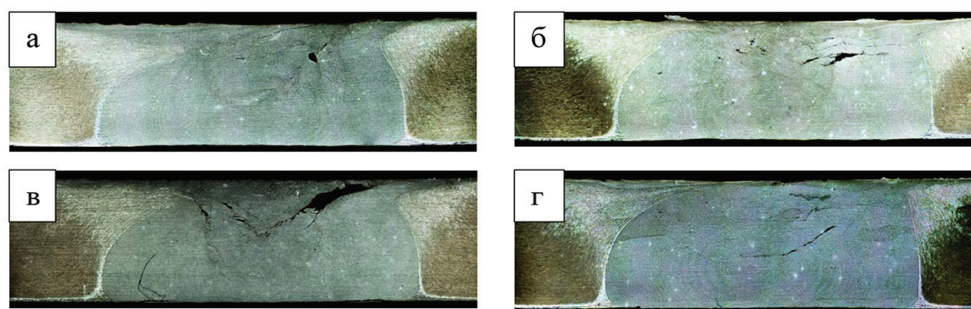


Рис. 3. Фотографии макрошлифов образцов сварного соединения в областях всплеска медианной частоты

Анализ сигналов АЭ, записанных в ходе эксперимента, показал, что на каждой стадии наблюдается несколько видов сигнала, но для каждой стадии формирования СТП-соединения присущи наиболее характерные типы сигналов. На рисунке 4 представлены типичные формы сигналов и изменение медианной частоты внутри фрейма, полученной с помощью оконного преобразования Фурье. Тип I сигналов характерен для участка вхождения инструмента встык между свариваемыми деталями, а также выхода из него. Медианная частота при этом значительно изменяется в пределах одного фрейма, что связано с одновременным протеканием ряда процессов при взаимодействии инструмента с неразогретым свариваемым материалом. Тип II сигналов наблюдается на стадии пластифицирования материала. Наблюдается резкое возрастание амплитуды сигнала, что свидетельствует об увеличении площади взаимодействия инструмента со свариваемым материалом. Медианная частота возрастает, так как на данной стадии разогрев материала еще недостаточен, а ведущим процессом, по всей видимости, является адгези-

онное взаимодействие инструмента со свариваемым материалом. Тип III сигналов характерен для участка формирования бездефектного сварного соединения. На данной стадии наблюдается значительное увеличение амплитуды сигнала акустической эмиссии по всему фрейму с одновременным падением медианной частоты, причем изменения медианной частоты во времени невелики и составляют диапазон не более 50 кГц. Существенное падение медианной частоты связано с интенсивной пластической деформацией свариваемого материала в области инструмента и соответствуют представлениям, описанным в [13]. Учитывая это, при ухудшении перемешивания свариваемого материала можно ожидать резких колебаний медианной частоты, обусловленных «нестационарным» перемешиванием материала. Действительно, тип IV сигналов наблюдается в области формирования дефектов сварного соединения. Отмечен продолжительный всплеск медианной частоты со 100 до 250 кГц, что свидетельствует о кратковременном ухудшении условия перемешивания материала в формирующемся шве.

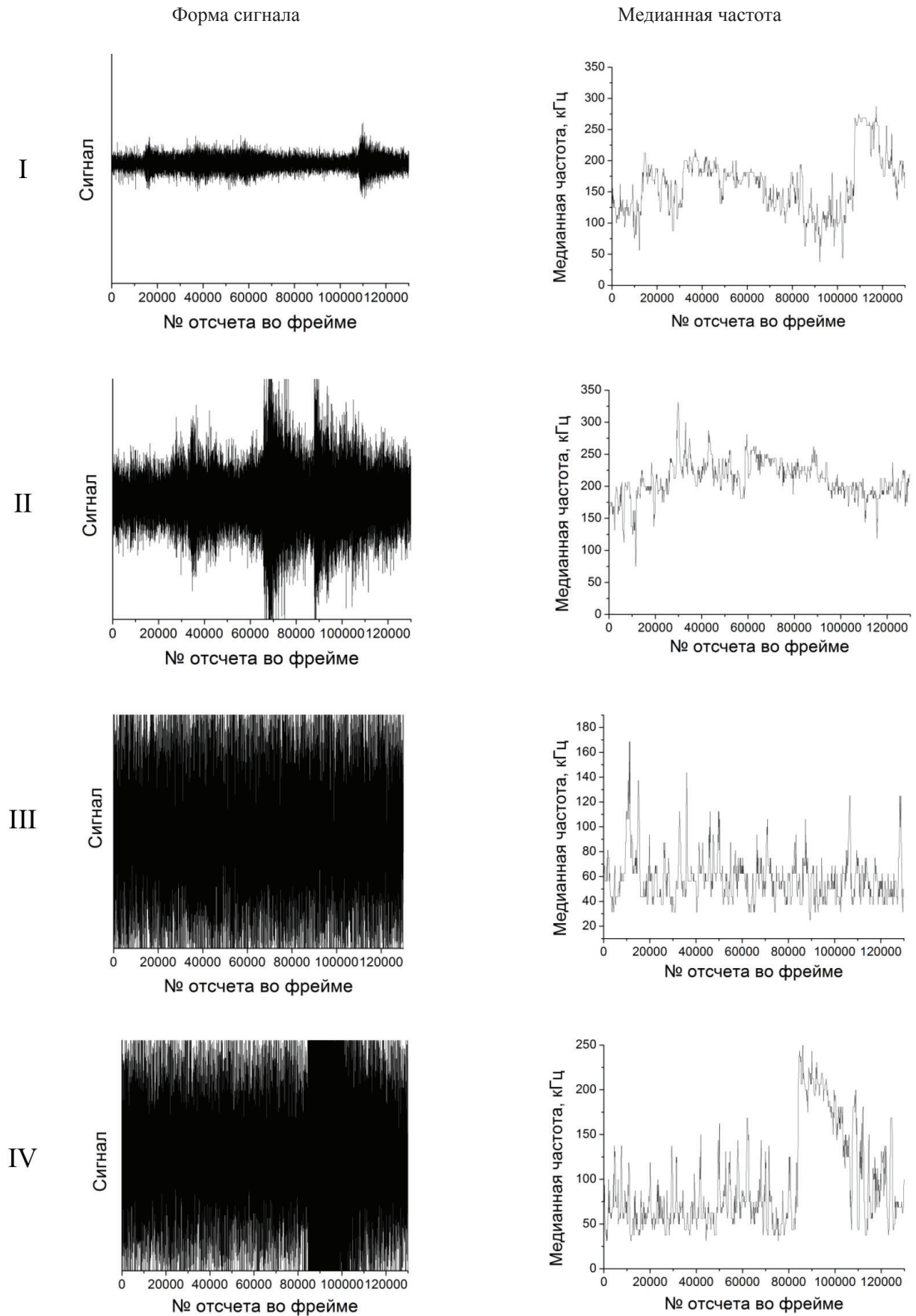


Рис. 4. Форма сигнала и медианная частота фреймов, характерных для различных стадий формирования СТП-соединения

**Заключение.** Исследования показали, что процесс образования дефектов в сварном соединении характеризуется устойчивыми, продолжительными и характерными сигналами акустической эмиссии, записанными в процессе сварки. Данные сигналов АЭ являются достаточными для идентификации и локализации дефектов в сварном соединении. Показано, что в области формирования несплошности происходит существен-

ное увеличение медианной частоты, что связывается с ухудшением условий конвективного переноса свариваемого материала вокруг инструмента.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что метод акустической эмиссии может быть эффективно использован в качестве онлайн-мониторинга процесса сварки трением с перемешиванием.

### Библиографический список

1. Колубаев Е.А. Исследование микроструктуры сварных швов алюминиевых сплавов, полученных сваркой трением с перемешиванием // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2014. — Т. 57, №10.
2. Рубцов В.Е., Колубаев А.В. Влияние тепловыделения, обусловленного пластической деформацией, на поведение материала в поверхностном слое при трении скольжения // Трение и износ. — 2009. — Т. 30, № 5.
3. Рубцов В. Е., Тарасов С. Ю., Колубаев Е. А., Гнущев С. Ф. Использование методов неразрушающего контроля для диагностики дефектов в сварных швах, полученных сваркой трением с перемешиванием // Контроль. Диагностика. — 2015. — № 2. DOI: 10.14489/td.2015.02.pp.051-058
4. Mishra R.S., Mahoney M. Friction stir welding and processing // ASM International. — 2007.
5. Шипша В.Г., Молодкин А.Д., Величко А.С., Михеев В.И. Вихретоковый контроль сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием // В мире неразрушающего контроля. — 2011. — №2 (52).
6. Luis S. Rosado, Telmo G. Santos, Moisés Piedade, Pedro M. Ramos, Pedro Vilaça. Advanced technique for non-destructive testing of friction stir welding of metals // Measurement. — 2010. — №43.
7. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая диагностика. — М., 1976.
8. Гомера В.П., Нефедьев Е.Ю., Смирнов А.Д., Ковалев Д.Н. Применение метода акустической эмиссии для контроля качества сварного шва в процессе его изготовления // Современное машиностроение. Наука и образование. — 2016. — №5.
9. Gu Hongping, Duley W.W. A statistical approach to acoustic monitoring of laser welding // Journal of physics D: Applied Physics. — 1996. — V. 29, №3.
10. Hao Zeng, Zude Zhou, Youping Chen, Hong Luo, Lunji Hu. Wavelet analysis of acoustic emission signals and quality control in laser welding // Journal of Laser Applications. — 2001. — №13 [Electronic resource]. — URL: <http://dx.doi.org/10.2351/1.1386799>
11. Мокрицкий Б.Я. Акустическая эмиссия как способ оценки свойств инструментальных материалов // Вестник машиностроения. — 2010. — №10.
12. Zeng W.M., Wu H.L., Zhang J. Effect of tool wear on microstructure, mechanical properties and acoustic emission of friction stir welded 6061 Al alloy // Acta Metallurgica Sinica. — 2006. — V. 19, №1. DOI: 10.1016/S1006-7191(06)60018-5.
13. Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Колубаев А.В., Попов В.Л. Использование акустической эмиссии для анализа процессов изнашивания при трении скольжения // Письма в журнал технической физики. — 2013. — Т. 39. — №4.