2. Марковец М. П. Построение диаграммы истинных напряжений по твердости и технологической пробе // Журн. техн. физики. 1949. Т. XIX, вып. 3. С. 371–382.

3. Ишлинский А. Ю. Осесимметричная задача пластичности и проба Бринелля // Прикл. математика и механика. 1943. Т. 8. С. 201.

4. Марковец М. П., Пашнина В. И. Исследования в области измерения твердости // Тр. металлург. инт-ов СССР. 1967. Вып. 91/151.

5. Марковец М. П., Куртен Л. И. Определение сопротивления ползучести металлов методом длительного вдавливания шара в вырезанную лунку // Проблемы прочности. 1981. № 9. С. 88–91.

N. N. Avtonomov, M. S. Puchnin

REGISTRATION OF THE SPHERICAL BALL INDENTOR DIAGRAM WITH THE USE OF THE NEW MEASURING HEAD

In the article the authors describe the new measuring head and stand for mechanical testing of metal materials. The experimental results are presented in the article as a «load–indentation depth» diagram.

Keywords: spherical indenter, indentation depth, hardness.

© Автономов Н. Н. , Пучнин М. С., 2011

УДК 621.791.72

В. Я. Браверман, В. С. Белозерцев, Т. Г. Вейсвер

УСТРОЙСТВО ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО СЛЕЖЕНИЯ ЗА СТЫКОМ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ*

Рассмотрено устройство автоматического позиционирования электронного луча по стыку свариваемых деталей во время сварки, в котором реализован поиск экстремума синхронным детектированием сигнала датчика (рентгеновского или вторично-эмиссионного). Измерительные операции осуществляются во время вывода луча из канала по направлению сварки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, вторично-электронная эмиссия, рентгеновское излучение, синхронный детектор.

В настоящее время достаточно много внимания уделяется вопросам обеспечения точного позиционирования электронного луча по стыку свариваемых деталей при сварке протяженных стыков. В качестве источников информации о положении луча относительно стыка используются такие сопутствующие явления, как вторичная электронная эмиссия и рентгеновское излучение. В случае отсутствия оплавления свариваемых кромок характер изменения вторично-эмиссионного тока и интенсивности тормозного рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка является одинаковым – экстремальным, при этом экстремум – минимум характеристики – соответствует совпадению координат луча и стыка, благодаря чему становится возможным применение унифицированного аппаратного состава для построения устройств слежения за стыком.

Анализ вторичных излучений при отсутствии оплавления не случаен, поскольку выделение информации о положении луча относительно стыка из канала проплавления затруднено из-за наличия высокого уровня помех. В то же время требуемую в процессе сварки информацию можно получить в непосредственной близости от канала, что может быть реализовано, например, кратковременным выводом луча из канала, осуществлением измерительных операций и возвращением луча в зону сварки. При этом максимальное время вывода должно быть таким, чтобы не произошло заметных изменений в сварочной ванне, а скорость перемещения луча должна обеспечить ввод энергии, недостаточной для оплавления кромок стыка.

В разработанном авторами устройстве для автоматического слежения за стыком при электронно-лучевой сварке реализован поиск экстремума, основанный на способе синхронного детектирования сигнала датчика стыка. Применение синхронного детектирования основано на том, что при сканировании стыка электронным лучом в спектре сигнала датчика стыка появляются гармонические составляющие с частотами, кратными частоте сканирования. Так, амплитуда составляющей сигнала с частотой, равной частоте сканирования, пропорциональна отклонению луча относительно стыка, а ее фаза определяет направление смещения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (код проекта 2.1.2/9274).

Появление в сигнале датчика гармонических составляющих связано с тем, что в параметры электронного луча вводятся периодические составляющие. В частности, математическое ожидание положения луча можно представить в виде суммы постоянной составляющей (случайного отклонения луча от стыка) и периодической составляющей с заданной амплитудой (сканирования стыка лучом).

Вторичная электронная эмиссия и рентгеновское излучение являются следствием взаимодействия первичного пучка электронов с веществом свариваемых деталей. Поэтому если допустить, что плотность распределения электронов в луче подчиняется нормальному закону, то при отсутствии оплавления ток вторичных электронов и интенсивность тормозного рентгеновского излучения с точностью до соответствующих коэффициентов определяются выражением [1]:

$$J(\varepsilon) = KI_b \left\{ 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} \exp\left[-\frac{(x-\varepsilon)^2}{2\sigma^2} \right] dx \right\}, \qquad (1)$$

где J – параметр вторичного излучения; K – коэффициент, характеризующий природу вторичного излучения; I_b – ток луча; σ – среднеквадратическое отклонение электронов от оси пучка; ε – математическое ожидание положения луча; x_1 и x_2 – координаты кромок стыка; $(x_1 - x_2) = \delta$ – зазор в стыке.

Анализ графиков, построенных по выражению (1) (рис. 1), показывает, что при ε = 0 координата x экстремума совпадает с координатой стыка x= 0.

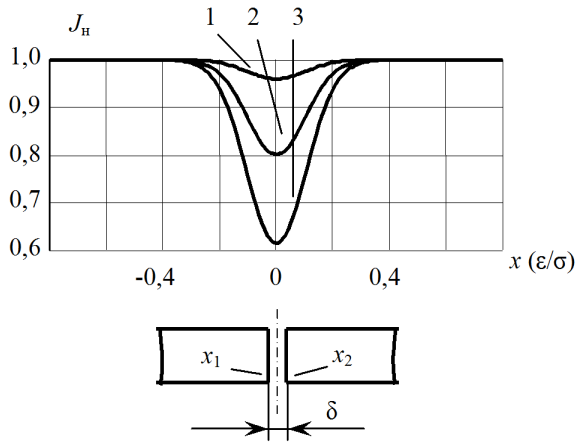


Рис. 1. Зависимость интенсивности вторичных излучений J от положения луча относительно стыка:
σ = const = 0,1 мм; δ = var; *1* – δ/σ = 0,1; *2* – δ/σ = 0,5; *3* – δ/σ = 1; $J_н$ – нормализованный параметр J

Экстремальный характер этих зависимостей обусловливает возможность применения известных способов поиска экстремума для определения положения луча относительно стыка. Одним из таких способов является способ синхронного детектирования сигнала датчика (вторично-эмиссионного или рентгеновского), для чего вводятся поисковые движения – сканирование стыка электронным лучом. В результате математическое ожидание положения луча может быть представлено следующим образом:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_m \sin\alpha,$$

где ε_0 – смещение луча относительно стыка; ε_m – амплитуда поискового движения; $\alpha = \omega t$, здесь ω – частота, t – время. Тогда выражение (1) примет вид

$$J(\varepsilon_0) = KI_b \left\{ 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} \exp\left[-\frac{(x-\varepsilon_0-\varepsilon_m \sin\alpha)^2}{2\sigma^2} \right] dx \right\}. \qquad (2)$$

При наличии периодической составляющей в параметре ε выходной сигнал датчика (2) может быть представлен рядом Фурье.

Рассмотрим зависимость составляющей ряда b_1 с частотой ω от ε_0. Эта составляющая определяется как коэффициент ряда Фурье:

$$b_1(\varepsilon_0) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} J(\varepsilon_0) \sin\alpha d\alpha. \qquad (3)$$

График зависимости $b_1(\varepsilon_0)$, рассчитанной в соответствии с (3) (рис. 2), позволяет сделать вывод о том, что в окрестностях стыка спектральная составляющая $b_1(\varepsilon_0)$ пропорциональна рассогласованию положений луча и стыка, а ее знак определяет направление рассогласования. Это обстоятельство предполагает возможность применения синхронного детектирования сигнала датчика для получения информации о положении луча относительно стыка.

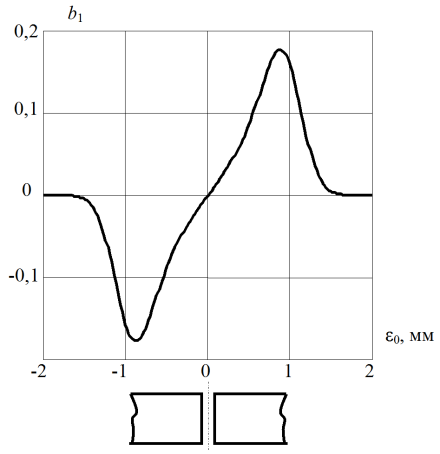


Рис. 2. Зависимость амплитуды синусоидальной составляющей сигнала датчика с частотой ω от положения луча относительно стыка:
σ = 0,1 мм; δ = 0,1 мм; ε_m = 1 мм

Устройства для автоматического слежения за стыком при электронно-лучевой сварке (рис. 3) работает следующим образом [2].

С помощью генератора выброса Г и отклоняющей системы $ОС_Y$ луч периодически выводится из сварочной ванны по направлению сварки. В это же время генератором ГС и отклоняющей системой $ОС_X$ осуществляется сканирование стыка лучом (рис. 4, *а*). Одновременно генератор ГС формирует опорное напряжение, поступающее на один из входов синхрон-

ного детектора СД. В синхронном детекторе происходит перемножение сигналов датчика Д и опорного напряжения:

$$[b_1(\varepsilon_0)\sin\alpha]\sin\alpha = [b_1(\varepsilon_0)] / 2 - [b_1(\varepsilon_0)\cos 2\alpha] / 2. \quad (4)$$

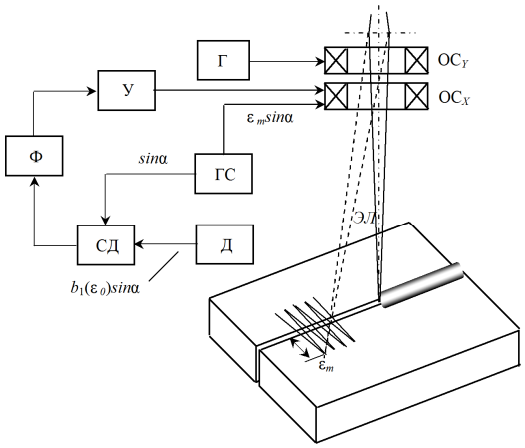
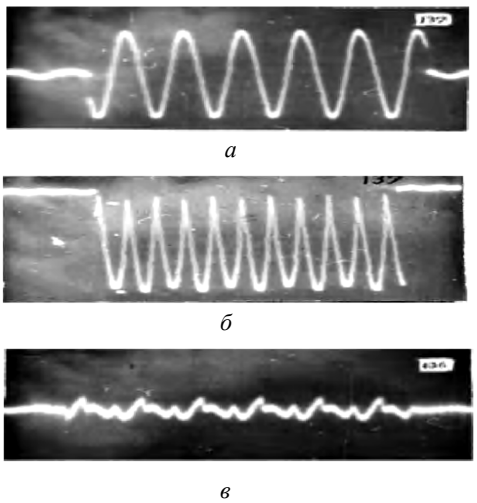


Рис. 3.Структурная схема устройства:
Д – датчик; ГС – генератор сканирования; СД – синхронный детектор; Ф – фильтр; У – усилитель; Г – генератор выброса луча; ОС$_X$ – отклоняющая система по оси X; ОС$_Y$ – отклоняющая система по оси Y

Из (4) и осциллограмм (см. рис. 4) следует, что если есть отклонение $b_1(\varepsilon_0)$ луча от стыка, то сигнал на выходе синхронного детектора представляет сумму постоянной и переменной составляющей с частотой, равной 2ω (рис. 4, *б*). Высокочастотная составляющая отфильтровывается фильтром Ф, и сигнал постоянного тока, пропорциональный отклонению луча через усилитель мощности У, поступает в отклоняющую систему ОС$_X$, в результате чего осуществляется коррекция положения луча. При совпадении координат луча и стыка $b_1(\varepsilon_0) = 0$ и сигнал на выходе синхронного детектора практически отсутствует (рис. 4, *в*).



а

б

в

Рис. 4. Осциллограммы сигналов:
а – ток в отклоняющей системе X; *б* – сигнал на выходе синхронного детектора при $\varepsilon_0 \neq 0$; *в* – сигнал на выходе синхронного детектора при $\varepsilon_0 = 0$

Техническая реализация рассмотренного устройства не представляет особых трудностей. В качестве вторично-эмиссионного датчика используется коллектор вторичных электронов, а в качестве рентгеновского датчика – датчик сцинтилляционного типа с фотоэлектронным умножителем (рис. 5).

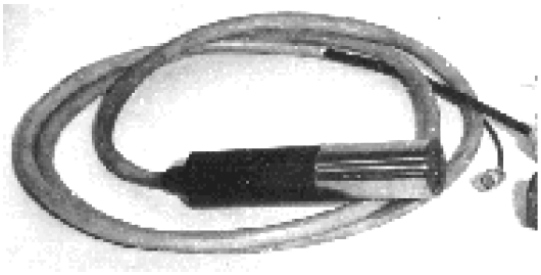


Рис. 5. Рентгеновский датчик

Макрошлифы соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой без слежения и со слежением за стыком, представлены ниже (рис. 6).

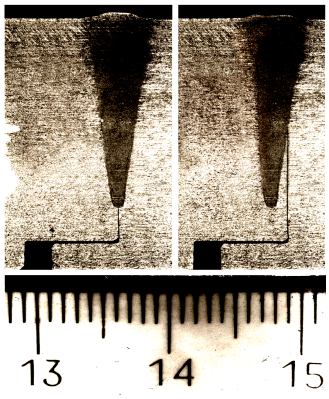


Рис. 6. Макрошлифы соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой без слежения (правый снимок) и со слежением за стыком (левый снимок)

Устройства, разработанные в соответствии с приведенной на рис. 3 функциональной схемой, в течение нескольких лет эксплуатируются при электронно-лучевой сварке крупногабаритных изделий аэрокосмической отрасли. Погрешность совмещения луча со стыком не превышает 0,1 мм.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

– одинаковая природа вторично-эмиссионного и рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке позволяет использовать для устройств управления одинаковый аппаратный состав;

– в условиях электронно-лучевой сварки предпочтительнее применять рентгеновские датчики слежения за стыком, так как рентгеновское излучение наименее подвержено действию различных помех;

– применение синхронного детектирования сигнала датчика стыка увеличивает помехозащищенность устройства за счет того, что вероятность помехи на частоте сканирования мала.

Библиографические ссылки

1. Reichmann A., Leffler D., Bartel R. State of the Art of a FEP Control Unit of Beam Scanning for Electron Beam Equipment // Proc. of 6th Intern. Conf. on Beam Technology. Halle (Saale), 2004. P. 102–107.

2. Control Over Electron Beam Welding Process by X-Ray Radiation from the Zone of Welding / V. Shabanov, V. Braverman, V. Bashenko, and S. Bajakin // Proc. of 6th Intern. Conf. on Beam Technology. Halle (Saale), 2004. P. 68–74.

V. Ya. Braverman, V. S. Belozertsev, T. G. Veysver

AUTOMATIC DETECTION SYSTEM FOR THE SEAM AT THE ELECTRON BEAM WELDING PROCESS

In the article the description of device, which provides automatic positioning of electron beam relative to joint of welded parts during welding, is given. Search of the acme, based on synchronous detection of sensor signal (X-ray or secondary emission) is realized in the device. Measurements were made when beam goes out of the channel following the welding direction.

Keywords: *electron beam positioning, secondary electron emission, X-ray radiation, synchronous detector.*

© Браверман В. Я., Белозерцев В. С., Вейсвер Т. Г., 2011

УДК 669.715.6:673.3.8:66.069.84

Г. Г. Крушенко

ДЕГАЗАЦИЯ ЛИГАТУР Al–Zr И Al–Ti С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННОГО СПЛАВА АЛ27-1

Предварительный переплав лигатур Al–Zr и Al–Ti приводит к повышению механических свойств сплава АЛ27-1.

Ключевые слова: переплав, лигатуры Al–Zr и Al–Ti, механические свойства, сплав АЛ27-1.

В аэрокосмической отрасли при производстве высоконагруженных литых деталей летательных аппаратов широко применяется алюминиево-магниевый сплав АЛ27-1 (состав по ГОСТ 1583–93: Mg – 9,5…11,5 %; Be – 0,05…0,15 %; Ti – 0,05…0,15 %; Zr – 0,05…0,20 %; Al – остальное; примеси – не более 0,05 % каждого элемента: Mn, Cu, Zn, Si, Fe; сумма примесей для всех видов литья – не более 0,5 %). Этот сплав характеризуется высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, способностью выдерживать высокие статические и ударные нагрузки. Требуемые механические свойства сплава в термически обработанном состоянии (режим Т4): временное сопротивление $\sigma_в \geq 350$ МПа; относительное удлинение $\delta \geq 15$ %; твердость по Бринеллю НВ ≥ 75 [1].

Недостатки литейных сплавов системы Al–Mg заключаются в их повышенной склонности к взаимодействию с газами, что приводит к образованию в отливках газовой пористости и газовых раковин, поэтому приготовление таких сплавов нужно проводить под флюсом. С этой же целью при литье в песчано-глинистые формы в формовочную смесь добавляют борную кислоту [2], которая препятствует взаимодействию жидкого металла с влагой формовочной смеси, однако приводит к образованию в сплаве неметаллических включений и оксидных пленок.

Пленка на поверхности жидких сплавов системы Al–Mg, содержащих более 1,0 % Mg, состоит из пористой рыхлой окиси магния MgO, не препятствующей взаимодействию расплава с газовой атмосферой [3], в связи с чем в состав сплава входит бериллий, образующий на поверхности жидкого металла прочную оксидную пленку BeO.

Еще одной особенностью сплавов системы Al–Mg является их затвердевание в широком интервале температур. При этом кристаллизация происходит одновременно в большом объеме металла при сильно разветвленной сетке дендритов, что затрудняет питание отливки жидким металлом в междендритных пространствах. Вследствие этого отливка оказывается пораженной рассеянной усадочной пористостью, приводящей к снижению герметичности отливок и ухудшению их механических свойств, особенно прочностных. Кроме того, присутствующие в расплаве газы в процессе кристаллизации выделяются в поры, образуя так называемую газово-усадочную пористость, которая в еще большей степени ухудшает указанные характеристики.

С целью повышения механических свойств литых изделий, получаемых из сплава АЛ27-1, при его приготовлении в расплав в составе лигатур вводят титан и цирконий, приводящие к измельчению структуры сплава.