

УДК 621.179

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ТИПА "KISSING BONDS" В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Быченко В.А.<sup>2</sup>, Коновалов Г.Е.<sup>1</sup>, Майоров А.Л.<sup>1</sup>, Прохорович В.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНУ "Институт прикладной физики НАН Беларуси", Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>УН «Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Известно, что сварка трением с перемешиванием (FSW Friction Stir Welding) является одним из наиболее перспективных способов соединения материалов [1]. Особенностью сварки трением с перемешиванием является то, что металл в зоне соединения не плавится, а нагревается до пластического состояния. Выделение (генерирование) теплоты происходит именно в зоне контакта. За счет этого сварка происходит благодаря пластической деформации под воздействием механического перемешивания материалов специальным инструментом. Соответственно в зоне сварного соединения должны отсутствовать традиционные для сварки плавлением дефекты, такие как горячие трещины, поры. Механические напряжения в зоне сварного шва также должны отсутствовать.

Однако можно предположить, что для получения качественного сварного шва необходимо обеспечить ряд технологических параметров процесса. В первую очередь это температура, а значит частота вращения и скорость продвижения инструмента. В свою очередь данные параметры зависят от формы инструмента, его теплопроводности и теплофизических характеристик соединяемых материалов. При сварке алюминиевых сплавов на свободной границе образуются плохо растворимые окислы. Можно предположить, что при осуществлении сварки трением с перемешиванием окислы будут попадать вглубь материала и распределяться хаотичным образом в зоне сварного шва.

При достаточной интенсивности перемешивания и температуре свариваемых кромок эти окислы должны разбиваться до мелкодисперсного состояния и не оказывать влияния на прочностные свойства сварного соединения. Но, если температура и интенсивность перемешивания недостаточны, то окисные пленки будут иметь "крупные" размеры и, при определенных условиях, образовывать сплошные пленки размерами в десятки и сотни микрон.

При этом можно предположить, что вероятность наличия пленок наиболее высока в корневой зоне шва, так как в верхней части температура выше и процессы разрушения пленок и перемешивания идут более интенсивно за счет формы инструмента. Кроме того, любое свариваемое изделие (в нашем случае – листы) имеет определенные допуски на размеры. И если рабочий

инструмент базируется на верхней части свариваемого изделия, то в нижней части шва температурные условия и условия перемешивания могут изменяться вместе с изменением толщины свариваемых изделий (в пределах допуска).

Проведенный анализ показывает, что при разработке метода контроля, усилия должны быть направлены на обнаружение дефектов в корне сварного шва. Причем дефекты имеют характер "kissing-bonds", то есть плотное соединение материалов без взаимной диффузии материалов. Подобные дефекты очень трудны для выявления. В частности, рентгеновские способы позволяют обнаруживать дефекты, имеющие раскрытие, а продольная составляющая акустической волны не замечает при распространении такой дефект. В данном случае, взаимодействие акустического сигнала с дефектом можно рассматривать, как взаимодействие с частично закрепленной границей [2].

Рассмотрим несколько подходов к решению поставленной задачи. Первый из них заключается в анализе спектральных и фазовых характеристик зондирующих, прошедших и отраженных сигналов. Другой подход основан на выявлении характера взаимодействия с исследуемой границей тангенциальной и нормальной составляющих упругой волны. Вопрос заключается в том, что регистрировать при измерениях. Понятно, что когда ультразвуковая волна взаимодействует с такой, частично закрепленной границей характер преобразования нормальных и тангенциальных составляющих различен.

Можно предположить, что нормальная составляющая фактически не изменится, а тангенциальная, наоборот, большей частью отразится (это зависит от степени закрепленности). Можно также предполагать, что в сигнале произойдут фазовые изменения, когда акустический пучок будет пересекать область с разной степенью закрепления.

Рассмотрим вариант, при котором пучок, проходящий через дефект типа "kissing bonds" меняет в определенной области фазу (рис.1). Пусть ширина основного лепестка диаграммы направленности в зоне пересечения плоскости дефекта составляет  $(L + L_1)$ , где  $L$  - ширина дефекта.

Диаграмма направленности линейной излучающей системы в дальней зоне имеет вид:

$$f(\theta) = \int_{-L_a/2}^{L_a/2} I(z) \exp[j\beta z \cos(\theta)] dz, \quad (1)$$

где  $L_a$  - поперечный геометрический размер излучающей апертуры;  $\cos \theta$  - угол наклона к апертуре;  $I(z) = |I(z)| \exp[j\Phi(z)]$  - амплитудно-фазовое распределение давлений по длине излучателя;  $\beta = 2\pi/\lambda$  - волновое число среды, в которой распространяется акустический сигнал.

Для того, чтобы найти диаграмму направленности пьезоэлемента после встретившегося на пути дефекта, необходимо рассмотреть амплитудно-фазовое распределение давлений в плоскости дефекта, то есть  $AA'$ . При поршневом режиме возбуждения можно представить полученное амплитудно-фазовое распределение в виде суммы:  $I(z) = I_1(z) + I_2(z)$ , где  $I_1(z) = A \exp[j\varphi]$ ,  $I_2(z) = A \exp[j0]$ , слагаемые отличающиеся фазой сигналов. Соответственно выражение для диаграммы направленности (1) тоже можно представить в виде суммы:  $f(\theta) = f_1(\theta) + f_2(\theta)$ .

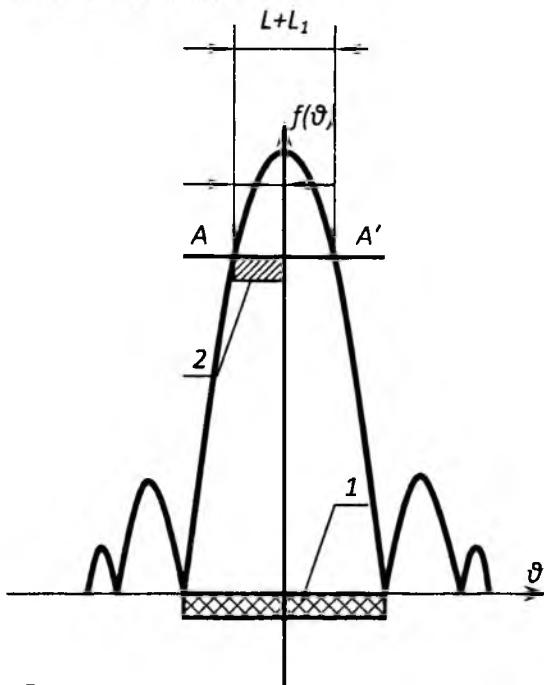


Рисунок 1 – Иллюстрация физической модели взаимодействия акустического сигнала с дефектом, изменяющим фазу: 1 – излучающая апертура; 2 – дефект

Полученные после интегрирования выражения позволяют провести численную оценку влияния дефекта, изменяющего фазу сигнала, на диаграмму направленности ультразвукового преобразователя. В частности, на рис.2 представлена диаграмма направленности, полученная в результате численного расчета при изменении фазы сигнала на  $\varphi = (3/4)\pi$ , в области составляющей половину поперечного размера излучающей

апертуры. Характерное раздвоение основного лепестка диаграммы направленности видно на рисунке может быть измерено на практике с достаточной точностью.

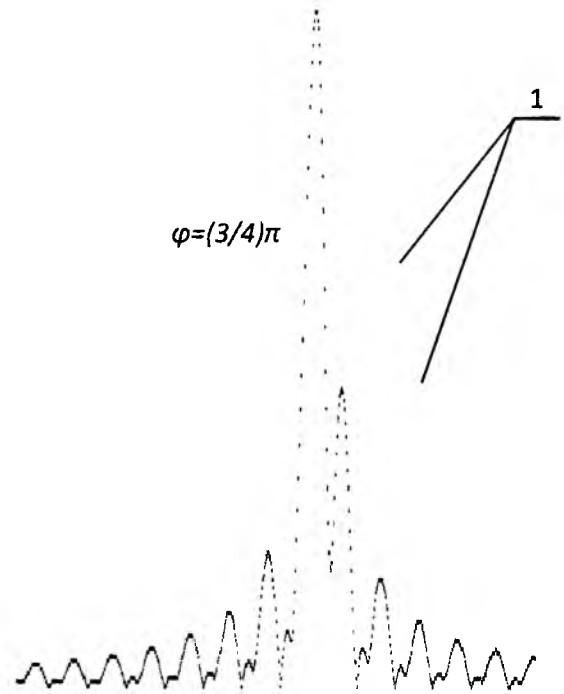


Рисунок 2 – Расчетная диаграмма направленности пьезопреобразователя при прохождении дефекта сдвигающего фазу на  $(3/4)\pi$  в области составляющей половину ширины диаграммы направленности: 1- область раздвоения основного лепестка диаграммы направленности

Экспериментальные данные подтверждают правильность результатов теоретических расчетов. В частности установлено характерное раздвоение основного лепестка диаграммы направленности и смещение точки минимума, в зависимости от взаимного расположения границы дефекта и преобразователя. Таким образом, определяя диаграмму направленности преобразователя и сопоставляя ее с известной, полученной при измерениях на искусственных дефектах, возможно определение не только наличия дефекта, но и его параметров.

1. Enomoto, M. FSW: research and industrial applications / M. Enomoto // Journal of light metal welding construction. 2002. Vol. 40. N 10. P. 59-63.
2. Baev, A.R. Features of the ultrasonic waves reflection from inhomogeneous boundary of contacting solids / A.R. Baev, A.L. Mayorov, M.V. Asadchaya // Proc. of the 10th European Conference on Non-destructive testing. Moscow, June 7-11, 2010. CD, 9p.