

МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

А.Е. Розен, Д.Б. Крюков, В.А. Соловьев, И.С. Лось

Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

Отсутствие эффективного метода контроля произведенного взрывом биметаллического или многослойного материала ограничивает широкое применение данной технологии [1]. В большинстве случаев используют так называемые неразрушающие способы контроля (НК), позволяющие определить наличие или отсутствие в изделиях тех или иных дефектов, косвенно характеризующих их прочность и надежность. Эти испытания основаны на различных физических явлениях: прохождении и передаче энергии, либо вещества [2].

При выборе того или иного метода НК учитывают его чувствительность, информативность, достоверность, оперативность, производительность, а также возможность фиксировать документально результаты контроля [3].

Использовать традиционные методы НК, такие как, радиационный, акустический, магнитный, вихретоковый, капиллярный, охватывающие до 95% проводимого в настоящее время контроля, для биметаллических материалов не всегда представляется возможным. Это связано с тем, что основному контролю подлежат большие поверхности, в которых в качестве дефектов могут выступать узкие щелеобразные непровары или спаи, а также литые зоны с рассредоточенными усадочными раковинами. Данные дефекты возникают в местах контакта соединяемых поверхностей и, соответственно, глубина их залегания регламентируется толщинами свариваемых материалов, которые могут меняться от миллиметра до несколько сотен миллиметров [4].

Анализ основных способов неразрушающего контроля [2] показывает, что магнитный метод ограничен возможностью контроля только ферромагнитных материалов, в то время как в большинстве случаев биметалл содержит в качестве плакирующего слоя либо металлы, относящиеся к группе цветных сплавов, либо железоуглеродистые сплавы с аустенитной структурой не обладающих магнитными свойствами.

Применение в качестве неразрушающего контроля капиллярного метода для биметаллического материала является также не-

приемлемым, т.к. он позволяет проводить оценку качества только поверхностного слоя или выявлять дефекты, выходящие на поверхность. Дефекты, которые могут возникнуть при сварке биметалла, в большинстве случаев, находятся на свариваемых поверхностях и не соприкасаются с наружными.

Радиационные методы, несмотря на свою универсальность (контроль материалов любых толщин, как металлов, так и неметаллов), имеют, тем не менее, низкую достоверность, особенно в отношении узких трещин и непроваров, расположенных перпендикулярно по отношению к радиационному полю. Достоверность в этом случае не превышает 60, а может снижаться и до 20% [3].

Акустические методы контроля эффективны только при толщинах более 4 мм, в то время как подавляющее число плакируемых материалов, получаемых сваркой взрывом, имеют толщину, не превышающую 2...3 мм. Кроме этого, достоверность результатов резко снижается в случаях, когда биметаллические пары образованы материалами с резко отличающейся акустической жесткостью. В частности для пары алюминий – сталь достоверность не будет превышать 55%, а для пары магний – тантал - 15% [3]. Наряду с этим технически невозможно произвести акустический контроль для многослойных материалов.

Главным недостатком всех выше перечисленных методов является возможность существования скрытых дефектов, которые практически отсутствуют, когда исследуемый объект находится в ненапряженном состоянии.

Достоинством голографических методов является возможность измерения деформации поверхности трехмерных объектов с высокой точностью. Недостатком – неподвижность объекта контроля в течение всего времени экспонирования голограммы, необходимость проведения двух разнесенных во времени экспозиций, при этом сохраняя место расположения голограммы относительно исследуемого объекта и других элементов оптической схемы с высокой точностью.

С появлением фотоприемных матриц, способных воспроизводить сравнительно высокие пространственные частоты, а также с

развитием методов цифровой обработки изображений, особую роль в измерении деформаций получают фотоэлектронные корреляционные спекл-интерферометрические методы неразрушающего контроля, которые предлагается использовать для изделий, полученных сваркой взрывом.

На рисунке 1 представлена функциональная схема фотоэлектронного корреляционного спекл-интерферометра. Излучение от гелий-неонового лазера Л через формирующую оптику O_1 направляется на исследуемую поверхность биметалла БМ. Рассеянное излучение от поверхности, отразившись от зеркал Френеля Z_1 и Z_2 при помощи объектива O_2 направляется на фотоприемную матрицу. Фотоприемная матрица расположена в плоскости изображения объектива O_2 . Зеркало Z_1 и зеркало Z_2 установлены друг к другу под углом ~ 180 градусов и имеют регулировки, позволяющие сдвигать изображения исследуемой поверхности относительно друг друга, поэтому этот интерферометр называют интерферометром с разделением спекл структур. На фотоприемной матрице формируются два когерентных изображения, интерферирующих друг с другом. Фотоприемная матрица через контроллер вывода изображения К соединена с ПЭВМ через порт USB. На обратной стороне исследуемой поверхности биметалла расположены нагревательные элементы НЭ.

В плоскость фотоприемной матрицы приходят волны, рассеянные различными участками исследуемой поверхности и за счет сдвига одного изображения относительно другого на величину Δ на фотоприемной матрице формируются два интерферирующих волновых фронта. Если в предметной плоскости рассматривать рядом лежащие точки P_1 и P_2 , расстояние между которыми δ , то от них в сопряженную точку плоскости изображения попадут два рассеянных излучения с интенсивностями J_1 и J_2 и разностью фаз между ними φ .

Результирующая интенсивность волны I_1 в сопряженной точке фотоприемной матрицы равна

$$I_1 = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2} \cos \varphi \quad (1)$$

Рельеф исследуемой поверхности меняется случайным образом, поэтому случайна и разность фаз, а, следовательно, результирующая интенсивность от точки к точке

принимает случайные значения, что и называется спекл-эффектом. Размер спеклов в плоскости изображения [5] определен как

$$d_{cn} \approx 2,4\lambda b/a \quad (2)$$

где λ – длина волны лазерного излучения, b – расстояние от объектива до плоскости изображения, a – диаметр объектива.

Первым этапом исследования поверхности является получение цифрового изображения интерференционного спекла и сохранение его в памяти ПЭВМ. Затем при помощи нагревательного элемента в течение короткого промежутка времени нагревается нижний участок биметалла, в результате чего этот участок деформируется

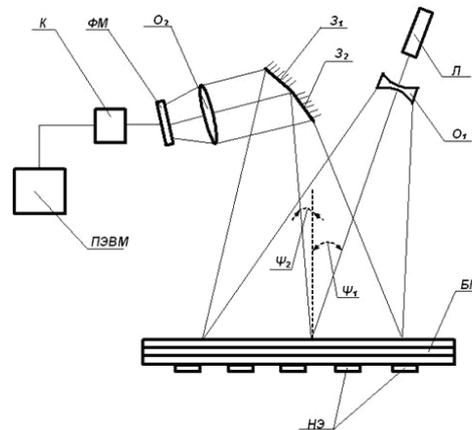


Рисунок 1 – функциональная схема фотоэлектронного корреляционного спекл-интерферометра.

На рисунке 2 приведена интерферограмма, полученная для угла наблюдения $\psi_2 = \psi_1 = 10^\circ$ при нагревании биметаллического образца (Сталь 10 толщиной 8 мм + Алюминий АД0 толщиной 2 мм) размером 100×250 мм. Температура нагрева составляет 200 °С при скорости нагрева 5 °С в секунду.

Изменения координат точек в предметной плоскости приведет к тому, что в сопряженной точке плоскости изображения изменится разность фаз в соотношении (1) на величину $\Delta\delta$. Тогда результирующая интенсивность излучения I_2 в сопряженной точке плоскости изображения будет

$$I_2 = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2} \cos (\varphi + \Delta \varphi) \quad (3)$$

МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

Вторым этапом исследования поверхности является получение цифрового изображения интерференционного спекла в момент максимального или близкого к нему уровня деформации и сохранение его в памяти ПЭВМ. Изображения интерференционных спеклов, не смотря на наличие интерференционных членов $2\sqrt{J_1 J_2} \cos \varphi$ и $2\sqrt{J_1 J_2} \cos(\varphi + \Delta\varphi)$, не позволит наблюдать интерференцию в силу того, что разности фаз φ в первом и втором случаях распределены случайным образом.

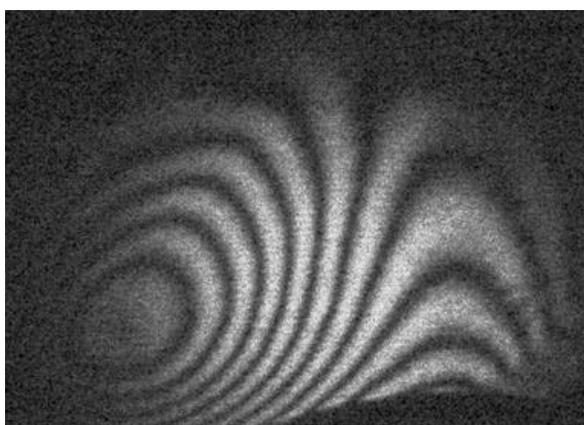


Рисунок 2 – Интерферограмма

Тем не менее величины I_1 и I_2 коррелированы и функция корреляции $\rho(\Delta\varphi)$ зависит от разности хода $\Delta\varphi$. В работе [5] приведена функция корреляции двух случайных переменных I_1 и I_2

$$\rho(\Delta\varphi) = (1 + \cos \Delta\varphi) / 2 \quad (4)$$

т.е. корреляция равна единице, когда $\Delta\varphi = 2n\pi$ и равна нулю, когда $\Delta\varphi = (2n + 1)\pi$.

Третьей процедурой является получение видимой интерференционной картины деформированной исследуемой поверхности. Для этого два полученных ранее цифровых изображения совмещают друг с другом пиксель в пиксель, а затем вычитают.

В результате при вычитании коррелированные части спеклов дадут при $\Delta\varphi = 2n\pi = \text{const}$ нулевые значения интенсивностей, а при $\Delta\varphi = (2n + 1)\pi = \text{const}$ некоррелированные части спеклов дадут интенсивность близкую к среднему значению $(I_1 + I_2) / 2$ $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Таким образом, вдоль линий, где $\Delta\varphi = (2n + 1)\pi = \text{const}$ в разностном цифровом изображении появляются интерференционные полосы. При этом предполагается, что величины I_1 , I_2 и φ независимы и остаются неизменными при температурном воздействии, которое приводит к появлению $\Delta\varphi$. Если предположение выполняется частично или не выполняется, то корреляция в спекл-картине будет уменьшаться, видность электронного разностного изображения уменьшаться и, в конечном счете, интерференционная картина исчезнет совсем. Необходимо сделать замечание, что если размер спеклов будет равен или сопоставим с интервалами между интерференционными полосами, то видность полос будет равна нулю или приближаться к нулю. Чтобы видность интерференционных полос стала приемлемой, нужно зеркалом Z_1 добиться необходимого смещения двух изображений.

Пространственное распределение спеклов изображения определяется дифракционным пределом оптической системы, формирующей изображение. Максимальная пространственная частота зависит от апертуры объектива, формирующего изображение и расстояния между объективом и исследуемой поверхностью

$$g_{\min} = 1 / f_{\max} = \lambda \cdot f / a = \lambda \cdot NA \quad (5)$$

где, f – фокусное расстояние,
 a – расстояние между объективом и исследуемым предметом,

$NA = f/a$ – числовая апертура объектива.

При размере фотоприемной матрицы 22 x 16 мм и разрешении, равным 8 мегапикселей, минимальный интервал, разрешаемый матрицей, будет составлять 6,6 мкм, а пространственная частота $\sim 150 \text{ мм}^{-1}$. Используя гелий-неоновый лазер с длиной волны $\lambda = 632,8 \text{ нм}$ для разрешения системы всех содержащихся в спектре сигнала пространственных частот необходимо, чтобы числовая апертура объектива соответствовала соотношению $NA \approx 10$.

Изменение разности фаз $\Delta\varphi$ зависит от угла падения ψ_1 излучения на исследуемую поверхность и угла ψ_2 отражения от нее

$$\Delta\varphi = 2\pi(\cos \psi_1 + \cos \psi_2)\Delta\delta / \lambda \quad (6)$$

Как следует из соотношения (6) чувствительность установки можно изменять, выбирая углы ψ_1 и ψ_2 .

Так при углах $\psi_1 \approx 0$ и $\psi_2 \approx 0$

$$\Delta\varphi = 4\pi\Delta\delta / \lambda \quad (7)$$

Температурное воздействие приведет к тому, что появится не только деформация, но и ее форма будет определяться наличием и величиной внутренних дефектов. В цифровом разностном изображении форма интерференционных полос определяет изолинии равных разностей хода $\Delta\varphi$, соответствующих деформаций или их производных (см. рисунок 2).

Таким образом, была установлена возможность применения электронных корреляционных спекл-интерферометрических мето-

дов неразрушающего контроля для изделий, полученных сваркой взрывом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Матусевич А.С. Композиционные материалы на металлической основе. – М.: Наука и техника, 1978. – 216 с.
2. Маслов Б.Г. Комплексный контроль сварных соединений и изделий. Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1995. – 59 с.
3. Кудинов В.М. Сварка взрывом в металлургии. – М.: Металлургия, 1978. – 168 с.
4. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, В.Н.Филинов и др.; Под ред. В.В.Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.
5. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. – М.: Мир, 1986. – 328 с.