

## ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА И ПАЙКА В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ\*

Ф. АЛЬБЕРТ, А. ГРИММ, С. КАГЕЛЕР, М. ШМИДТ (Лазерный центр Байера GmbH, г. Эрланген, Германия)

Лазерная сварка и пайка приобретают все большее значение в современном автомобилестроении. Эти высокопроизводительные способы обеспечивают получение качественных соединений материалов и минимизируют затраты на повторную обработку. Возможность управления этими процессами позволяет избежать возникновения дефектов. Указанными проблемами занимается Лазерный центр Байера. Там, в частности, решают задачу лазерной сварки оцинкованных стальных листов в конструкциях с соединением внахлестку и для лазерной пайки.

*Ключевые слова:* лазерные сварка и пайка, автомобилестроение, тонколистовые конструкции, оцинкованный лист, дефекты соединения, параметры модуляции мощности

Лазерная сварка тонких оцинкованных стальных листов в конструкциях с соединением внахлестку, широко используется при производстве кузовов легковых автомобилей. Однако даже с учетом результатов последних исследований и технологических усовершенствований очень трудно контролировать и прогнозировать лазерный процесс соединения таких листов при сварке с нулевым зазором. В большинстве случаев оцинкованные покрытия на поверхности стальных листов имеют температуру испарения ниже, чем температура плавления стали ( $T_{пл}^{ст} > 1800 \text{ К}$ ;  $T_{исп}^{Zn} = 1800 \text{ К}$ ). При сварке с нулевым зазором, как правило, дегазация испарившегося цинка между листами невозможна. Следовательно, он испаряется через парогазовый канал, при этом нарушается баланс давления и гидродинамических процессов, происходящих в сварочной ванне, и как следствие, в сварном шве появляются повреждения и дефекты (рис. 1).

Существует несколько способов воздействия на процесс лазерной сварки и качество формирования сварного шва. Один из них, описанный в настоящей статье, основывается на модуляции мощности лазерного излучения, что должно способствовать стабильной динамике парогазового канала и создавать постоянную дегазацию испарившегося цинка через выпускное отверстие, а также исключать повреждения, появившиеся в результате разрушений парогазового канала. Взаимодействие модуляции мощности излучения с парогазовым каналом и жидким металлом анализируется с помощью высокоскоростной съемки,

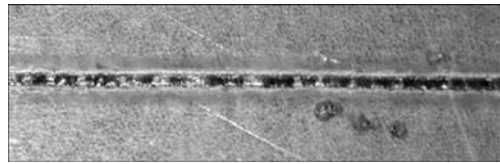


Рис. 1. Вид сварного шва оцинкованных стальных листов в конструкции с соединением внахлестку с нулевым зазором

сигналов оптического процесса и результатов сварки.

Лазерная пайка является перспективным способом получения соединений при изготовлении кузовов легковых автомобилей. Но поскольку появление таких дефектов, как поры, отверстия, непровары и одностороннее расплавление стальных листов, полностью исключить невозможно, то проверка качества изделий после их изготовления является обязательной. Точность используемых роботов и изменения мощности излучения лазера и фокального положения являются определяющими факторами в процессе образования дефектов. Дорогостоящую проверку после изготовления изделий можно заменить пирометрическим контролем качества в режиме реального времени, который также рассматривается в этой статье. Использование системы контроля, основанной на измерении температуры, позволяет определять отмеченные дефекты. Более того, такой контроль лежит в основе управления процессом с обратной связью, что дает возможность регулировать положение робота, мощность излучения лазера и положение фокуса. В работе рассматриваются система-технология и результаты пирометрических сигналов и экспериментов.

**Лазерная сварка стальных оцинкованных листов.** На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки. С помощью сварки с глубоким проплавлением два стальных оцинкованных листа толщиной 0,6 и 0,7 мм соединяются внахлестку с нулевым зазором. Цинковое покрытие имеет среднюю толщину 10 мкм. Лазерным источником является дисковый Yb:YAG-лазер с максимальной выходной мощностью 4 кВт и дли-

\* По материалам международной конференции «Laser technologies in welding and materials processing», 29 May–1 June, 2007, vil. Katsiveli, Crimea, Ukraine.

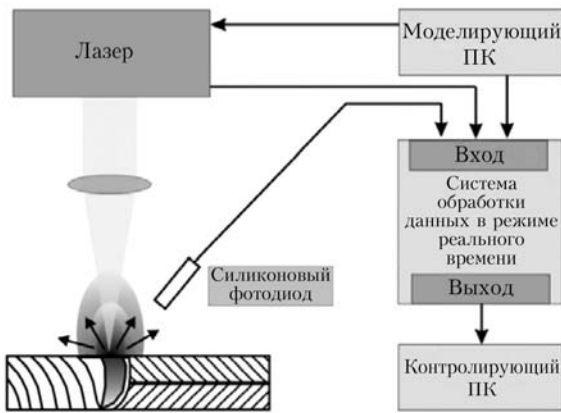


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

ной излучения 1030 нм. Качество выработки луча составляет приблизительно 9,2 мм-мрад, фокусное расстояние — 450 мм.

Оптическая эмиссия процесса сварки определяется силиконовым фотодиодом со спектральным диапазоном, составляющим приблизительно 400...1000 нм, и профильтрованной полосой пропускания на 530 нм. Мощность излучения лазера, сигнал модуляции и эмиссии процесса сварки определяются одновременно с частотой выборки 50 кГц. Угол обзора фотодиода, составляющий приблизительно 80°, ориентирован на горизонтальную базисную линию.

Для того чтобы оказать влияние на колебания парогазового канала, мощность лазерного излучения модулируют в диапазоне средней мощности  $P = 3,6$  кВт. В качестве режима модуляции, как правило, выбирают обычную синусоидальную кривую. Во избежание возникновения эффекта резонанса при модуляции в диапазоне собственной частоты динамической характеристики парогазового канала в течение длительного времени, несущая частота изменяется с помощью частотной модуляции. Несущий сигнал представляет собой пиковую мощность лазерного излучения. При изменении частотной модуляции или сдвиге можно определить диапазон мощности лазерного излучения. Типичный сигнал модуляции, который использовался в исследованиях, показан на рис. 3.

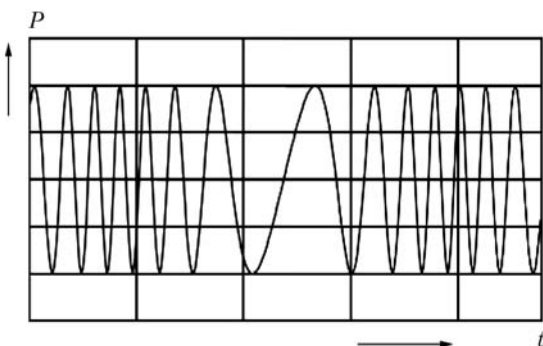


Рис. 3. Характерная форма волны частотной модуляции, используемой для контроля мощности лазерного излучения

Для предотвращения появления дефектов при лазерной сварке с глубоким проплавлением стальных оцинкованных листов важным фактором является наличие незначительных отклонений давления парогазового канала в определенном диапазоне частот. Результаты сварки незагрязненных листов показали, что глубина сварки стабилизируется. При более низком диапазоне частот наблюдаются отклонения [1].

Для понимания этого явления необходимо принимать во внимание то, что в лазерной сварке с глубоким проплавлением сложные физические процессы накладываются друг на друга. Парогазовый канал с раскрытием по направлению лазерного луча формируется при испарении материала и окружен ванной, которая состоит из жидкой стали. Газообразный материал направляется в сторону раскрытия капилляра, что приводит к снижению давления внутри парогазового канала. Для достижения стабильности сварочного процесса эту потерю давления необходимо компенсировать за счет постоянного испарения материала. Баланс давления пара при испарении стали и давления жидкой стали ванны удерживает парогазовый канал в открытом состоянии. Баланс давления создается внешним давлением, включающим поверхностное давление  $P_{\text{пов}}$ , гидростатическое  $P_{\text{гидрост}}$ , гидродинамическое  $P_{\text{гидродин}}$  и внутреннее давление, состоящее из абляционного  $P_{\text{абл}}$  и газового гидродинамического давления  $P_{\text{газ}}$ . Взаимодействие внешнего и внутреннего давления приводит к специфической динамической характеристике парогазового канала. С помощью БПФ анализа оптических эмиссий при немоделированном процессе лазерной сварки оцинкованных стальных листов (конструкция с перекрытием, зазор 100 мкм) была продемонстрирована характерная частота колебаний парогазового канала (рис. 4).

Дисбаланс давления внутри и снаружи парогазового канала может возникнуть при изменении параметров процесса сварки, толщины листов цинка или геометрии (размера) зазора, а также мощности лазерного излучения и скорости сварки. При сварке стальных оцинкованных листов вокруг расплава появляется область испарения с высоким давлением. Если зазор между листами узкий, испарение не может выйти наружу, возникают отклонения в давлении парогазового канала и появляются повреждения. Взрывообразный процесс дегазации нарушает процесс сварки, и парогазовый канал разрушается вследствие дисбаланса давления (рис. 5). Большой объем жидкой стали вытесняется из ванны расплава, что приводит к образованию раковин, непроваров или пор в металле сварного шва, которые негативно влияют на механические свойства сварного шва [2–7]. Собственную частоту парогазового канала

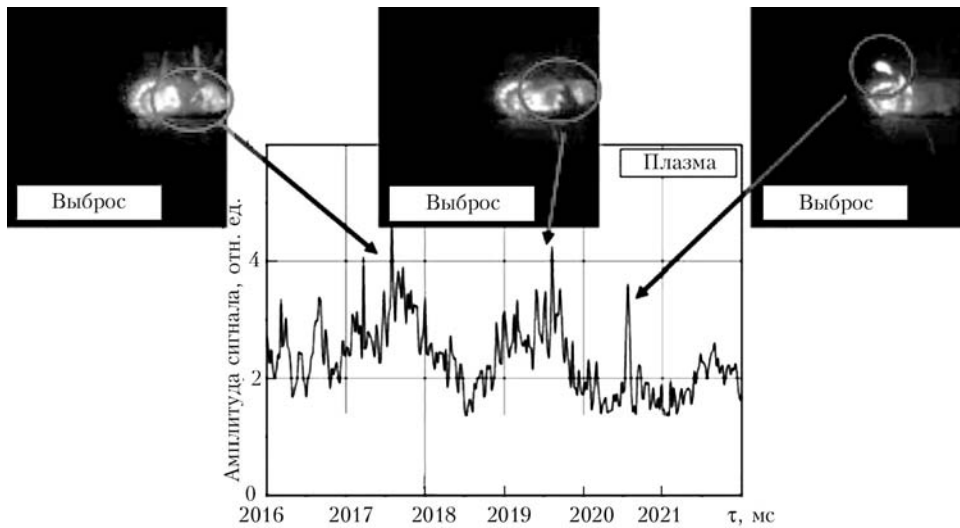


Рис. 4. Временной сигнал оптической эмиссии при сварке внахлестку лазером непрерывного действия двух оцинкованных стальных листов толщиной 0,6 или 0,7 мм с нулевым зазором при  $P = 3600$  Вт, скорости сварки  $v_{св} = 6$  м/мин, длине излучения  $\lambda = 1030$  нм и размере сварочной точки  $d_{spot} = 600$  мкм

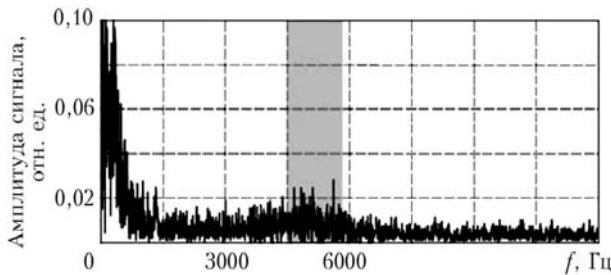


Рис. 5. Спектр частот сварки внахлестку лазером непрерывного действия двух оцинкованных стальных листов толщиной 0,6 или 0,7 мм с зазором 100 мкм при  $P = 3600$  Вт,  $v_{св} = 6$  м/мин,  $\lambda = 1030$  нм,  $d_{spot} = 600$  мкм (серым цветом обозначен диапазон частоты парогазового отверстия)

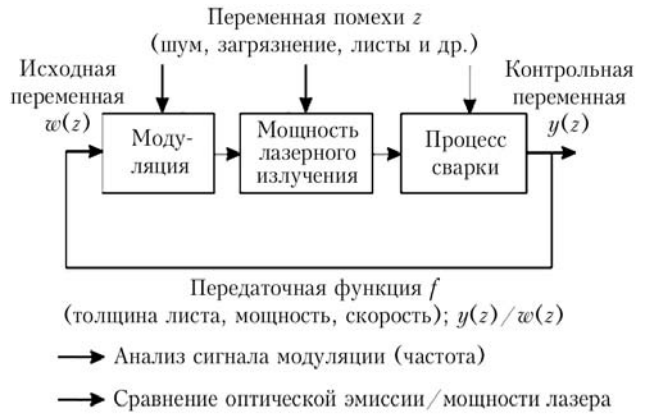


Рис. 6. Модель для вычисления передаточной функции и определения параметров модуляции

в этом случае определить невозможно, и процесс сварки является нестабильным.

В настоящей работе определяли параметры эффективной модуляции, с помощью которых можно влиять на процесс сварки при раскрытом парогазовом канале. Такое условие выполнимо, если диапазон частоты модуляции мощности излучения находится в области собственных колебаний динамической характеристики парогазового канала. Это справедливо, если пики в диапазоне частот процесса эмиссии находятся в том же диапазоне, что и частота модуляции мощности излучения. Экспериментальным путем замедление процесса может быть определено с помощью расчета передаточной функции с информацией относительно частоты эмиссии процесса и мощности лазерного излучения.

В течение одного сварочного процесса (длина шва 300 мм) частота модуляции мощности ( $f = 0$  и 10 кГц) зависит от оптической эмиссии и параметров модуляции, что позволяет определить передаточную функцию и требуемую частоту модуляции (рис. 6).

На рис. 7 представлена типичная передаточная функция при сварочном процессе при описанных выше условиях. Небольшое замедление процесса сварки можно наблюдать при  $f_{нес} = 4,5$  и 6,0 кГц. Несущая частота, необходимая для модуляции мощности излучения, должна находиться в том же диапазоне.

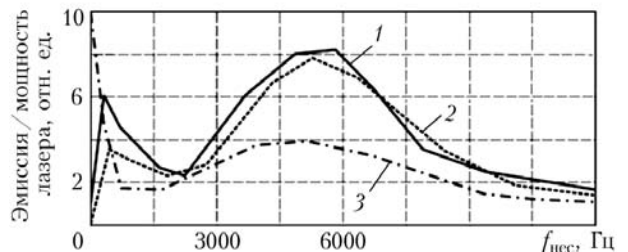


Рис. 7. Передаточная функция при лазерной сварке оцинкованных стальных листов толщиной 0,6 или 0,7 мм при  $P = 3,6$  кВт,  $v_{св} = 6$  м/мин,  $d_{spot} = 600$  мкм: 1 — 40; 2 — 120; 3 — 200 Вт

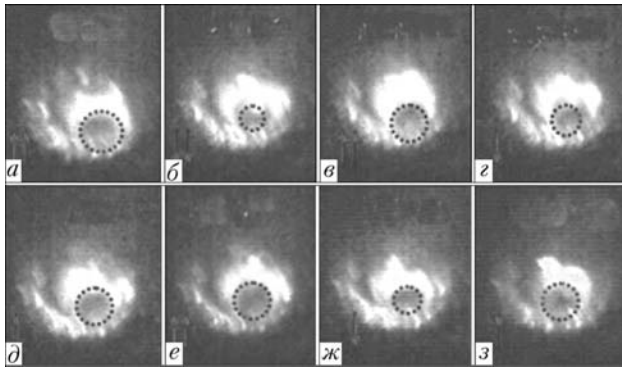


Рис. 8. Изображения выходного отверстия при сварке листов толщиной 0,6 или 0,7 мм с модуляцией мощности при  $P = 3,6$  кВт,  $f_{\text{нес}} = 4,5$  кГц,  $v_{\text{св}} = 6$  м/мин,  $d_{\text{spot}} = 600$  мкм: а —  $\tau = 0$ ; б — 0,1; в — 0,2; г — 0,3; д — 0,4; е — 0,5; ж — 0,6; з — 0,7 мс

Такие факторы модуляции, как ее скважность (амплитуда), частотная модуляция, а также скорость частотной модуляции, не обнаруживаются. Эти данные можно получить путем измерений в ходе дальнейших экспериментальных исследований.

Как видно из рис. 8, модуляция мощности излучения с несущей частотой в определенном диапазоне приводит к открытию парогазового канала в течение всего сварочного процесса. Без модуляции размер парогазового канала будет изменяться. Наличие повреждений определяется с помощью высокоскоростной съемки.

Результаты экспериментов показали, что в случае применения модуляции мощности количество раковин в шве уменьшается (рис. 9). Количество повреждений можно уменьшить, но достичь их полного отсутствия пока невозможно.

Дальнейшие эксперименты показали, что повреждения могут образовываться также позади парогазового канала. Стабильность парогазового канала — это только один шаг к уменьшению количества дефектов. Для получения бездефектных сварных швов необходимо дополнительно осуществить повторную дегазацию.

**Контроль качества лазерной пайки в режиме реального времени.** Рассмотрим вопрос о разработке контроля для лазерной пайки с помощью высокоомощного диодного лазера, который позволяет обнаружить такие недостатки, как поры, непровары и одностороннее расплавление в режиме реального времени. Более того, эта система контроля лежит в основе управления процессом с обратной связью, что дает возможность отказаться от дорогостоящего послеоперационного контроля качества.

Новым перспективным подходом для процесса управления и контроля в режиме реального времени являются локально обозначенные измерения температурного поля обеих соединяемых частей. Исследования подтвердили наличие взаимосвязи между температурой и качеством шва.

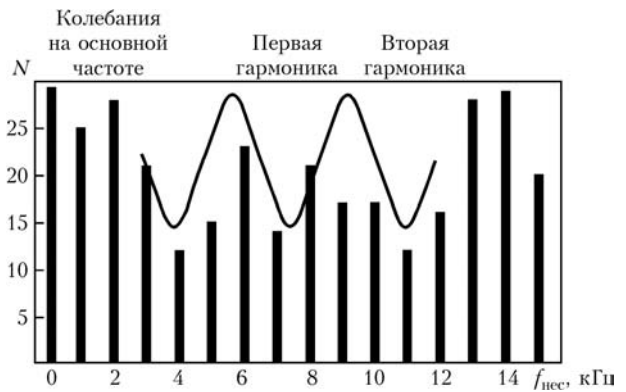


Рис. 9. Зависимость количества  $N$  впадин на шве длиной 300 мм от несущей частоты модуляции мощности (средняя мощность  $P = 3,6$  кВт)

Новая система управления и контроля процесса в режиме реального времени, основанная на измерении температуры, дает возможность значительно уменьшить производственные затраты для лазерной пайки. Таким образом, этот процесс станет более привлекательным для автомобилестроения благодаря системе, основывающейся на пирометрах, способной выполнять измерения температуры. Целью этого исследования является определение дефектов в шве для исключения их появления при последующем процессе сварки с контролируемой обратной связью. Это можно выполнить с помощью как температурных измерений во время процесса пайки, так и детекторов инфракрасного излучения для того, чтобы получить информацию о влиянии неотрегулированного контроля температуры на процесс пайки. Следующей целью является внедрение устройств измерения температуры в паяльную головку с системой подачи проволоки для высокоомощных диодных лазеров, что позволит обеспечить роботизированный и лазерный контроль.

Исследование выполняется при помощи системы, используемой для лазерной пайки, которая включает устройство подачи проволоки и волоконно-световодный высокоомощный диодный ла-

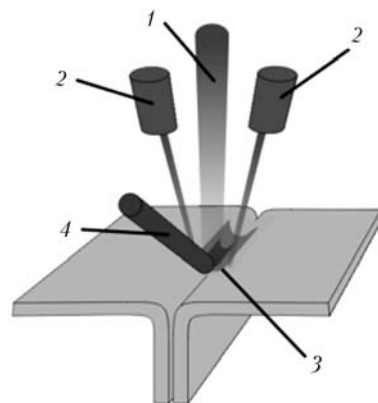


Рис. 10. Основная схема системы контроля процесса: 1 — лазер; 2 — пирометр; 3 — температурные поля; 4 — проволока

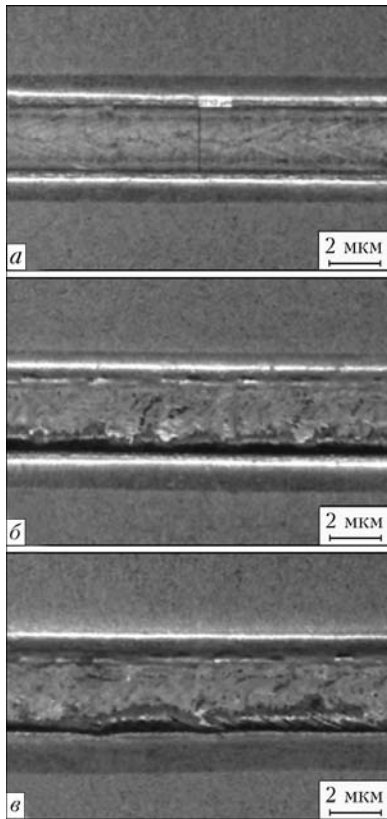


Рис. 11. Вид очищенного сверху шва (а) с боковым смещением на 0,3 (б) и 0,5 (в) мм: а —  $\tau = 1,8$  с;  $\Delta y = 0$ ; б —  $\tau = 3,8$  с;  $\Delta y = 0,3$  мм; в —  $\tau = 7,5$  с;  $\Delta y = 0,5$  мм

зер с максимальной выходной мощностью 2,7 кВт. Благодаря оптической системе, встроенной в паяльную головку, и световоду диаметр лазерной точки на конце проволоки составляет 3,1 мм. Наиболее важными элементами экспериментальной установки являются две встроенные пирометрические оптические системы, которые подсоединены с помощью оптоволокон к пирометрам. Используемая двухцветная технология измерения должна быть независима от фактора эмиссии, который определяет температуру от 500 до 1300 °С при длине волны 1,52 и 1,64 мкм с временем срабатывания  $t_{90}$  до 2 мс. Измерение выполняли в монорежиме при  $\varepsilon = 0,8$ . Вследствие динамических характеристик процесса сварки и постоянного изменения соотношения между расплавленными и твердыми материалами в зоне обработки необходимо принимать во внимание тот факт, что соответствующее определение эмиссионной способности и абсолютное определение температуры невозможны. Диаметр зоны измерения может регулироваться от 1 до 5 мм.

Исследования выполняли на линейных торцевых соединениях стальных листов глубокого отпуска DX 54 D + Z100 толщиной 0,8 мм, используемых для изготовления деталей автомобильных кузовов. Скорость пайки составляла 2,1 м/мин, а мощность лазера — 2,7 кВт. Это оптимальные па-

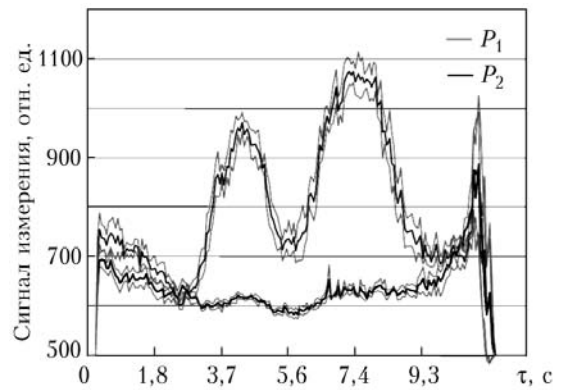


Рис. 12. Последовательность сигнала при боковом смещении на 0,3 ( $\tau = 3,8$  с) и 0,5 мм ( $\tau = 7,5$  с); количество образцов  $n = 5$

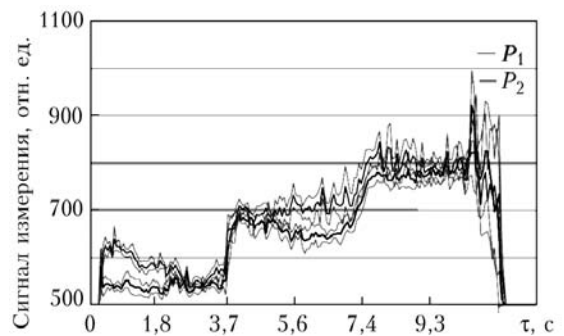


Рис. 13. Последовательность сигнала при изменениях мощности излучения лазера (средняя мощность 700 Вт)  $n = 5$

раметры для получения качественной поверхности шва и необходимой степени его заполнения.

На рис. 11 показано несколько видов намеренно поврежденных деталей с линейными торцевыми соединениями. Исходя из идеального положения паяльной головки по отношению к соединению (рис. 11, а) боковое отклонение траектории постоянно увеличивается на 0,3 мм (рис. 11, б). Затем паяльная головка возвращается назад в идеальное положение и снова смещается. Боковое смещение от оси в этом случае составляет до 0,5 мм (рис. 11, в). В конце специальное отклонение от оси отсутствует.

Боковые отклонения указывают на очевидное расплавление нижнего стального листа, поскольку расплавление при отклонении от оси на 0,5 мм, естественно, превышает требуемое расплавление (рис. 11, б).

С помощью системы измерения, описанной выше, фиксируется последовательность сигналов этих процессов (рис. 12), при этом обнаруживаются два отклонения от оси. Два имеющихся дефекта отличаются амплитудами своих сигналов, что можно определить по различным отклонению и расплавлению.

Изменение мощности лазера также можно определить исходя из последовательности сигналов. Оба пирометрических сигнала увеличиваются при



изменениях мощности  $\Delta P = 700$  Вт в периоды 3,7 и 7,6 с (рис. 13).

Следовательно, сигналы датчика позволяют установить различия между типами дефектов и их различной интенсивностью.

Результаты экспериментов подтверждают возможность системы контроля качества лазерной пайки в режиме реального времени. Исследования наилучших условий для обнаружения дефектов, а также эффективности применения системы измерения на намеренно поврежденных деталях четко показали имеющийся потенциал.

Этапы настоящего проекта включают оценку системы измерения для соединений с угловым швом и сложной геометрией шва. В будущем полученные данные должны стать основой для разработок температурного процесса с обратной

связью применительно к пайке высокомоощными диодными лазерами.

1. *Otto A.* Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweissen: Diss.: Reihe Fertigungstechnik. — Erlangen, 1997.
2. *Geisel M.* Prozesskontrolle und Steuerung beim Laserstrahlschweissen mit der nichtlinearen Methodik: Diss.: Reihe Fertigungstechnik. — Bamberg: Meisenbach, 2002.
3. *Hohenstein R., Otto A., Geiger M.* Systemanalyse des dynamischen Verhaltens beim Laserstrahlschweissen // Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserbearbeitung. — Bremen: BIAS, 1998. — S. 125–130.
4. *Kaplan A.* Modellrechnung und numerische Simulation von Absorption, Waermeleitung und Stroemung des Laser-Tiefschweissens. — Diss.: TU Wien, 1994.
5. *Beck M.* Modellierung der Lasertiefschweissens. Stuttgart: Teubner, 1996.
6. *Kroos J.* Stabilitat und Dynamik der Dampfkapillare beim Schweissen von Metallen: Diss. — TU Braunschweig, 1993.
7. *Klein T.* Freie und erzwungene Schwingungen der Dampfkapillare beim Laserstrahlschweissen von Metallen. — Aachen: Shaker, 1997.

Laser welding and brazing have an increasingly great importance in current motor car construction. Both methods provide the possibility of high-efficiency joining of materials, and minimise machining costs. Stable process control allows avoidance of defects. Two research projects performed at the Bavarian Laser Centre (Bayerisches Laserzentrum) address this problem and verify solutions for laser welding of galvanised steel plates in roofed structures, and for laser brazing

Поступила в редакцию 22.02.2007

## ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

объявляет ежегодный набор в

### **ДОКТОРАНТУРУ** по специальностям:

- ✓ сварка и родственные технологии
- ✓ автоматизация технологических процессов
- ✓ металловедение и термическая обработка металлов
- ✓ металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

### **АСПИРАНТУРУ** по специальностям:

- ✓ сварка и родственные технологии
- ✓ автоматизация технологических процессов
- ✓ металловедение и термическая обработка металлов
- ✓ металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

Прием в аспирантуру проводится в сентябре.

**Контактный телефон:** 289-84-11

Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура):

[www: paton.kiev.ua](http://www.paton.kiev.ua)

Документы направлять по адресу:

03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю