

Е. Л. СУРМЕНКО, И. А. ПОПОВ, Т. Н. СОКОЛОВА

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ ШВАХ

Исследовано перераспределение элементов в сварном шве стальных пластин. Методом эмиссионного лазерного спектрального анализа выявлены тенденции к горизонтальной и вертикальной миграции легирующих элементов марганца (к фронтальной стороне шва) и алюминия (к противоположной стороне с концентрацией по средней линии). Исследованы зависимости перераспределения элементов от типа и параметров сварки.

**Ключевые слова:** лазер, сварка, сварной шов, состав, спектральный анализ, LIBS.

При сварке, когда важны локальность, малая длительность воздействия и внешний вид сварного соединения, наиболее часто используется лазер. Многочисленные исследования показали значительные изменения структуры, элементного состава и физических свойств материала в зоне лазерной обработки [1—3], т.е. высокоинтенсивного лазерного воздействия. Таким образом, распределение легирующих элементов после завершения воздействия лазерных импульсов отличается от начального, т.е. изменяется элементный состав вещества, что может влиять на физические, механические и эксплуатационные свойства материалов.

Основной механизм миграции химических элементов сплава связан с фазовыми превращениями вещества. После начала взаимодействия лазерного излучения с веществом на границе разрушения формируется тонкий слой расплава. Чем выше плотность мощности излучения, тем тоньше слой расплава в обрабатываемом материале для каждого определенного уровня энергии или мощности. Материал при взаимодействии с лазерным излучением может быть обогащен или обеднен легирующими элементами и примесями благодаря различной скорости испарения легирующих элементов и металла-основы, а также различной растворимости веществ в жидкой и твердой фазах. Первый фактор проявляется в том, что при движении границы расплава испаряются атомы примесей с поверхности граничного слоя, а также из переходного слоя, прилегающего к границе. Второй — в том, что граница „жидкая фаза—твердый материал“ перемещается во время лазерного воздействия в глубь основного

материала при этом примеси из твердой фазы переходят в жидкую, поскольку их растворимость выше, чем в твердой. Скорость растворения определяется температурой жидкой фазы, длительностью контакта между фазами, физической природой атомов примеси и их концентрацией. Для большинства материалов их растворимость в жидкой фазе выше, чем в твердой. Именно поэтому перед границей жидкой фазы со стороны основного материала в большинстве случаев формируется слой, обедненный примесями.

В настоящей работе исследовалось перераспределение химических элементов в сварных соединениях по глубине проплавления и в горизонтальных зонах сварного шва (рис. 1, а), объекты исследования — соединения стальных пластин встык и внахлест. В состав стального сплава входят следующие легирующие элементы: 0,1% Al, 0,4 % Mn. Лазерная шовная сварка была произведена на установке TRUDISC 1000 (фирма Trumpf, Германия) в непрерывном режиме дисковым Yb:YAG-лазером, длина волны  $\lambda=1,03$  мкм, мощность  $P=1$  кВт. Толщина свариваемых кромок 2 мм. Ширина сварных швов встык на материале 3—4 мм со стороны лазерного воздействия и 0,5—1,5 мм с обратной стороны. Скорость сварки встык — 1,7 мм/мин, внахлест — 2,5.

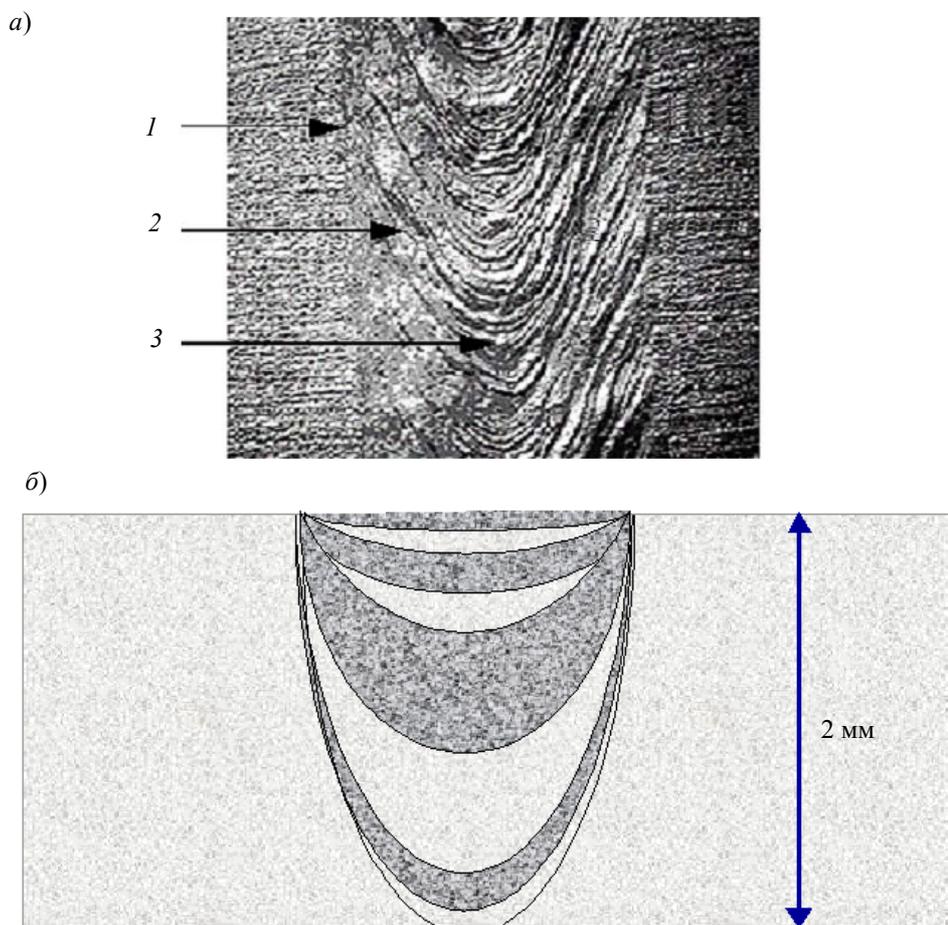


Рис. 1

Широкие лазерные сварные швы (4—5 мм) были изучены в трех горизонтальных зонах: граничной 1, центральной 3 и промежуточной 2 (между граничной и центральной). Если ширина шва была меньше 4 мм, промежуточная зона исключалась из рассмотрения, исследовались только граница и центр таких сварных швов.

При исследовании перераспределения химических элементов в направлении действия лазерного излучения рассматривались восемь вертикальных зон (рис. 1, б): по четыре со стороны воздействия лазерного излучения и с обратной стороны. Три зоны определялись при

трехкратном лазерном сканирующем пробоотборе [4] на глубине 100, 130 и 145 мкм, одна — в ту же область точечным пробоотбором на 300 мкм.

Распределение химических элементов в лазерном сварном шве было изучено методом лазерного эмиссионного микроспектрального анализа, этот метод более известен под названием “LIBS” (Laser Induced Breakdown Spectroscopy). Исследование было выполнено на установке LIBS-анализа LDMA. Источник возбуждения спектров — Nd:YAG-лазер ( $\lambda=1,06$  мкм), работающий в режиме „гигантского импульса“. Частота повторения импульсов 25 Гц; плотность мощности в моноимпульсном режиме  $10^{10}$ — $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>; размер пятна фокусировки от 10,8 мкм; диаметр лазерного кратера на поверхности материала до 250 мкм; предел обнаружения элемента  $10^{-10}$  г; относительный предел обнаружения от 0,001 %. В качестве диспергирующего устройства применялся спектрограф ДФС-458С. Регистрация и обработка спектров осуществлялись ПЗС-камерой МИРС [5] (программное обеспечение Spectran).

Пробоотбор из сварного шва осуществлялся тремя последовательными заглублениями в точку. Время экспозиции составляло 1 с. Для каждой зоны было зарегистрировано по четыре комплекта спектров.

В первой части эксперимента исследовалось поведение химических элементов при удалении от края лазерных сварных швов к центральной зоне по плоскости образца. Исследования проводились со стороны лазерного воздействия только для образцов сварки встык, поскольку при сварке внахлест плоскостность шва изначально нарушена.

Диаграммы перераспределения Mn (1) и Al (2) представлены на рис. 2 ( $C$  — концентрация элемента,  $h$  — расстояние от центра шва). Данные типичны для швов с достаточно широкой фронтальной стороной сварного соединения (со стороны действия лазерного излучения) и узкой обратной стороной. Граница „жидкая фаза—твердый материал“ (край лазерного сварного шва) в горизонтальной плоскости действительно обеднена примесями. Элементный состав шва по центральной линии не отличается от заданного профиля легирования.

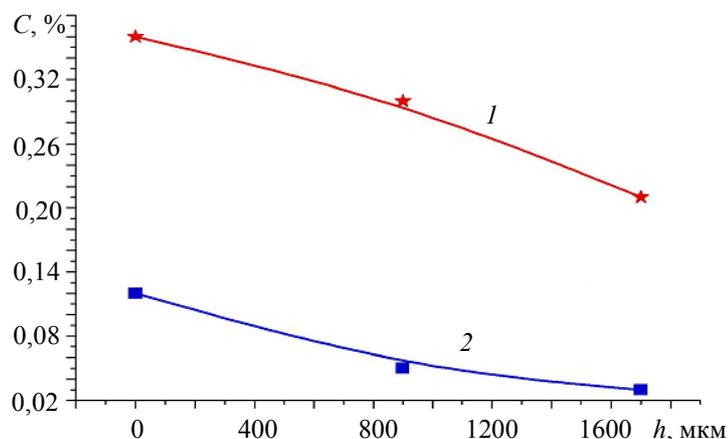


Рис. 2

Результаты исследования поведения химических элементов при заглублении в направлении воздействия луча при сварке неодинаковы для различных элементов и разных типов соединения.

При сварке внахлест наблюдаются сходные картины для алюминия и марганца (рис. 3, б). В приповерхностных слоях, как на фронтальной поверхности шва, так и на задней, наблюдаются зоны обеднения примесями. Сразу за ними следуют обогащенные слои, обусловленные образованием твердосплавных оксидов Al и Mn [6], а также сульфидами Mn. Из вида зависимости на рис. 3 можно заключить, что обогащение происходит как за счет граничных слоев сварной ванны, так и за счет внутренней области сварного шва (между фронтальной и задней поверхностью). Примеси оттягиваются из внутренней области шва, но благодаря обогащенным

приповерхностным слоям шва внутренняя область сварного соединения защищена от химических воздействий, коррозии.

В случае сварки встык график для Al (рис. 4, а) не демонстрирует обедненных зон на поверхности, а миграция примесей к задней части шва более значительна, чем при сварке внахлест. Зависимость для Mn (рис. 4, б) схожа с зависимостью для сварки внахлест, но зоны локального приповерхностного обогащения инвертированы: фронтальная часть шва обогащена, а задняя — обеднена примесями.

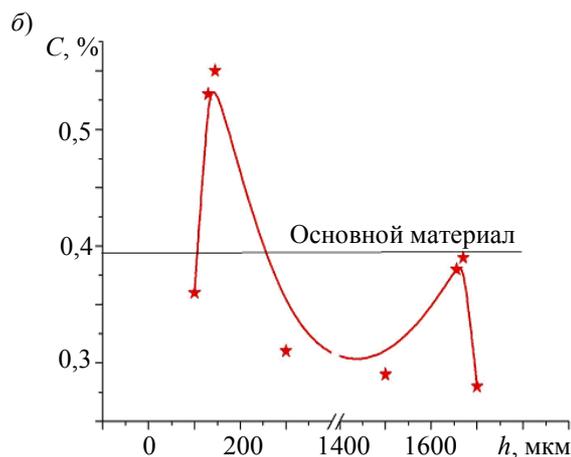
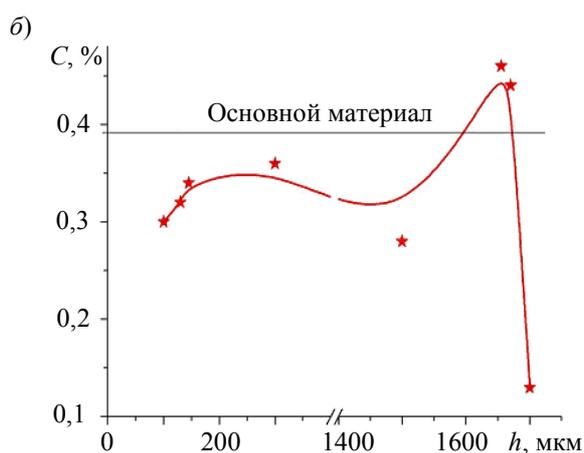
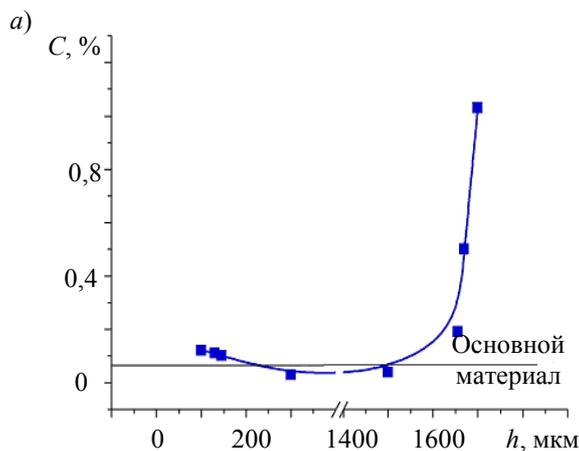
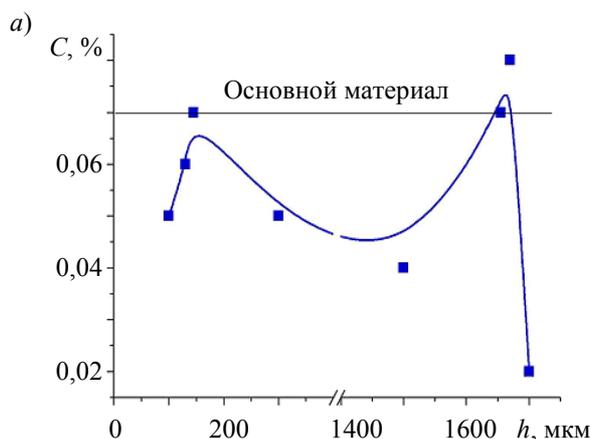


Рис. 3

Рис. 4

Результаты проведенных исследований показывают, что распределение химических элементов в лазерном сварном соединении действительно изменяется при удалении от границы жидкой и твердой фазы в зависимости от глубины плавления и от поверхностного расстояния по ширине шва. Состав центральной поверхностной зоны шва совпадает с изначальным.

При сварке встык различные элементы мигрируют в рамках области: например, Mn во — фронтальную, а Al — в противоположном направлении. Кроме того, при сварке встык не наблюдается локальных зон приповерхностного обеднения алюминием. При сварке внахлест оба элемента мигрируют от фронтальной поверхности шва.

Полученные результаты позволяют предположить, что при достаточно толстых сварных кромках обеднение и обогащение может сильно повлиять на состав материала. Изменение элементного состава шва влияет на эксплуатационные свойства полученной конфигурации: пластичность, твердость, электро- и теплопроводность, поэтому следует учитывать возможность изменения состава сварного шва при разработке приборов, предназначенных для функционирования в экстремальных условиях.

Работа поддержана грантом Президента РФ МК-8473.2010.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.
2. Milewski J. O., Barbe M. B. Modeling and analysis of laser melting within a narrow groove weld joint // Welding J. Supplement. 1999. Vol. 78, N 4. P. 109—115.
3. Surmenko E. L., Sokolova T. N. Study of chemical elements distribution in a laser weld joint // Laser Technologies in Welding and Material Proc. Kiev: E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU, 2005. P. 195—197.
4. Surmenko E. L., Tuchin V. V., Sokolova T. N., Chebotarevsky Yu. V., Konyushin A. V. Application of scanning sampling for studying of coatings // Proc. SPIE. Bellingham. 2005. Vol. 5707. P.117—121.
5. Демин А. П., Пеплов А. А., Соколова Т. Н., Сурменко Е. Л. Лазерный эмиссионный спектральный анализ состава покрытий с помощью многоканального измерительного регистратора спектров МИРС // Тез. докл. XVII Уральской конф. по спектроскопии. Новоуральск: Аналитика и контроль, 2005. С. 17.
6. Забелин А. М., Оришич А. М., Чирков А. М. Лазерные технологии машиностроения. Новосибирск: НГУ, 2004. 142 с.

**Сведения об авторах**

- Елена Львовна Сурменко** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Саратовский государственный технический университет, кафедра электронного машиностроения и сварки; E-mail: surmenko@yandex.ru
- Иван Андреевич Попов** — аспирант; Саратовский государственный технический университет, кафедра теоретической механики; E-mail: antaresrock@yandex.ru
- Татьяна Николаевна Соколова** — канд. техн. наук; Саратовский государственный технический университет, кафедра электронного машиностроения и сварки; E-mail: sokolova@pribor-t.ru

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.