

ТЕРМОСЕНСОРНАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

А.Керемжанов, к.т.н.

Термосенсорная диагностика (ТД) эффективна в процессах сварки плавлением, особенно в лазерной сварке. В ее основе лежат термосенсорные преобразования сигналов, характеризующие динамику тепловых следов от тепловых волн в различных средах и структурах. В статье изложены принципы и техническая реализация ТД на основе разработанной процедуры пространственно-временного сжатия информационных данных, функционально подобной зрительному восприятию. ТД позволяет во многих случаях исключить послесварочный дефектоскопический контроль качества сварных соединений другими физическими методами.

Базовая модель нового метода и средств ТД – это известное и универсальное для многих производственных технологий (в том числе и для сварки плавлением) математическое описание развития различных процессов в пространстве и времени. Это уравнение теплопроводности, созданное в 19 веке Ж.Фурье. Тогда же его соотечественник М.Аллар обнаружил подобие двух процессов: распространения тепла в тонкой металлической пластине и зрительного ощущения человека (инерция тепловых и зрительных световых сигналов практически одинакова и примерно равна 0,14 с). В 60-х годах 20 века в СССР А.Луизов в Ленинграде, В.Рвачёв и Ю.Шабанов-Кушнарченко со своими сотрудниками в Харькове продолжили изучение инерции зрительных ощущений. Зрительное восприятие – это наиболее эффективная по качеству, помехоустойчивости и производительности система распознавания и диагностики.

Развивая эти исследования, автор разработал принципы ТД и их техническую реализацию. Полученное сжатие информационных данных в пространстве и времени функционально подобно зрительному восприятию. При этом обработка

сигналов (динамики движения, геометрии и топологии, экстремумов и градиентов, статистических характеристик для точечных, одно- и двумерных массивов данных) определяет формирование диагностической информации для многих задач промышленного производства. В ТД используют преобразования тепловых сигналов в различных средах и структурах. Отсюда первая часть названия метода – «ТЕРМО». В реальном масштабе времени базовое информационное сжатие исходных массивов диагностических сигналов не имеет принципиальных ограничений и оправдывает вторую часть названия – «СЕНСОР». А третья часть, «ДИАГНОСТИКА», обозначает моделирование и преобразование информации на базе системного анализа и оценки состояний технического объекта по диагностическим признакам его состояния.

В первой промышленной реализации ТД во ВНИИ «Электроаппарат» использовали исходные сигналы видимого диапазона электромагнитных волн. Тогда решали задачу квазианалогового распознавания деталей на ленте конвейера для роботизированной сборки узлов низковольтной аппара-

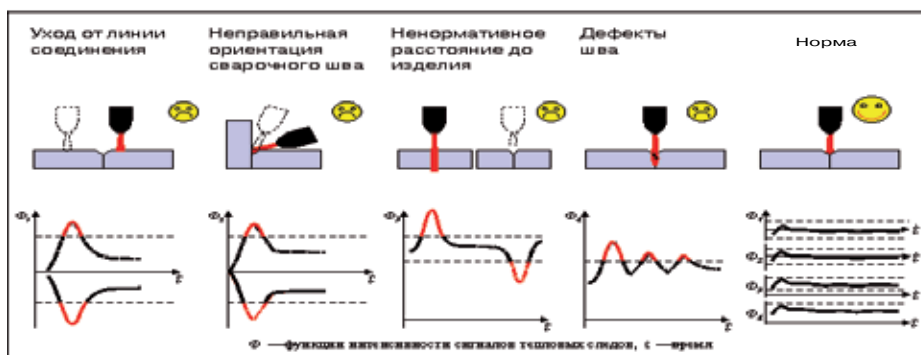


Рис.1. Примеры термосенсограмм условных сигналов состояний ТД ЛС



Рис.2. Электрокардиостимуляторы (материал – титан, толщина 0,6 мм)

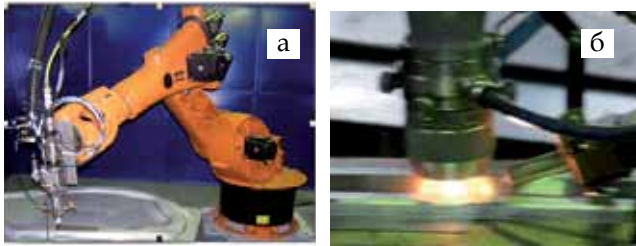


Рис.3. ТД НЛС волоконным лазером: а – YAG-лазер; б – лазер YSL-1000

туры. Автоматическое восприятие сигналов в этом оптическом диапазоне выявило принципиальные затруднения – производственные помехи и нестабильности подсветки. В Институте проблем машиностроения (ИПМаш) для термосенсорных преобразований вместо видимой части спектра были выбраны исходные сигналы в ИК-диапазоне. Это дало возможность не только обойти затруднения, но и выявить канал интроспективных данных об информативных характеристиках различных производственных процессов.

Разработки, исследования и использование ТД в СССР и России позволили выделить широкие области применения, охватывающие различные технологические процессы [1–8]: в лезвийной и абразивной обработке (ИПМаш; ЛЗТЛ, Санкт-Петербург; ВАЗ, Тольятти); в производстве покрытых электродов (замес обмазки, опрессовка; ЗАО НПП «АКО Лтд»; ЗАО «ДОН», Нижний Оскол); в бесконтактном контроле аномальных зон твердости металлических материалов (автоматизация оперативного, в труднодоступных местах устранения причин нарушений сплошности сварных металлических изделий; ИПМаш); в процессах контактной сварки на автоматической линии сварки колес «КИЗЕРЛИНГ»

и робототехнических комплексах (ИПМаш; ВАЗ, Тольятти); при высокочастотной сварке оребрения труб комплексом «Терматул» («АКО Лтд»; ПЗиО, Подольск); при индукционной пайке труб («АКО Лтд», ВНИИСТ); в мониторинге процессов сварки плавлением («АКО Лтд» и др.). Особенно в обеспечивающей высокую производительность и качество лазерной сварки (ЛС).

Примеры термосенсограмм (теплогрмм) мониторинга динамики тепловых следов от тепловых волн проплавления металла условно-обобщенных сигналов состояний ТД ЛС и критерии их оценки в реальном времени представлены на рис.1. Амплитуда термосенсорной функции меняется по разным законам в зависимости от дефектов, проявляющихся непосредственно в процессе сварки: непровары, несплавления, перегрев металла сварочной ванны, образование пор и шлаковых включений, связанное со смещением лазерного луча от стыка, увеличением зазора между свариваемыми деталями, несовпадением свариваемых кромок и неоптимальным тепловложением. Таким образом, диагностическими критериями для регистрации дефектов являются параметры изменения амплитуды термосенсорной функции. Характеристиками амплитуды и формы сигналов динамики тепловых возмущений являются: графическая термосенсограмма, морфология (графическая форма) амплитудного сигнала, амплитудный уровень сигнала, аномальные изменения амплитудного сигнала, временная длительность аномальных амплитудных изменений.

Результаты применения ТД в импульсной ЛС (ИЛС) хорошо описаны в [6–8]. Примеры изделий, получаемых с использованием ТД ИЛС твердотельными YAG-лазерами, хорошо известны – это пластины теплообменников из нержавеющей ста-

ли, которые имеют стыковые и нахлесточные швы; электрические шунты, получаемые путем стыковых швов цветных металлов с покрытием из разнотолщинных и разнородных материалов; титановые корпуса кардиостимуляторов (рис.2), получаемые также с помощью стыковых швов. Результаты проведенных метрологических исследований, включая металлографию и разрушающий контроль, а также производственные апробации ТД ИЛС подтвердили реальные возможности и эффективность мониторинга качества технологии ИЛС в процессе сварки. ТД ИЛС позволит во многих случаях исключить послесварочный дефектоскопический контроль качества сварных соединений другими физическими методами, обеспечить эффективные наладку, ремонт и обслуживание сварочного оборудования.

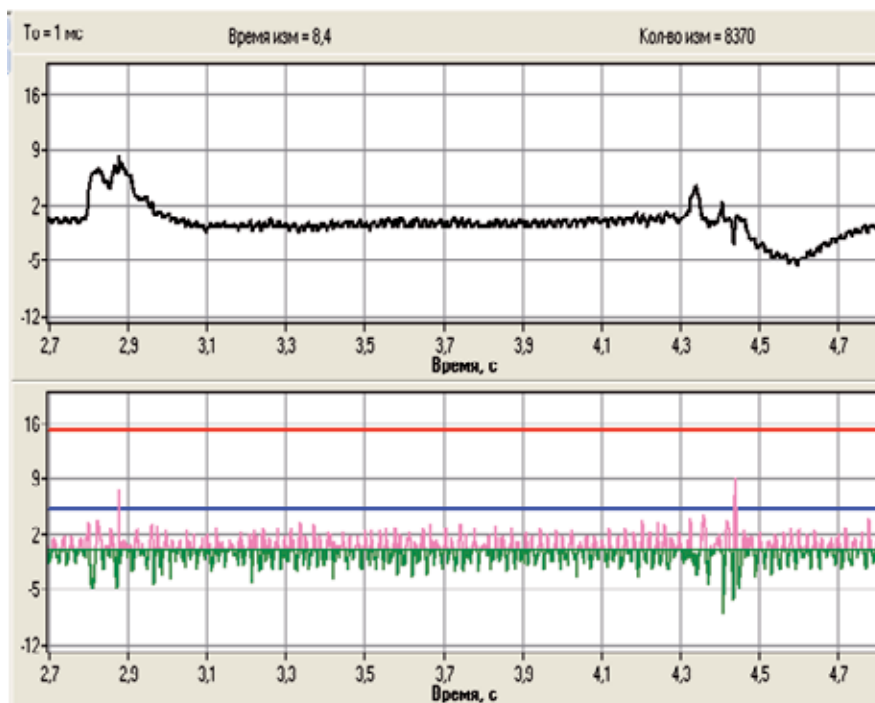


Рис.4. Термосенсограммы нормативного проплавления

ТД непрерывной лазерной сварки (НЛС) применялось в установке TRUMPF HL 4006, которая включает в себя YAG-лазер с роботизированным технологическим комплексом KUKA и закреплённый на лазерной сварочной головке ИК-сенсорный блок оптоэлектронного преобразователя (рис.3а). Блок подключён через термосенсорный микроконтроллер к базовому компьютеру ТД НЛС. На установке, в момент проведения сварки стальных пластин с покрытием проводили ТД НЛС стыковых швов. Также ТД НЛС проводили для сварки внахлест тел вращения диаметром 40 мм из стали Ст40 толщиной 2–5мм. В экспериментах учитывали появление возможных технологических нарушений. Поэтому на этапе отладки метода ТД мы воспроизводили отклонения энергии лазера (при мощности лазера 1–4,2 кВт и лазерном пятне \varnothing 0,6 мм), скорости сварки (1,8–2,8 м/мин) и времени сварки 3,2–5с; вводили изменения геометрии в движении при сварке, включая зазоры. При этом получили термосенсограммы процессов ЛС для случаев появления некачественных поверхностей швов в результате локального непровара, перегрева и прожога шва и термосенсограммы процессов ЛС, когда был получен шов с нормальной поверхностью, что соответствует нормативному проплавлению. Нормальный шов получился при адаптивном управлении посредством термосенсорной обратной связи, то есть когда была использована регистрируемая на термосенсограмме информация от ТД.

На рис.3,б показана ТД НЛС волоконным лазером YSL-1000 пластин нержавеющей стали (лазерное пятно \varnothing 0,9 мм; $P = 0,35$ –1кВт; $V = 1$ –2,8 м/мин; стыковые швы; материал – 12Х18Н10Т; толщина 0,4–1 мм). На рис.4 термосенсограмма нормативного проплавления для случая защиты аргоном с оптимальным расположением подачи ($P = 0,55$ кВт, $V = 2,8$ м/мин, $h = 0,4$ мм). Для оптимизации технологических режимов работы газового CO₂-лазера «МЛ5М» была проведена. ТД НЛС труб из стали 08Х18Н10Т. На термосенсограммах процессов НЛС, полученных в реальном времени, и фотографиях, полученных затем, фиксировались некачественные участки швов (скорость стыковой сварки 3,5 м/мин, $P = 1,5$ –2 кВт, лазерное пятно 0,2 мм, диаметр труб 33 мм, толщина 1,5 мм, с зазором и превышением кромок в пределах 10–70% толщины свариваемых материалов) для случаев: точечных прожогов из-за замедления подачи свариваемых деталей и нарушения подачи защитного газа. При этом на скорости

3,5 м/мин был продемонстрирован наглядный пример возможного резерва экономии энергии: увеличение мощности на 33% от номинальной (1,5 кВт) не приводит к прожогам (условный для порога калибровки перегрев не браковался); и пример непровара, когда кромки и зазор превышали на 50–70% толщину свариваемых материалов.

Таким образом, на примерах различных технологий показаны прогрессивные возможности ТД ЛС (ИЛС и НЛС) для достижения оптимального технологического регламента. Для высокого качества различных сварных соединений и мониторинга оптимальности технологии сварки рекомендуется наряду с использованием адаптивного управления параметрами сварочных процессов (посредством термосенсорной обратной связи) оснастить термосенсорным контролем автоматические линии, сварочные робототехнические комплексы и установки, механизированные сварочные процессы. Термосенсорный метод контроля качества технологии ЛС универсален для любого свариваемого металла и вида свариваемого соединения. В настоящее время он является единственным методом контроля качества процесса сварки в режиме дистанционно-компьютерного слежения. Автор благодарит соавторов публикаций [1 и 6–8] и С.Кулика и А.Тарана – участников разработки программно-технических средств и проведения отдельных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутов В., Архипов П., Дёмин Е., Керемжанов А. Термосенсорный контроль качества и дефектности сварных соединений по критериям термодинамической стабильности плавления металла в процессе сварки. – Сварочное производство, 2006, № 11.
2. Keremzhanov A. Doc. XII-1477-97. The 49 Annual Assemble IIW / IIS. Budapest, 1996.
3. Keremzhanov A. Doc. V-1086-97. The 50 Annual Assemble IIW / IIS. San – Francisco, 1997.
4. Keremzhanov A. Doc. V-1146-99 IIW/IIS. Paris, 1999.
5. Keremzhanov A. Doc. V-1165-00, Doc. VE-217-00 (IIW / IIS. Paris, Saarbrueken, 2000).
6. Патент РФ № 2 258589, 2005.
7. Патент WO 2006 / 073334 A1, 2007.
8. Keremzhanov A., Arkhipov P., Lazarenko A. Thermosensor Diagnostics of Laser Welding Process. – Proceedings of 5th Int. Conf. on Advanced Optoelectronics And Lasers, Sevastopol, Ukraine, Sept., 2010.