

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 620.179+621.791.763

Р.М. Галаган, Н.Ф. Луценко, Ф.С. Клішар, В.І. Запара

РОЗРОБЛЕННЯ КРИТЕРІЇВ ЯКОСТІ ТОЧКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОГО КОНТРОЛЮ

This article discusses the design of algorithm for processing of acoustic emission signals. It will allow elaborating the criteria for assessing the quality of resistance spot welding. The problem can be solved by using the convolution method, which can detect the exemplary temporal process in the analyzed signal. We synthesize two processing algorithms of acoustic emission signals by using linear and nonlinear transformations. Firstly, as a sample we propose to use the frequency characteristic of acoustic emission signals generated during the crystallization of molten core and characterize the qualitative point connection. Through experiments conducted, we create the training sample of acoustic emission signals. The application of the proposed algorithm allows evaluating the connection quality at emergence of high-level signal at the output of convolution unit in the analyzed time domain. The appearance of such peak indicates a significant degree of the temporal process of statistical association corresponding to the exemplary pattern of quality connection and acoustic emission signal at the experimentally proven current resistance spot welding.

Вступ

Контактне точкове зварювання (КТЗ) широко застосовується при масовому виробництві різних виробів, оскільки має ряд переваг: незначні залишкові деформації, високу продуктивність, високий рівень механізації і автоматизації, гнучкість та універсальність технологічного процесу [1]. Оскільки процес утворення точкового з'єднання дуже складний і на нього впливає безліч факторів, то для забезпечення заданого рівня якості зварного з'єднання необхідно використовувати різні методи контролю та адаптивного керування процесом зварювання.

Одним із основних дефектів КТЗ є непровар, при якому між зварюваними елементами є механічний контакт, але відсутнє лите ядро. Впевнено виявити непровар відомими фізичними методами контролю досить складно. Розв'язати цю задачу можна за допомогою методу акустичної емісії (АЕ) [2].

Акустична емісія – явище виникнення і поширення пружних коливань (акустичних хвиль) за рахунок швидкого вивільнення енергії деформації, викликані структурними змінами в твердому матеріалі. Ці структурні зміни можуть бути результатом як внутрішнього, так і зовнішнього прикладеного механічного або теплового навантаження. В основному спостережувані сигнали АЕ класифікуються за одним із двох типів: дискретна або неперервна АЕ [3]. Дискретна емісія нагадує згасаючі окремі коливання, які характеризуються великою амплітудою і малою частотою прямування, в той час як неперервна складається з послідовностей окремих сплесків малої амплітуди, що перебиваються. Типовими джерелами АЕ є: рух

дислокацій, зростання мікротріщин і тріщин, фазові перетворення тощо [4].

У процесі точкового зварювання датчик АЕ, розміщений або на одній з деталей, що зварюються, або на електроді, реєструє сигнали двох типів: корисний сигнал АЕ і завади. Корисні сигнали містять інформацію про події, пов'язані з істотними змінами в розплавленій області точкового з'єднання і в зоні термічного впливу. Ці сигнали генеруються як під час утворення литого ядра (під час проходження зварювального струму), так і у фазі його кристалізації [5]. При створенні точкових зварних з'єднань матеріал, що нагрівається, проходить кілька стадій, включаючи розширення (і в результаті накопичення втоми), рекристалізацію, перетворення твердої фази, пластичну деформацію (кування), плавлення, випаровування, кристалізацію, а інколи й розтріскування. Під час кожного з цих етапів можливе випромінювання хвиль напруги, які можуть бути виявлені як акустичні викиди (сигнали АЕ).

Завади являють собою різні шуми, які безпосередньо не пов'язані зі змінами, що відбуваються під час формування з'єднання. Вони обумовлені шумами з навколишнього середовища, шумами в електричній мережі, шумами охолоджуючої рідини, стуком електродів, тертям між зварюваними і підтримуючими державками, кавітацією, окалиною, шлаком тощо.

Постановка задачі

Метою статті є розроблення алгоритмів обробки сигналів АЕ, які виникають у процесі КТЗ, що дасть можливість синтезувати критерії для оцінки якості точкового з'єднання.

Експериментальні дослідження

При проведенні експериментів використовувалася машина КТЗ типу "АДАМ-1.1", яка призначена для зварювання виробів з низьковуглецевої сталі і має такі характеристики:

- напруга живлення – 220 В змінного струму;
- установка часу зварювання в межах 0,5–1,5 с;
- регулювання сили стиснення зварюваних деталей у межах 15–120 кг;
- автоматичне відключення при нагріві обмоток трансформатора вище 100 °С з індикацією перегріву;
- мінімальна товщина зварюваних деталей (лист/пруток), мм – 0,5/3,0;
- максимальна товщина зварюваних деталей (лист/пруток), мм – 2,0/5,0;
- номінальна потужність – 9,3 кВт;
- номінальна напруга холостого ходу – 2,0 В;
- габаритні розміри (не більше) – 460×90×240 мм.

До складу стенда для дослідження сигналів АЕ, крім машини КТЗ "АДАМ-1.1", входили: датчик струму зварювання, приймальний датчик ДАЭ-150, модуль підсилення, фільтрування та оцифровування сигналів АЕ, високошвидкісний цифровий реєстратор, створений на основі мікропроцесора BF548, і персональний комп'ютер.

Випробування зварювального апарата "АДАМ-1.1" показали, що він дає змогу виконувати якісне зварювання зразків з низьковуглецевої сталі товщиною 0,5 мм. Відповідно до рекомендацій [6] діаметр електродів був вибраний 12 мм, діаметр робочої поверхні – 4 мм. При цьому досягається достатнє проплавлення і утворення литого ядра d_j діаметром 2,0–2,2 мм, що відповідає рекомендаціям стандарту на виконання контактного точкового зварювання для груп з'єднань "Б" [7].

Проведення експериментів здійснювалося за такою схемою: 1) виконання КТЗ з одночасним записом сигналу АЕ; 2) контроль якості зварного з'єднання; 3) класифікація отриманого зварного з'єднання (якісне/неякісне); 4) формування зразкового шаблона сигналу АЕ (у випадку, якщо з'єднання якісне); 5) обробка сигналу АЕ і моделювання процесу формування сенсорною системою оцінки якості.

Контроль якості зварювання виконувався за допомогою руйнуючого методу, який передбачає роз'єднання з'єднаних контактним зварюванням деталей одним із двох способів: розриванням або скручуванням. Якість контактного електрозварювання оцінювалася відповідно до методики руйнівного контролю, яка регламентована стандартами ISO [8, 9]. Після руйнування з'єднання, по-перше, контролювали наявність в одному із зразків отвору, а в іншому – металевій пробки, яка містить лите ядро (рис. 1). По-друге, вимірювали за допомогою штангенциркуля діаметр металевій пробки, який розраховували як середнє арифметичне двох вимірювань: $d = (d_1 + d_2)/2$. Якщо отримане значення було менше 2,0 мм, то контактне зварювання вважалось неякісним. По-третє, зовнішнім оглядом контролювали відсутність виплесків. Якщо були виявлені значні виплески, зварювання вважалось неякісним.

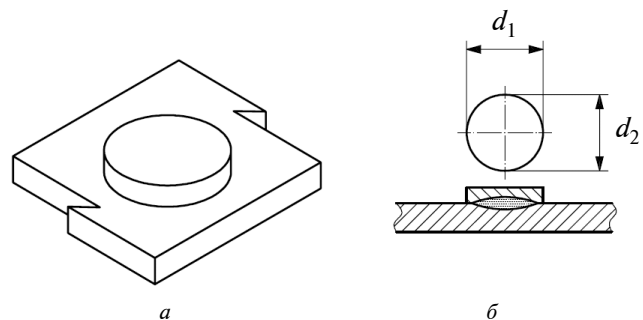


Рис. 1. Схематичне зображення точкового з'єднання: а – металеві пробка, б – ескіз розмірів

На рис. 2 подано зображення зон зварювання після виконання руйнівного контролю. Зображення на рис. 2, г відповідає якісно виконаному зварюванню; зображення, показані на рис. 2, а–в, – неякісному з'єднанню.

Для отримання сигналів АЕ, пов'язаних з явно неякісним зварним з'єднанням, в експериментах застосовувалося примусове введення збурень: забруднення зварюваних поверхонь, недостатнє зусилля обтиску, недостатня тривалість струму зварювання і збільшений діаметр робочої частини електрода.

У результаті проведення експериментів сформована база даних сигналів АЕ як дефектного, так і якісного точкового контактного зварювання. Було встановлено, що фазові перетворення металу литого ядра при контактному точковому зварюванні низьковуглецевих сталей супроводжуються сигналами АЕ в діапазоні частот 100–300 кГц.

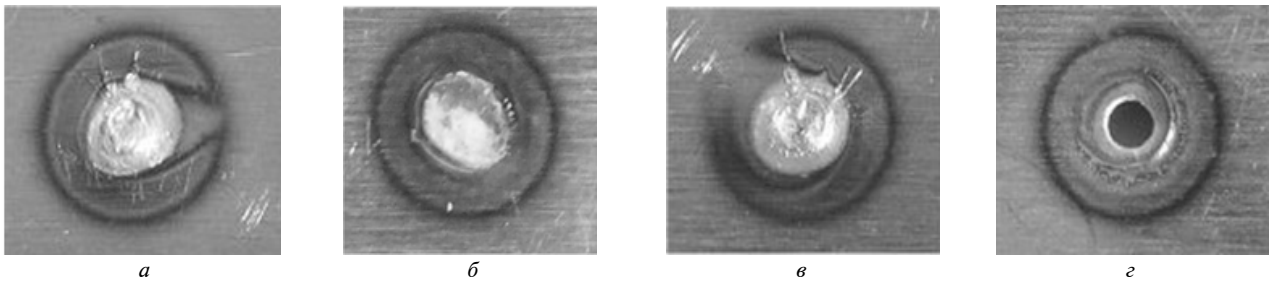


Рис. 2. Результати руйнівного контролю КТЗ: а, б, в – неякісні зварні з’єднання без вириву литого ядра різної конфігурації; г – вириг литого ядра якісного зварного з’єднання

Обробка сигналів АЕ

Розглянемо синтез методів обробки і перетворення сигналу АЕ, який дає можливість розраховувати показник якості КТЗ. Необхідно враховувати, що при проведенні випробувань навіть на простих зразках завжди доводиться

мати справу із сукупністю одночасних процесів зміни металу. Так, поряд з утворенням тріщин виникають пружна деформація з бездефектною перебудовою структури металу, пластична деформація, а також зародкові мікротріщини.

Експерименти показали, що після припинення подачі струму зварювання (в момент часу 0,65 с) виникає дислокаційний шум відносно

невеликої амплітуди і тривалістю не більше 0,05 с (рис. 3). Цей інтервал часу відповідає тривалості алотропічних і фазових перетворень металу литого ядра. Тому сигнали АЕ на цьому відрізку часу для якісно виконаного і неякісного зварних з’єднань мають різнитися. У зв’язку з цим було запропоновано на основі сигналів АЕ якісно виконаних зварних точок сформувати частотний шаблон, який можна використовувати для контролю якості зварних точкових з’єднань. Відзначимо, що така методика може бути використана для будь-яких типів машин КТЗ і умов зварювання. Однак буде необхідно формувати частотний шаблон якісного з’єднання для кожної машини КТЗ і умов зварювання окремо.

На рис. 3, а при використуваному масштабі в аналізованій часовій

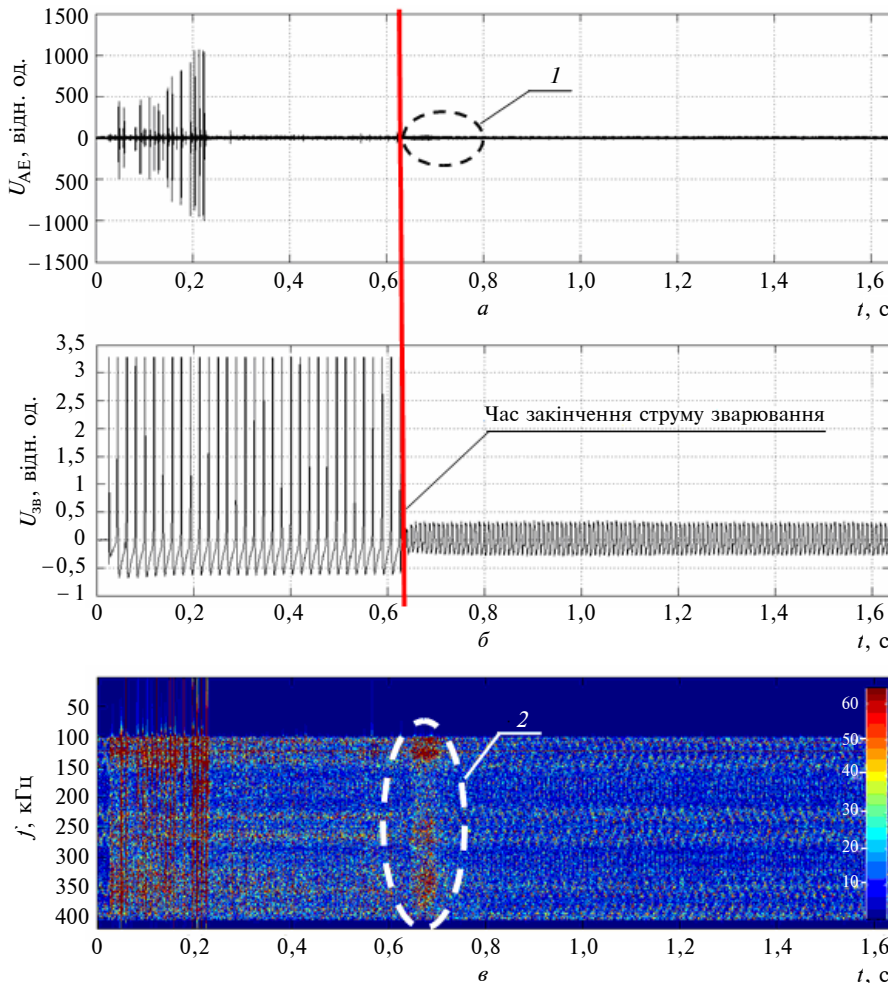


Рис. 3. Сигнали КТЗ: а – сигнал АЕ, б – сигнал струму зварювання $I_{зв}$, в – спектрограма сигналу АЕ для якісного зварного з’єднання; 1 – часова область, що аналізується, 2 – характерний частотний спектр для якісного з’єднання

області сигналів АЕ не видно внаслідок їх малої амплітуди. Однак на рис. 3, в чітко видно, що через деякий час після припинення зварювального струму в результаті кристалізації литого ядра виникає характерний частотний спектр, який має максимуми на частотах 100–150, 250–270, 340–370 кГц. Очевидно, що розробка вирішальних правил на основі аналізу амплітуди сигналів АЕ буде менш ефективною, ніж використання спектральних характеристик тих же сигналів.

Одним із методів виявлення в аналізованому сигналі зразкового часового процесу є метод згортки. За допомогою операції лінійної згортки можна визначити, чи є в аналізованому дискретному сигналі $x[n]$ інший сигнал, заданий шаблоном $h[m]$:

$$Y_{xh}[n] = \sum_{m=0}^n x[m]h[n-m],$$

де Y_{xh} – вихід (сигнал згортки); n – поточний індекс дискретного сигналу; m – розмір шаблону, що відповідає кількості тактів дискретизації аналізованого сигналу (база шаблону).

На основі методу згортки запропоновані два способи обробки сигналу АЕ. Перший спосіб використовує лінійні перетворення сигналу АЕ, які засновані на розрахунку спектра досліджуваного сигналу за допомогою процедури швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). У другому способі застосовуються нелінійні перетворення сигналу АЕ: порогова фільтрація, бінаризація і медіанна фільтрація.

На рис. 4 зображено функціональну схему методу обробки сигналу АЕ, в якому використовуються лінійні перетворення сигналів (реа-

лізовано за допомогою пакета Simulink програми MATLAB). У цьому методі сигнал АЕ піддається додатковій фільтрації смуговим фільтром з низьким значенням верхньої смуги, що дає можливість знизити частоту дискретизації вихідного часового процесу в 100 разів (процедура децимації), а потім через проміжний буфер подається на вхід вузла розрахунку ШПФ. При розрахунку ШПФ використовується функція вікна типу Хемінга. Сигнал з виходу елемента ШПФ (фактично спектральна щільність) подається на один із входів вузла розрахунку згортки Y_{xh} , на другий вхід якого подається зразковий шаблон $h_F[m]$, який сформований у частотній області. Сигнал з виходу елемента згортки подається на вхід фільтра нижніх частот, який виділяє постійну складову, а потім сигнал надходить на вихід у вигляді оцінки якості КТЗ.

Синтезовано також альтернативний метод, у якому використовуються нелінійні перетворення сигналів. Його функціональна схема зображена на рис. 5 (як і в попередньому випадку, схема реалізована в Simulink). У цьому методі сигнал АЕ піддається пороговій фільтрації, після чого надходить на вузол бінаризації, на виході якого сигнал має тільки два рівні – логічного "0" або "1". За рахунок порогової фільтрації з вхідного сигналу АЕ видаляються шуми, які не несуть корисної інформації. Далі сигнал надходить на вхід медіанного фільтра, база якого забезпечує придушення імпульсних завад тривалістю менше 0,5 мкс. На наступному етапі сигнал піддається низькочастотній фільтрації, що дає можливість зменшити частоту дискретизації процесу в 100 разів (операція децимації). Проріджений часовий процес поступає

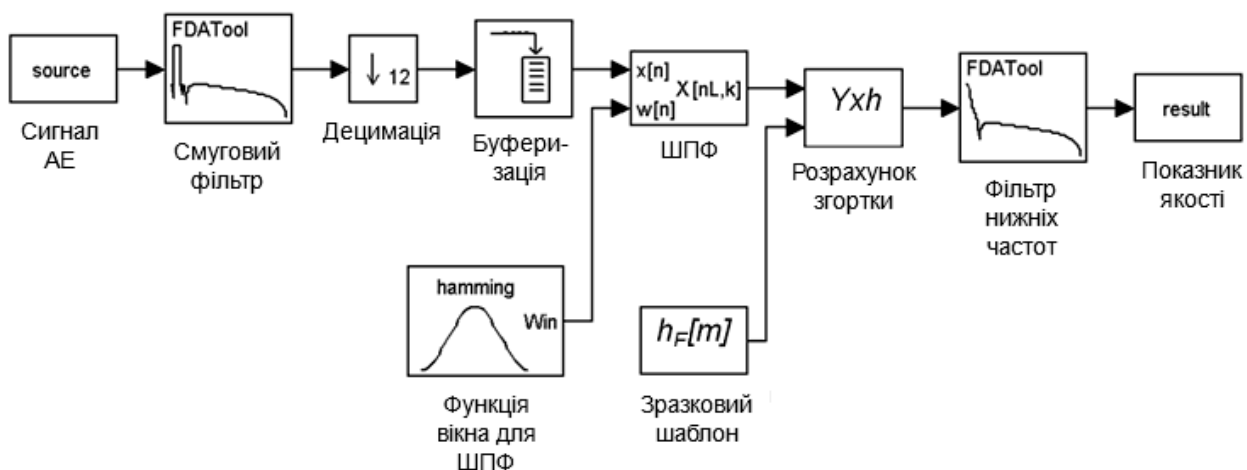


Рис. 4. Функціональна схема методу формування показника якості з використанням лінійних перетворень сигналу АЕ

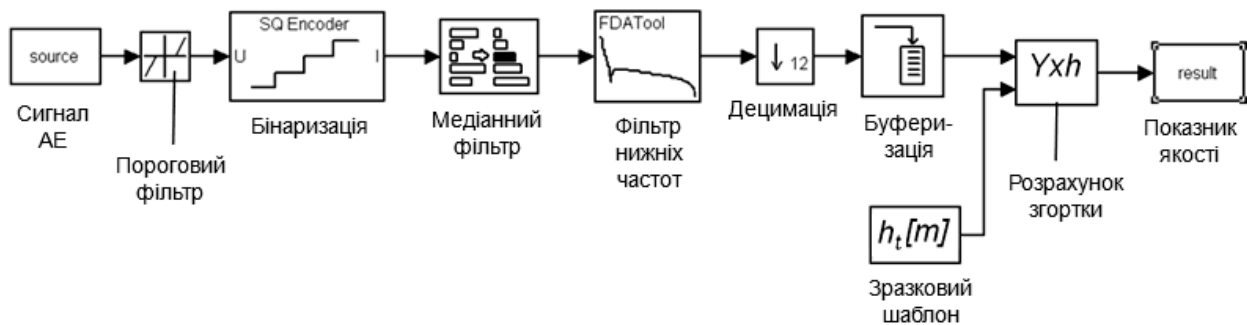


Рис. 5. Функціональна схема методу формування показника якості з використанням нелінійних перетворень сигналу АЕ

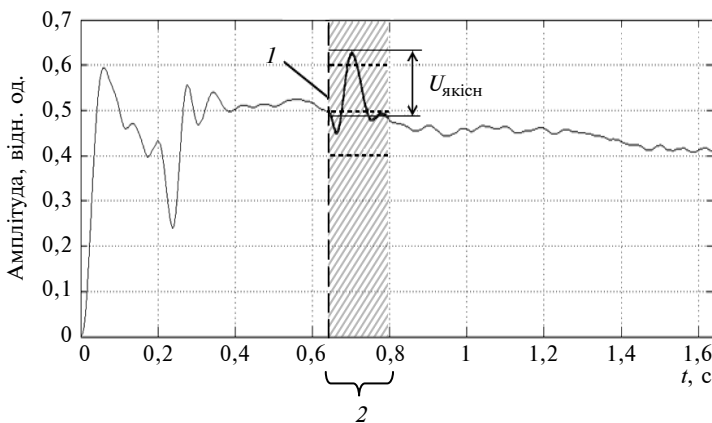


Рис. 6. Крос-кореляційна функція, отримана з використанням частотного шаблону: 1 – момент часу припинення подачі струму зварювання; 2 – часове вікно прийняття рішення; $U_{якісн}$ – рівень сигналу, відповідний якісному з’єднанню

на вхід буфера, який збирає окремі значення сигналу в векторні змінні, а потім подається на один із входів вузла розрахунку згортки Y_{xh} . На другий вхід вузла згортки подається зразковий шаблон $h_t[m]$, який сформований у часовій області. Сигнал з виходу елемента згортки являє собою оцінку якості КТЗ.

Застосування запропонованих алгоритмів дає можливість оцінювати якість КТЗ за виникненням високого рівня сигналу на виході блоку згортки в аналізованій часовій області (після закінчення струму зварювання). Поява такого піку свідчить про значний ступінь статистичного зв’язку часового процесу, який відповідає зразковому шаблону, і сигналу АЕ поточного точкового зварювання (рис. 6). Відповідно, відсутність високого рівня сигналу вказує на утворення неякісного точкового з’єднання.

Для формалізації критеріїв, що визначають якість отриманого точкового з’єднання, можна використовувати нейромережеві моделі або розробляти розв’язувальні правила із застосуванням методів статистичної діагностики.

Висновки

У результаті проведених експериментів створена навчальна вибірка АЕ-сигналів, які супроводжують процес КТЗ. Для аналізу виділена часова область після закінчення струму зварювання, тому що в цей період відбувається кристалізація металу литого ядра і виникають характерні сигнали АЕ, за якими можна судити про якість зварювання. До того ж у виділеній часовій області вплив завад є найнижчим. На основі сигналів АЕ, отриманих на зразках якісних зварних точок, сформовані частотний і часовий шаблони, які використовуються в подальшій обробці даних АЕ-контролю. Для формування показника якості КТЗ запропоновано використовувати метод згортки двох сигналів.

Експериментально встановлено, що фазові перетворення металу литого ядра при контактному точковому зварюванні низьковуглецевих сталей супроводжуються сигналами АЕ в діапазоні частот 100–300 кГц.

Подальшим напрямом досліджень є синтез нейромережевої моделі для прогнозування якості КТЗ за результатами АЕ-контролю та розроблення алгоритмів навчання нейронної мережі.

1. *Козловский С.Н.* Основы теории и технологии программированных режимов контактной точечной сварки: Монография. – Красноярск: СибГАУ, 2006. – 260 с.
2. *Бигус Г.А., Травкин А.А.* Неразрушающий контроль сварных соединений, выполненных контактной сваркой // Матер. 17 Междунар. конф. “Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики”, 5–9 октября 2009, Ялта. – Ялта, 2009. – С. 122–124.
3. *Контроль неразрушающий. Акустическая эмиссия.* Словарь: ГОСТ Р ИСО 12716–2009. – Введ. 01.01.2011. – М.: Стандартинформ, 2011. – 12 с.
4. *Неразрушающий контроль:* Справочник. Т. 7: в 2 кн. Кн. 1: Метод акустической эмиссии / В.И. Иванов, И.Э. Власов; Кн. 2: Вибродиагностика / Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др.; Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
5. *I. Polajnar et al.*, “Sources of acoustic emission in resistance spot welding”, in Proc. Int. Conf. “DEFEKTO-SKOPIE 2008”, Brno, Czech Republic, 2008, pp. 187–194.
6. *Технология и оборудование контактной сварки:* Учебник для машиностроительных вузов / Б.Д. Орлов, А.А. Чакалев, Ю.В. Дмитриев и др.; под общ. ред. Б.Д. Орлова. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
7. *Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры:* ГОСТ 15878–79. – Введ. 07.01.1980; взамен ГОСТ 15878–70. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 9 с.
8. *Resistance welding. Peel and chisel testing of resistance spot and projection welds,* ISO 10447:2006(E), 2006.
9. *Resistance spot welding and projection welds. Destructive testing of welds. Specimen dimensions and procedure for impact shear test and cross-tension testing,* ISO 14323:2006(E), 2006.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
5 жовтня 2012 року