



МИР Физики и техники

Справочник
по лазерной сварке

Редактор оригинального
издания С. Катаяма

Перевод с английского
под ред. Н.Л. Истоминой

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2015

УДК 621.791.725

ББК 34.64

С71

С71 Справочник по лазерной сварке

Редактор оригинального издания С. Катаяма

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 704 с. + 34 с. цв. вклейки

ISBN 978-5-94836-420-9

Среди технологий, предназначенных для обработки материалов лазером, особо выделяется лазерная сварка, включившая в себя последние достижения в разработке лазерных устройств. Для ее правильного применения и использования требуется ясное понимание физических механизмов и явлений, сопровождающих лазерную сварку. Поэтому в справочнике рассмотрены разнообразные лазерные или гибридные процессы сварки, сварка различных видов материалов, приведено описание металлургических, химических и механических аспектов сварки.

Справочник разделен на четыре части. В разделе I рассмотрены базовые принципы физических процессов сварки и раскрыты причины появления дефектов. Раздел II посвящен конкретным технологиям, рассмотрена лазерная сварка различных материалов. В разделе III представлены методы численного моделирования процесса лазерной сварки, описана процедура калибровки инструментов в роботизированной сварке. В разделе IV рассмотрены конкретные значения рабочих параметров и условий сварки в промышленных применениях.

Книга адресована студентам, инженерам, ученым, преподавателям и станет важной и полезной для всех, кто интересуется лазерной сваркой – от новичков до специалистов и экспертов.



УДК 621.791.725

ББК 34.64

This edition of **Handbook of Laser Welding Technologies** by **S Katayama** is published by arrangement with **ELSEVIER LIMITED** of The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK

Это издание книги «Справочник по лазерной сварке» под ред. С. Катаямы публикуется по договоренности с Элзвивер Лимитед по адресу Бульвар, Лэнгфорд Лэйн, Кидлингтон, Оксфорд, OX5 1ГБ, Великобритания

© 2013, Elsevier Ltd. All rights reserved

© 2015, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», перевод на русский язык, оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-420-9

ISBN 978-0-85709-264-9 (англ.)

СКОРОСТЬ
ТОЧНОСТЬ
КАЧЕСТВО
СТАБИЛЬНОСТЬ

Центр Компетенции Систем Промышленной Автоматизации (ООО «ЦК СПА») - единственный официальный представитель компании **Precitec GmbH & Co. KG** на российском рынке.

ЦК СПА в кратчайшие сроки и по доступным ценам обеспечивает поставку и обслуживание систем лазерной материалобработки, а также запасных частей и расходных материалов к ним.

Наш Центр также предлагает помощь в вопросах приобретения техники фирм-партнеров: Scansonic, Nutech, CleanLASER.



Более подробную информацию Вы найдете на сайте нашего Центра:
<https://www.ccspace.ru>

Обращайтесь к нам! Мы будем рады Вам помочь!

Тел.: +7 (495) 989 97 02 Email: ccspace@ccspace.ru

Содержание

Предисловие.....	18
Предисловие редактора перевода.....	20
Часть I. Основные принципы технологии лазерной сварки и ее развитие.....	22
Глава 1. Введение: Основы лазерной сварки.....	22
1.1. Характеристики лазерной сварки.....	22
1.2. Лазеры для сварки.....	24
1.3. Эффекты, возникающие при лазерной сварке.....	27
1.4. Глубина проплавления и дефекты сварки.....	33
1.5. Эволюция лазерной сварки.....	34
1.6. Справочная литература.....	37
Глава 2. Развитие CO₂-лазерной сварки.....	38
2.1. Введение.....	38
2.2. Принцип работы и типы лазеров.....	39
2.3. Характеристики пучков CO ₂ -лазера.....	42
2.4. Взаимодействие лазера с материалами.....	44
2.4.1. Поглощение лазерной энергии поверхностью материалов.....	44
2.4.2. Поглощение лазерной энергии в лазерно-индуцированной плазме.....	45
2.5. Процесс сварки и образование дефектов.....	55
2.5.1. Баланс давлений на стенки парогазового канала.....	55
2.5.2. Формирование дефектов в местах неполного проплавления при лазерной сварке CO ₂	56
2.5.3. Дефектообразование при CO ₂ -лазерной сварке с полным проплавлением в один проход.....	59
2.6. Промышленное применение CO ₂ -лазерной сварки.....	63
2.6.1. Автомобильная промышленность.....	63
2.6.2. Авиационная промышленность.....	64
2.6.3. Судостроение.....	64
2.6.4. Металлургия.....	66
2.6.5. Другие применения.....	66
2.7. Дальнейшие перспективы.....	68
2.8. Благодарность.....	68
2.9. Литература.....	68
Глава 3. Лазерная сварка Nd:YAG-лазером.....	71
3.1. Введение.....	71
3.2. Основы лазерной сварки в режиме образования канала проплавления.....	73
3.2.1. Основные геометрические характеристики канала: наклон стенок и глубина.....	73
3.2.2. Образование брызг.....	78
3.2.3. Стабилизация открытого канала с помощью боковой газовой струи.....	81

Законченные узлы и блоки лазерных комплексов от производителя

ОДНОЗЕРКАЛЬНЫЕ ДВУХКООРДИНАТНЫЕ ГАЛЬВАНОМЕТРИЧЕСКИЕ СКАНАТОРЫ **LSCAN-XY**

под различные длины волн, системы контроля
и управления с возможностью гибкого встраивания
в различное лазерное медицинское оборудование



АТЕКО-ТМ

Единственные
в России!



- Основное применение: лазерная медицина
- Высокоскоростная малогабаритная система
- Новинка рынка гальванометрических сканаторов

Поле сканирования
110 x 110 x 76 мм

ТРЕХМЕРНЫЕ СКАНАТОРНЫЕ ГОЛОВКИ **LSCANH-3D** с АВТОФОКУСОМ

Разработано для работы с волоконными
лазерами компании НТО "ИРЭ-Полюс"



- Соответствует мировым образцам
- Высокая скорость фокусировки
- Компактные размеры головки

www.ateko-tm.ru 8 (495) 642-07-63
ateko-tm@ateko-tm.ru 8 (499) 369-47-01

г. Москва, ул. Бол. Семеновская, д. 42

3.2.4. Поведение плазменного факела.....	83
3.2.5. Сварка в условиях вакуума.....	86
3.3. Примеры поведения канала проплавления и сварочной ванны при различных скоростных режимах сварки.....	87
3.3.1. Скорость сварки ниже 5 м/мин: режим Розенталь (Rosenthal).....	88
3.3.2. Скорость сварки 6—8 м/мин: режим одиночной волны.....	88
3.3.3. Скорость сварки 9—11 м/мин: режим удлиненного канала проплавления.....	90
3.3.4. Скорость сварки 12—19 м/мин: предвыпуклый режим.....	90
3.3.5. Скорость сварки свыше 20 м/мин: режим горба.....	91
3.3.6. Анализ порогов перехода между различными режимами.....	92
3.4. Выводы и дальнейшие перспективы.....	94
3.5. Литература.....	96
3.6 Дополнение: список символов.....	99
Глава 4. Разработки в области сварки дисковым лазером.....	100
4.1. Введение: основные принципы работы дисковых лазеров.....	100
4.2. Технологические тенденции и разработки.....	105
4.3. Применения.....	106
4.3.1. Лазерная технология как часть развивающейся технологии электромобилей.....	106
4.3.2. Лазерная сварка листового металла.....	109
4.3.3. Порошковая лазерная наплавка.....	114
4.3.4. Сканирующая лазерная сварка.....	116
4.3.5. Применение лазеров в производстве силовых передач.....	123
4.3.6. Гибридная лазерная сварка с высокой мощностью лазера.....	127
4.4. Перспективы развития.....	131
4.5. Литература.....	131
Глава 5. Технология лазерной сварки в импульсном и непрерывном режиме работы лазера.....	133
5.1. Введение.....	133
5.2. Основы лазерной сварки.....	135
5.2.1. Транспортные явления в металле.....	136
5.2.2. Явления переноса в лазерно-индуцированной плазме.....	138
5.2.3. Лазерно-индуцированное давление отдачи и образование канала.....	138
5.2.4. Взаимодействие лазерного излучения с плазмой и многократное отражение лазерного луча в канале проплавления.....	141
5.2.5. Теплопередача излучением в лазерно-индуцированной плазме.....	144
5.2.6. Отслеживание свободных поверхностей.....	145
5.2.7. Динамика потока расплава и сварочной ванны.....	145
5.2.8. Разрушение канала проплавления и формирование пористости.....	148
5.3. Новые разработки в области лазерной сварки.....	150
5.3.1. Гибридная лазерно-дуговая сварка.....	150
5.3.2. Многолучевая лазерная сварка.....	154



Комплексная и частичная модернизация российского и зарубежного технологического оборудования любой сложности



Организация поставок как отдельных единиц зарубежного технологического оборудования, так и комплексных законченных технологий «под ключ»



Сервисное обслуживание российского и зарубежного технологического оборудования любой сложности



Обучение специалистов заказчика
Технологический аудит производства
Проектирование и строительство производств микроэлектроники

124460, г. Москва, Зеленоград,
проезд 4806, д. 4, стр. 1
тел.: (499) 479-7724, факс: (499) 479-1239
info@nppesto.ru www.nppesto.ru

ГРУППА КОМПАНИЙ



ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Закрытое акционерное общество
«Научно-производственное предприятие
«Электронное специальное
технологическое оборудование»

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО
технологического оборудования
(лазерное, вакуумное, сборочное, нестандартное)
и внедрение технологий



МЛ1 - лазерные машины, предназначенные для высококачественной размерной обработки с минимальными размерами дефектных зон (резка, фрезеровка, скрайбирование, прошивка отверстий и т.п.)

5.3.3. Импульсный контроль в лазерной сварке для предотвращения пористости.....	157
5.3.4. Лазерная сварка с помощью электромагнитной силы.....	159
5.4. Будущие тенденции.....	162
5.5. Литература.....	164
Глава 6. Лазерная сварка в режиме проводимости.....	170
6.1. Введение: сравнение лазерной сварки в режиме образования канала и в режиме проводимости.....	170
6.2. Переход между двумя режимами.....	173
6.3. Лазерная сварка в режиме проводимости.....	179
6.4. Применение лазерной сварки в режиме проводимости.....	184
6.5. Литература.....	189
Глава 7. Разработки в технологии лазерной микросварки.....	195
7.1. Введение.....	195
7.2. Выбор источника лазерного излучения для микросварки.....	197
7.2.1. Качество пучка.....	198
7.2.2. Устройство лазера.....	199
7.2.3. Доставка пучка.....	207
7.2.4. Профили пучка.....	212
7.2.5. Сравнение Nd:YAG-лазера и волоконного лазера.....	215
7.3. Процесс лазерной микросварки.....	215
7.3.1. Режимы сварки.....	215
7.3.2. Сварные швы.....	220
7.3.3. Материалы.....	221
7.3.4. Микросварка разнородных материалов.....	226
7.3.5. Плакирование и покрытие.....	229
7.4. Дефекты и оценка микросварных соединений.....	230
7.4.1. Дефекты сварки.....	230
7.4.2. Оценка сварных швов.....	235
7.5. Применение лазерной микросварки.....	238
7.5.1. Примеры использования лазерной микросварки.....	238
7.6. Выводы и будущие тенденции.....	245
7.7. Литература.....	246
Часть II. Лазерные технологии сварки различных материалов.....	249
Глава 8. Лазерная сварка сплавов легких металлов: алюминиевые и титановые сплавы.....	249
8.1. Введение в лазерную сварку алюминиевых сплавов.....	249
8.2. Методы лазерной сварки для алюминиевых сплавов.....	252
8.3. Микроструктура, дефекты, механические свойства и коррозионные свойства алюминиевых сплавов.....	262
8.3.1. Микроструктура.....	262
8.3.2. Дефекты.....	264
8.3.3. Механические свойства.....	265
8.3.4. Коррозия.....	266

ARCAL™

Просто. Надежно. Эффективно



ARCAL™ Prime
ЧИСТОЕ РЕШЕНИЕ



ARCAL™ Chrome
БЛЕСТЯЩИЙ ВЫБОР



ARCAL™ Speed
ВЫСОКАЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ



ARCAL™ Force
МОЩНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

4 ГОТОВЫЕ ГАЗОВЫЕ СВАРОЧНЫЕ СМЕСИ,
УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЕ 100% ПОТРЕБНОСТЕЙ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ ПРИ СВАРКЕ

- Смеси **ARCAL™** – это простота в использовании, надежность и высокая эффективность
- 4 оптимально подобранные по составу смеси обеспечивают высокое качество и стабильность сварочного процесса
- Смеси **ARCAL™** поставляются в баллонах, моноблоках или в жидком виде вместе со специальной динамической станцией смешения
- Все баллоны **ARCAL™** оснащены инновационным вентилем SMARTOP™ со встроенным клапаном обратного давления и специальным защитным колпаком

www.airliquide.ru

+7 495 641 2898

 **AIR LIQUIDE**

Creative Oxygen

8.4. Введение в лазерную сварку титановых сплавов.....	268
8.5. Методы лазерной сварки титановых сплавов.....	270
8.6. Микроструктура, дефекты, механические свойства и коррозионное поведение сварных швов титана.....	276
8.6.1. Микроструктура.....	276
8.6.2. Дефекты.....	279
8.6.3. Механические свойства.....	282
8.6.4. Коррозия.....	286
8.7. Литература.....	287
Глава 9. Лазерная сварка и пайка разнородных материалов.....	295
9.1. Введение.....	295
9.2. Особые проблемы соединения разнородных материалов.....	297
9.3. Процессы лазерных соединений и их применения.....	299
9.3.1. Общие соображения.....	299
9.3.2. Лазерная пайка и лазерная сварка.....	300
9.3.3. Комбинированные методы и методы для специальных целей, использующие лазеры.....	303
9.3.4. Потенциальные области применения.....	307
9.4. Формирование и свойства разнородных соединений.....	309
9.4.1. Формирование соединений и слой интерметаллической фазы.....	309
9.4.2. Механические свойства и характеристики формообразования.....	313
9.5. Дальнейшие перспективы.....	317
9.6. Литература.....	318
Глава 10. Лазерная сварка пластмасс.....	322
10.1. Введение.....	322
10.2. История.....	323
10.3. Теория сварки пластмасс.....	323
10.3.1. Пластмассовые материалы и тепловые эффекты.....	323
10.3.2. Получение сегмента соединения: диффузия путем рептации.....	325
10.4. Влияние основных параметров сварки.....	327
10.5. Моделирование сварки пластмасс.....	327
10.6. Введение в процессы сварки пластмасс.....	329
10.6.1. Методы, в которых тепло создается механическим движением.....	330
10.6.2. Методы, использующие механические источники тепловой энергии.....	330
10.6.3. Методы, непосредственно использующие электромагнетизм.....	331
10.7. Сочетания полимеров, которые можно сваривать.....	331
10.8. Лазерная сварка пластмасс: описание процесса.....	333
10.8.1. Введение.....	333
10.8.2. Оборудование и его варианты.....	334
10.8.3. Лазеры, используемые для трансмиссионной сварки.....	335
10.8.4. Оборудование манипуляционных систем.....	336
10.8.5. Системы зажима.....	338
10.8.6. Методы контроля и управления.....	339
10.9. Параметры сварки.....	341

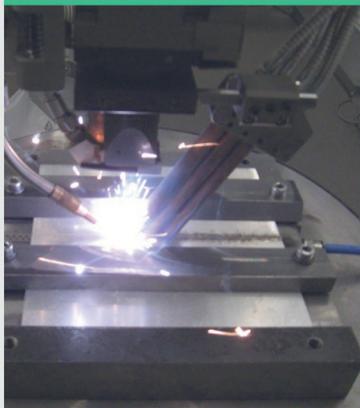
Основные направления деятельности НП «ВЛИТЦ»

- Оказание услуг промышленным предприятиям в области резки, сварки, наплавки, закалки, гравировки, маркировки
- Научно-исследовательская деятельность
- Учебно-образовательная деятельность совместно с Лазерной технологической академией ВГУ
- Внедренческая деятельность - внедрение лазерных технологий в промышленность РФ
- Подбор лазерного оборудования для конкретных заказчиков

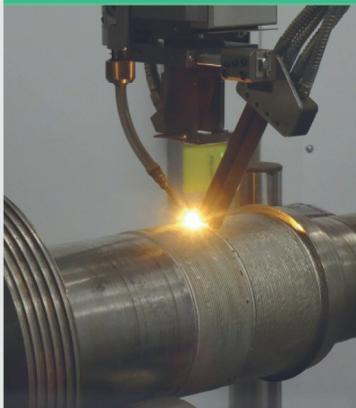
Основной задачей НП «ВЛИТЦ» является разработка и внедрение инновационных лазерных технологий в промышленность России для её модернизации.

На базе НП «ВЛИТЦ» разрабатываются и внедряются такие лазерные технологии как:

Лазерная сварка сталей и сплавов (алюминиевых, титановых, медных, нержавеющей, жаропрочных)



Лазерная наплавка (непрерывным и импульсным излучением высоколегированных сталей)



Лазерная термообработка поверхности (упрочнение)



Другой, не менее важной задачей центра, является научно-образовательная деятельность в области высоких технологий. НП «ВЛИТЦ» является площадкой для практических занятий по обучению и повышению квалификации операторов, инженеров-технологов Лазерной технологической академии Вятского государственного университета.

10.10. Преимущества и недостатки трансмиссионной лазерной сварки.....	342
10.10.1. Преимущества.....	342
10.10.2. Недостатки.....	342
10.11. Области применения.....	343
10.12. Литература.....	343
Глава 11. Лазерная сварка стекла.....	345
11.1. Введение.....	345
11.2. Основные характеристики сварки стекла.....	346
11.3. Сварка стекла лазерами в непрерывном режиме (CW).....	348
11.3.1. Основы лазерной сварки в непрерывном режиме.....	348
11.3.2. Области применения сварки стекла CO ₂ -лазером.....	352
11.4. Сварка стекла ультракороткими лазерными импульсами (USPL-лазеры).....	360
11.4.1. Основы сварки стекла USPL.....	360
11.4.2. Сварка стеклянных пластин внахлест.....	367
11.5. Заключение и перспективы развития.....	373
11.6. Литература.....	375
Глава 12. Механизмы образования дефектов в лазерной сварке и методы их устранения.....	378
12.1. Введение.....	378
12.2. Терминология, характеристики, причины и превентивные меры в отношении дефектов, возникающих при лазерной сварке.....	379
12.2.1. Геометрические или видимые дефекты.....	379
12.2.2. Внутренние или невидимые дефекты.....	388
12.2.3. Дефекты качества или свойств.....	396
12.3. Механизм формирования пористости и превентивные меры ее устранения.....	399
12.3.1. Рентгеновское просвечивание: оборудование для наблюдения образования пузырьков и пористости в режиме пропускания.....	399
12.3.2. Механизм формирования пористости и превентивные меры ее устранения при точечной сварке лазером.....	399
12.3.3. Механизм формирования пористости и превентивные меры ее устранения во время лазерной сварки валиковым швом в непрерывном режиме.....	403
12.3.4. Механизм формирования пористости и превентивные меры ее устранения во время лазерной сварки материалов с повышенной чувствительностью к пористости.....	408
12.4. Механизмы образования горячего растрескивания и превентивные меры его устранения: усадочное растрескивание и ликвационные трещины.....	413
12.5. Литература.....	419
Глава 13. Остаточные напряжения и деформации при лазерной сварке.....	424
13.1. Введение.....	424
13.2. Причины остаточных напряжений и деформаций.....	426



lasercentr.ru

НПО Лазерный Технологический Центр

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СТАНКИ

сварка, резка, наплавка,
поверхностное термоупрочнение,
гравировка



Предприятие выпускает лазерные станки для контурной резки листовых материалов с размерами рабочей зоны:

Параметры	Рабочее поле обработки станков, мм							
Ширина	800	1500	1500	2500	2500	3200	3200	4800
Длина	800	2500	3000	6000	8000	12000	16000	26000
Скорость хол. хода, м/мин	Точность контурная, мм/м	Точность позиционирования, мм	Точность слежения, мм	Ход по Z, мм				
80-200	±0,1	±0,05	≤0,15	100-200				

Роботизированные станки для сварки, наплавки и термообработки.
Комплектуются оптоволоконными и CO₂ лазерами.

13.2.1. Несоответствия и врожденные деформации.....	426
13.2.2. Внутренние напряжения и деформации тонкой пластины.....	429
13.2.3. Внутренние напряжения и внутренние силы в тонкой пластине.....	429
13.3. Механизм образования продольной и поперечной усадки в сварных соединениях.....	430
13.3.1. Внутренние напряжения в модели из трех брусков, подвергшихся тепловому циклу.....	430
13.3.2. Деформации при сварке в продольном и поперечном направлениях.....	433
13.4. Факторы, влияющие на возникающие при сварке деформации и остаточные напряжения.....	435
13.4.1. Поперечная усадка и угловая деформация.....	436
13.4.2. Продольная усадка.....	438
13.4.3. Коробление, вызванное сваркой.....	440
13.5. Деформации и остаточные напряжения, создаваемые процессом сварки.....	442
13.5.1. Появляющаяся при сварке деформация и ее контроль.....	442
13.5.2. Остаточные напряжения.....	444
13.5.3. Прогнозы на основе моделирования.....	446
13.5.4. Лазерное формирование объемных деталей.....	447
13.5.5. Проблемы, которые предстоит решить.....	448
13.6. Список литературы.....	449
Часть III. Разработка новых лазерных технологий.....	451
Глава 14. Применение робототехники в лазерной сварке.....	451
14.1. Введение: ключевые проблемы роботизированной лазерной сварки.....	451
14.2. Топология соединений.....	454
14.3. Системы координат и переходы между ними.....	455
14.4. Калибровка инструмента.....	457
14.4.1. Калибровка лазерного инструмента.....	459
14.4.2. Комбинированная калибровка.....	462
14.5. Обучение отслеживанию шва.....	465
14.6. Управление, основанное на траектории.....	466
14.7. Выводы.....	471
14.8. Литература.....	473
Глава 15. Разработка методов сканирования лучом (дистанционно) и интеллектуальная обработка луча.....	475
15.1. Введение.....	475
15.2. Перемещение пучка над рабочей заготовкой.....	477
15.3. Формирование пучка.....	481
15.4. Тенденции развития.....	484
15.5. Литература.....	486

Глава 16. Развитие технологии тандемной двухлучевой лазерной сварки	487
16.1. Введение.....	487
16.2. Численные методы исследования текучести расплавленного металла при двухлучевом облучении.....	488
16.3. Методика двухлучевой лазерной технологии.....	490
16.4. Применение двойного лазерного пучка.....	492
16.4.1. Сварка.....	492
16.4.2. Сварка разнородных материалов.....	501
16.4.3. Модификация поверхности.....	505
16.4.4. Резка.....	508
16.5. Заключение.....	512
16.6. Литература.....	512
Глава 17. Развитие технологии многопроходной лазерной сварки с присадочной проволокой	514
17.1. Введение.....	514
17.2. Принцип многопроходной сварки с присадочной проволокой.....	515
17.3. Развитие технологии.....	517
17.3.1. Сварочные системы.....	517
17.3.2. Параметры сварки.....	519
17.3.3. Примеры использования.....	522
17.4. Тенденции будущего: дальнейшее повышение эффективности сварки.....	527
17.4.1. Сравнение традиционной сварки и сварки со вспомогательной газовой струей.....	528
17.4.2. Сварка I-стыкового соединения пластин толщиной 40 мм без присадочной проволоки.....	530
17.4.3. Сварка I-стыкового соединения пластин толщиной 50 мм с присадочной проволокой.....	532
17.5. Литература.....	532
Глава 18. Развитие гибридных и комбинированных технологий лазерной сварки	534
18.1. Введение.....	534
18.2. Лазерная и дуговая гибридная сварка.....	537
18.2.1. Принципы и современный уровень развития.....	537
18.2.2. Физическая модель образования корня шва.....	541
18.2.3. Современное техническое оборудование.....	544
18.2.4. Сварка толстослойных пластин из высокопрочной стали.....	545
18.2.5. Области применения.....	550
18.3. Сочетание лазерной сварки и лазерной резки.....	550
18.3.1. Многофункциональная обработка.....	550
18.3.2. Лазерная комбинированная головка.....	552
18.3.3. Значение использования лазера.....	554
18.3.4. Варианты конструкций и их применение.....	555
18.3.5. Прогнозы будущего развития.....	557
18.4. Литература.....	561

Глава 19. Развитие гибридной технологии лазерно-дуговой сварки	564
19.1. Введение.....	564
19.2. Развитие технологии.....	565
19.3. Примеры использования.....	570
19.4. Вопросы качества.....	573
19.5. Тенденции будущего.....	577
19.6. Источники дополнительной информации и рекомендации.....	580
19.6.1. Полезные ссылки.....	580
19.7. Литература.....	581
Глава 20. Разработки в области создания моделей лазерной и гибридной лазерной сварки и численного моделирования	583
20.1. Введение: роль моделирования в лазерной сварке.....	583
20.2. Ключевые вопросы моделирования процессов лазерной сварки.....	586
20.2.1. Взаимодействие лазерного излучения с веществом.....	586
20.2.2. Модель лазерного источника тепла.....	590
20.2.3. Модель многократного отражения в канале проплавления.....	593
20.2.4. Модель рассеяния в канале проплавления.....	597
20.2.5. Динамика сварочной ванны при лазерной сварке.....	600
20.2.6. Взаимодействие лазера и дуги.....	604
20.2.7. Моделирование процесса дуговой сварки.....	606
20.2.8. Динамика сварочной ванны при гибридной лазерной сварке.....	608
20.3. Способы улучшения техники лазерной сварки и качества элементов, соединенных лазерной сваркой.....	608
20.4. Тенденции будущего.....	612
20.5. Литература.....	613
Часть IV. Примеры промышленного применения лазерной сварки	616
Глава 21. Применения лазерной сварки в автомобильной промышленности	616
21.1. Введение.....	616
21.2. Производственные цели и задачи.....	617
21.2.1. Цели.....	617
21.2.2. Задачи.....	617
21.2.3. Экономическая эффективность.....	618
21.3. Применение лазера в кузовном цехе.....	619
21.3.1. Лазерная сварка стали.....	620
21.3.2. Лазерная сварка алюминия.....	624
21.4. Проблемы качества.....	627
21.4.1. Прочность.....	627
21.4.2. Подготовка к работе.....	628
21.5. Тенденции будущего.....	631
21.5.1. Создание кузова автомобиля.....	632
21.5.2. Мониторинг и контроль лазерного процесса.....	633
21.5.3. Моделирование лазерных процессов.....	635
21.5.4. Экологическая безопасность.....	636
21.6. Литература.....	637



Глава 22. Применение лазерной сварки в железнодорожном машиностроении	638
22.1. Введение: роль лазерной сварки в железнодорожном машиностроении.....	638
22.2. Технология лазерной сварки железнодорожных составов из нержавеющей стали.....	639
22.2.1. Влияние параметров лазерной сварки.....	641
22.2.2. Особенности соединений при лазерной сварке железнодорожных составов из нержавеющей стали.....	646
22.3. Модель теплового источника для нахлесточной лазерной сварки железнодорожных составов из нержавеющей стали.....	649
22.3.1. Выбор шага сетки при моделировании.....	649
22.3.2. Граничные условия.....	650
22.3.3. Выбор модели теплового источника.....	651
22.3.4. Формы швов при различных параметрах сварки.....	652
22.4. Контроль качества лазерной сварки транспортных средств из нержавеющей стали.....	654
22.4.1. Требования к качеству.....	655
22.4.2. Ультразвуковая диагностика.....	656
22.5. Тенденции будущего.....	656
22.6. Литература и рекомендации.....	657
22.7. Литература.....	659
Глава 23. Применение лазерной сварки в судостроительной промышленности	660
23.1. Введение.....	660
23.2. Аprobация лазерной сварки в судостроении.....	661
23.2.1. Самозакалка.....	663
23.2.2. Эффекты смещения кромок сварного соединения.....	664
23.2.3. Образование дефектов при затвердевании.....	664
23.2.4. Механические свойства.....	665
23.2.5. Общие рекомендации.....	668
23.3. Промышленные примеры.....	669
23.3.1. Meyer Werft, Германия.....	669
23.3.3. Blohm + Voss, Германия.....	673
23.3.4. STX Finland Cruise Oy, Турку, Финляндия.....	673
23.3.5. Odense Steel Shipyard, Дания.....	674
23.4. Тенденции будущего.....	675
23.5. Выводы.....	675
23.6. Литература.....	676
Предметный указатель	678
ЗАО «Региональный центр лазерных технологий»	697

Предисловие

Более 50 лет прошло с тех пор, как при излучении импульсного рубинового лазера впервые был получен лазерный луч. С тех пор появилось много лазеров, в том числе разработанных специально для использования в промышленности — мощные CO₂-лазеры, YAG-лазеры с волоконной доставкой излучения и коротковолновые эксимерные лазеры. В последнее время значительное внимание уделяется развитию высокоэффективных полупроводниковых лазеров, высококачественных дисковых лазеров и мощных, высоко яркостных и малогабаритных волоконных лазеров. Кроме того, с появлением новых приложений для лазерных инструментов стали разрабатываться твердотельные лазеры, излучающие на второй или третьей гармонике, так называемые зеленые или ультрафиолетовые лазеры, и ультракоротко импульсные лазеры, получившие название — фемтосекундные (фс) или наносекундные (нс). Соответственно, в настоящее время разработано множество различных технологических методов на основе лазерной обработки материалов, включая процессы удаления материала (резка и сверление), процессы соединения (сварка, высокотемпературная и низкотемпературная пайка), процессы обработки поверхности (упрочнение в результате фазового превращения, плакирование и отжиг). Особенностью современных промышленных лазеров стала разработка периферической аппаратуры, которая становится неотъемлемой частью лазерного инструмента — это оправки, зажимные приспособления, системы мониторинга и фокусирующая оптика, они позволяют включить лазеры в автоматические линии сварки, резки и бурения с целью улучшения этих процессов. Таким образом, мы видим, что лазерная обработка по-прежнему остается важной технологией двадцать первого века.

Среди технологий, предназначенных для обработки материалов лазером, особо выделяется лазерная сварка, включившая в себя последние достижения в разработке лазерных устройств. Для ее правильного применения и использования требуется ясное понимание физических механизмов и явлений, сопровождающих лазерную сварку. Поэтому в книге рассмотрены разнообразные лазерные или гибридные процессы сварки, сварка различных видов материалов, книга включает в себя также описание металлургических, химических и механических аспектов сварки и обращена к студентам, инженерам, ученым и преподавателям, занимающихся или интересующихся лазерной сваркой. Книга разделена на четыре части: базовые основы технологии лазерной сварки, лазерная сварка различных материалов, развитие технологии лазерной сварки и применения лазерной сварки, охватывающие практически все вопросы лазерной сварки.

Автор хотел бы выразить свою признательность за сотрудничество и вклад всех авторов. Кроме того, автор хотел бы поблагодарить Ms Rachel Cox, Ms Anneka

Hess, Ms Laura Pugh и Ms Sarah Lynch из издательства Woodhead Publishing Limited за их поддержку, помощь и тяжелую работу. Автор очень надеется на то, что его книга станет важной и полезной для всех, кто интересуется лазерной сваркой — от новичков до экспертов или специалистов — и то, что использование технологий лазерной сварки будет расширяться во всем мире.

С. Катаяма

Предисловие редактора перевода

Хорошие обзоры последних достижений лазерной сварки представлены в трудах различных конференций и в ряде книг. Однако тем, кто лишь начинает применять лазерную или тандемную лазерную сварку или рассматривает возможность использовать на своем предприятии гибридную лазерную сварку, зачастую довольно трудно составить цельное представление об основных принципах и особенностях применения лазерных методов в сварке. Эта книга позволяет преодолеть подобные трудности, давая основные принципы и приводя практические значения рабочих параметров лазерной сварки.

Перед вами справочник по лазерной сварке, составленный под руководством Сейдзи Катаямы, генерального директора Исследовательского института соединений и сварки Университета Осаки (Япония) JWRI. Его работы в свое время произвели революцию в лазерной сварке алюминия и в создании металло-пластиковых соединений.

Существует немало превосходных учебников по сварке, эта книга — не учебник. Здесь подробно рассмотрены лишь те характеристики лазеров, которые существенны для использования в сварке: диапазон длин волн излучения, режимы генерации, форма импульса, параметр качества пучка, поляризация излучения. Главы этой книги можно комбинировать различным образом для использования в работе. Можно начинать с раздела II, посвященного конкретным технологиям, а затем для справки переходить к главам раздела I, где даны базовые принципы физических процессов сварки и раскрыты причины появления дефектов, дано обоснование выбора лазера именно с такой длиной волны. В разделе III можно почерпнуть информацию о методах численного моделирования процесса лазерной сварки. Там же описана процедура калибровки инструментов в роботизированной сварке. Не пропустите раздел IV, где представлены конкретные значения рабочих параметров и условий сварки в промышленных применениях, здесь много информации для сравнения результатов численного моделирования с полученными на практике. Каждую главу завершает прогноз развития данного метода лазерной сварки.

В основе всех представленных прогнозов — стремительное появление на рынке самых разных материалов. Это отражает происходящий в индустрии сдвиг в сторону создания облегченных кузовных конструкций и, наоборот, надежных толстостенных конструкций. Новые материалы дают толчок развитию технологий соединения. И хотя некоторые из процессов лазерной сварки все еще находятся в стадии эксперимента, уже ясно — лазер это очень гибкий инструмент. Он легко встраивается в уже существующие технологические цепочки и соединяет материалы, которые еще недавно считались не свариваемыми. Лазерная сварка готова опровергнуть это устоявшееся мнение.

В издательстве «Техносфера» уверены, что справочник по сварке будет полезен как людям, имеющим опыт в лазерной сварке, так и новичкам. Ведь в редактировании перевода справочника нам помогали признанные отечественные специалисты в области лазерной обработки материалов. Прежде всего, редактор выражает благодарность Игнатову Александру Геннадьевичу (компания «ЛазерИнформСервис», Санкт-Петербург) за критические замечания и за консультацию при переводе терминов по лазерной сварке. Слова признательности за неиссякаемую доброжелательность и поддержку работы мы адресуем Горному Сергею Георгиевичу (компания «Лазерный центр», Санкт-Петербург) и Лебязьеву Александру Николаевичу (компания «АТЕКО-ТМ», Москва).

Н.Л. Истомина

Апрель 2015 г.

Часть I.
Основные принципы технологии лазерной сварки
и ее развитие

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ: ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

S. Katayama, JWRI¹, Университет Осаки, Япония

DOI: 10,1533 / 9780857098771.1.3

Аннотация. В этой главе описываются характеристики лазерной сварки, особенности основных видов лазеров, используемых для сварки, факторы, влияющие на глубину проплавления, лазерные сварочные явления, включающие поведение лазерноиндуцированной плазмы, парогазового канала и металлического расплава в сварочной ванне во время лазерной сварки. Также рассматриваются дефекты сварки и современные тенденции лазерной сварки².

Ключевые слова: лазерная сварка, CO₂-лазер, YAG-лазер, волоконный лазер, диодный лазер, передача лазерного излучения по волокну, сварочные явления, дефекты сварки, плазменный факел, глубокое проплавление, условия сварки.

I.1. Характеристики лазерной сварки

Сварка — наиболее универсальный и действенный способ соединения элементов при промышленном конструировании в самых разнообразных индустриальных областях. Лазер — тепловой источник с высокой плотностью энергии. Поэтому лазерная сварка признана всеми как передовая технология соединения материалов лазерным лучом высокой мощности и высокой плотности энергии. Соответствие между распределением плотности мощности при разных видах сварки (лазерной, электронно-лучевой, плазменной и дуговой)

¹ JWRI — Научно-исследовательский центр соединений и сварки. — *Прим. пер.*

² Содержание этой главы было воспроизведено со всеми необходимыми согласованиями из статьи Сейджи Катаяма «Лазерная сварка» (McGraw Hill. Encyclopedia of Science & Technology, Vol. 9 (2012), pp. 707—714). Автор хотел бы выразить свою признательность этой компании.

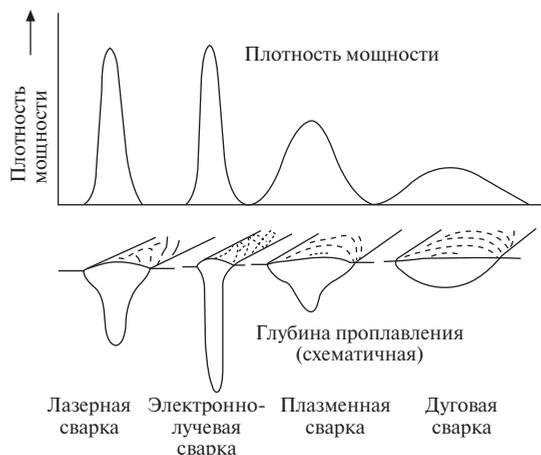


Рис. 1.1. Плотность мощности при различных видах сварки и соответствующая им геометрия сварных швов

и геометрией получаемого сварного шва, характерного каждому виду, представлено на рис. 1.1.

Плотность мощности лазерного луча эквивалентна плотности мощности электронного луча и значительно превышает плотность, возникающую у дуги или плазмы. Соответственно, лазерный или электронный луч с высокой плотностью мощности может создавать глубокий и узкий парогазовый канал и формировать глубокую и узкую область проплавления. Для устойчивого проведения процесса сварки с глубоким проплавлением при электронно-лучевой сварке необходимо использовать вакуумную камеру, предусмотрев в ней защиту от рентгеновского излучения, причем для сварки стальных пластин требуется еще и их предварительное размагничивание. Дуговая и плазменная сварка осуществляться в вакууме не могут. Однако лазерная сварка может вестись в вакууме, создавая прочный и глубокий сварной шов, способом, аналогичным тому, что применяется, как описано в разд. 1.5, при электронно-лучевой сварке. В целом скорость лазерной сварки выше, чем скорость дуговой или плазменной сварки.

Среди всех сварочных процессов лазерная сварка реализует самые разнообразные соединения металлов или пластиков толщиной от очень тонких листов, примерно 0,01 мм, до толстых пластин, около 50 мм, в среде защитного газа, такого как гелий (He), аргон (Ar) или иногда азот (N_2) в воздушной среде. Данный способ приобрел большую популярность как перспективная высококачественная технология соединения, обеспечивающая высокую точность, высокую производительность, высокую скорость, гибкость и низкое искажение [1—4]. Ее также можно использовать для роботизации, снижения использования ручного труда, полной автоматизации и систематизации на производственных линиях. Поэтому с развитием новых лазерных инструментов и разработкой новых процессов соединений растет и ряд практических способов использования лазерной

сварки. Для того, чтобы при проектировании соединения с помощью сварки сделать правильный выбор лазерного инструмента, важно знать не только характер излучения лазера (PW — Pulse Welding, *лазерная сварка импульсным излучением*; CW — Continuous Welding, *лазерная сварка непрерывным излучением*), его параметры и возможности лазерных инструментов. Важно также знать и факторы, влияющие на глубину проплавления, условия возникновения дефектов, механизмы поведения материалов при сварке, величину свариваемости материалов и механические свойства сварных соединений. Для получения более подробной информации об этом воспользуйтесь ссылками в конце этой главы [1—4].

1.2. Лазеры для сварки

Основные виды и характеристики лазеров, используемых для сварки, приведены в табл. 1.1. А на рис. 1.2 схематически представлены типичные лазерные системы: на основе CO₂- и Nd:YAG-лазеров. Газовые CO₂-лазеры, излучающие на длине волны 10,6 мкм, обладают лучом высокого качества и легко достигают высокой мощности (максимальная мощность лазера — 50 кВт; лазеры с уровнем мощности 1—15 кВт используют, в основном, при сварке сталей, автомобильных деталей, самолетов, судов и т. д.). При лазерной сварке в среде защитного газа CO₂ следует принимать во внимание следующие проблемы:

- излучение от высокомошных лазеров должно передаваться в рабочую зону с помощью зеркал, а не оптического волокна;
- плазма Ar, которая уменьшает глубину проплавления, может быть легко сформирована в защитный газ Ar.

Твердотельный Nd:YAG-лазер с длиной волны 1,06 мкм может работать в импульсном или непрерывном режиме, а его излучение может доставляться в рабочую зону по оптическому волокну. Импульсные лазеры используются при сварке мелких деталей, таких как корпуса аккумуляторов, электрические компоненты, стеклянные рамки и т. д. Непрерывные лазеры мощностью 2—7 кВт используются для лазерной сварки точно подогнанных заготовок, алюминиевых автомобилей, стальных листов с цинковым покрытием, труб и контейнеров из нержавеющей стали и т. д. Недостаток подобных Nd:YAG-лазеров с ламповой накачки — низкий электрический КПД (отношение выходной мощности лазера к потребляемой инструментом электроэнергии) менее 4%. Поэтому разработки новых высокомошных CO₂- и YAG-лазеров пока затормозились. Вместо них получили развитие твердотельные YAG-лазеры с диодной накачкой мощностью до 6—10 кВт. Однако в последнее время большие обещания достижения высоких показателей мощности, эффективности и качества пучка демонстрируют дисковые и волоконные лазеры, гораздо более высокие, нежели YAG-лазеры с ламповой или диодной накачкой.

Таблица 1.1. Типы и характеристики лазеров для сварки

Тип лазера	Характеристики лазера
CO ₂ -лазер	Длина волны: 10,6 мкм; дальняя ИК-область. Вещество рабочего тела лазера: газовая смесь CO ₂ -N ₂ -He (газ). CW (сварка непрерывным лазерным излучением). Средняя мощность: 50 кВт (максимальная). Нормальная: 1—15 кВт
YAG-лазер с ламповой накачкой	Длина волны: 1,06 мкм; ближняя ИК-область. Вещество рабочего тела лазера: гранат Nd ³⁺ :Y ³ Al ⁵ O ¹² (твердое тело). CW (сварка непрерывным лазерным излучением). Средняя мощность: 10 кВт (каскадного типа с волоконной парой макс.). Нормальная: 50 Вт—7 кВт. КПД: 1—4%
Лазерный диод	Длина волны: 0,8—1,1 мкм; ближняя ИК-область. Вещество рабочего тела лазера: InGaAsP и т. п. (твердое тело). CW (сварка непрерывным лазерным излучением). Средняя мощность: 10 кВт (с одного стека); 15 кВт (с волоконно-оптической транспортировкой излучения). Преимущества: компактность и высокий КПД (20—60%)
Твердотельный лазер с накачкой лазерными диодами	Длина волны: ~1 мкм; ближняя ИК-область. Вещество рабочего тела лазера: гранат Nd ³⁺ :Y ³ Al ⁵ O ¹² (твердое тело) и т. п. CW (сварка непрерывным лазерным излучением). Средняя мощность: 13,5 кВт. PW (сварка импульсным лазерным излучением). Средняя мощность: 6 кВт (слэб-тип)
Дисковый лазер	Длина волны: 1,03 мкм; ближняя ИК-область. Вещество рабочего тела лазера: Yb ³⁺ :YAG или YVO ⁴ (твердое тело) и т. п. CW (сварка непрерывным лазерным излучением). Средняя мощность: 16 кВт (каскадного типа макс.). Преимущества: волоконно-оптическая доставка излучения, большая яркость, высокий КПД (15—25%)
Волоконный лазер	Длина волны: 1,07 мкм; ближняя ИК-область. Вещество рабочего тела лазера: Yb ³⁺ :SiO ₂ (твердое тело) и т. п. CW (сварка непрерывным лазерным излучением). Средняя мощность: 100 кВт (с волоконно-оптической связью макс.). Преимущества: подача импульса через волокно, большая яркость, высокий КПД (20—30%)

Подача лазерного излучения к рабочей зоне осуществляется через волокно. Этот способ отличается хорошей гибкостью, применяется при использовании Nd:YAG-лазеров с ламповой или диодной накачкой, диодных лазеров, Yb:дисковых и Yb:волоконных лазеров.

В последние десятилетия основные разработки высокомошных лазеров, обладающих высоким качеством пучка, сфокусированы на создании лазерных

диодов, а также дисковых и волоконных лазеров с диодной накачкой. Лазерные диоды обладают высокой электрической эффективностью до 30—60%. Установленные на роботах диодные лазеры с прямой или волоконной транспортировкой излучения используются для сварки тонких листов из алюминиевых сплавов, сталей, нержавеющей сталей, пластиков и т. п., а также для пайки оцинкованных сталей и т. д. Недостаток лазерных диодов — плохое качество луча. Высокая мощность, высокая электрическая эффективность и высокое качество пучка достигаются при использовании дисковых и волоконных лазеров. Дисковые лазеры и волоконные лазеры с высокой электрической эффективностью, достигающей 25%, и максимальной мощностью — 16 кВт и 100 кВт, соответственно, коммерчески доступны. Качество их пучка чрезвычайно высоко, поскольку у них параметр BPP (Beam Parameter Product) меньше, чем 10 мм · мрад. Как дисковые, так и волоконные лазеры используются в качестве источников тепловой

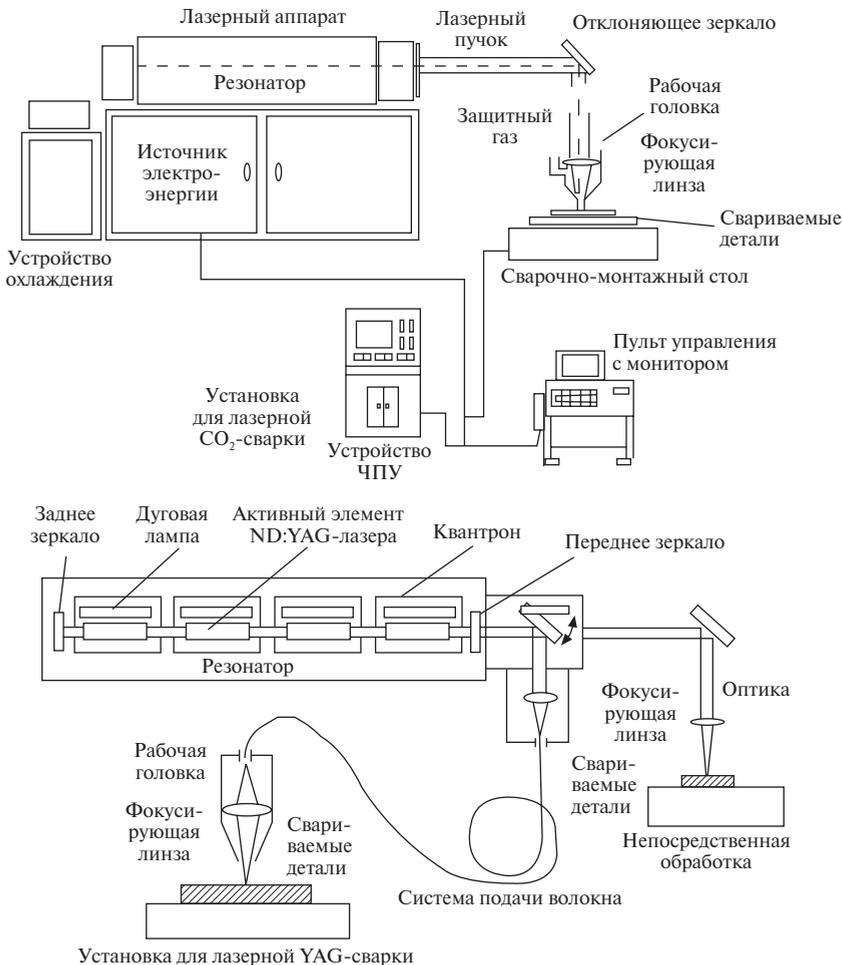


Рис. 1.2. Схема систем YAG- и CO₂-лазерной сварки

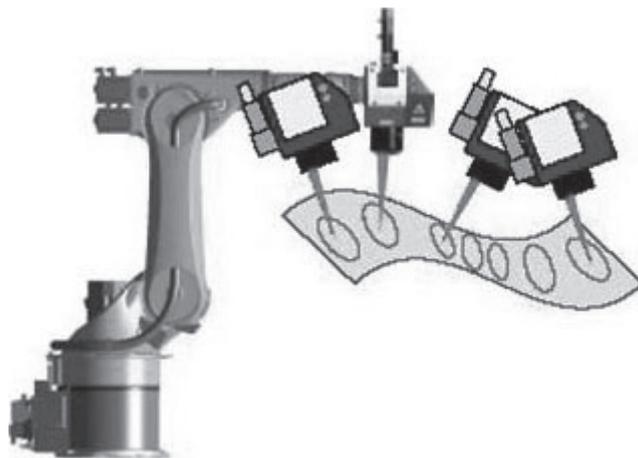


Рис. 1.3. Схема дистанционной системы сварки с использованием твердотельного лазера

энергии для дистанционной сварки (см. рис. 1.3). Дистанционная лазерная сварка роботом со сканером — наиболее перспективная технология соединения, она отличается высокими показателями скорости и производительности. Будущее использование этих лазеров связывают с развитием технологий сварки электрических компонентов, автомобилей, поездов, мостов, трубопроводов, судов, самолетов и т. д.

1.3. Эффекты, возникающие при лазерной сварке

Существуют различные виды лазерных сварных соединений, они показаны на рис. 1.4. Стыковые соединения и соединения внахлест обычно сваривают при помощи импульсных или непрерывных лазеров. Типичные явления, возникающие при непрерывной и импульсной лазерной сварке, схематично изображены на рис. 1.5. В зависимости от сочетания плотности мощности и длительности воздействия лазерного излучения на материал морфология точечного или валикового сварного шва формируется по типу теплопроводности или парогазового канала. Когда лазерное излучение падает на металлическую пластину, оно взаимодействует со свободными электронами в металле, и те поглощают его. Абсорбция лазерной энергии приводит к повышению энергии свободных электронов, находящихся внутри зоны взаимодействия. И они одновременно с поглощением, сталкиваясь с другими движущимися электронами, узлами кристаллической решетки, ее дефектами, неоднородностями и разными примесями, передают им энергию. В результате при соударениях лазерная энергия переходит в тепловую энергию колебаний решетки, и температура поверхности пластины возрастает. С ростом температуры твердого тела поглощение

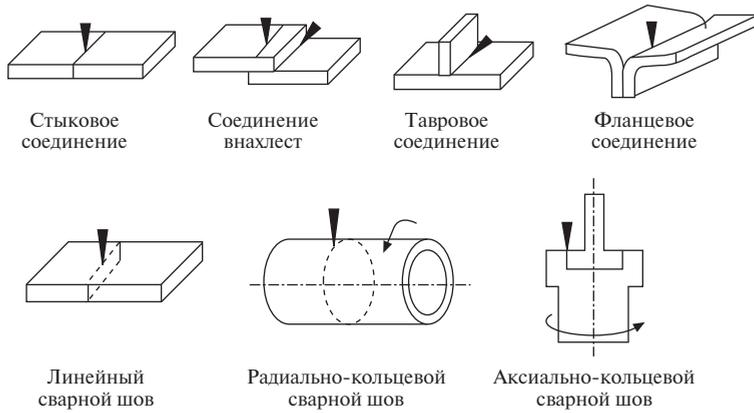


Рис. 1.4. Примеры типовых видов сварных соединений, получаемых с помощью лазерной сварки

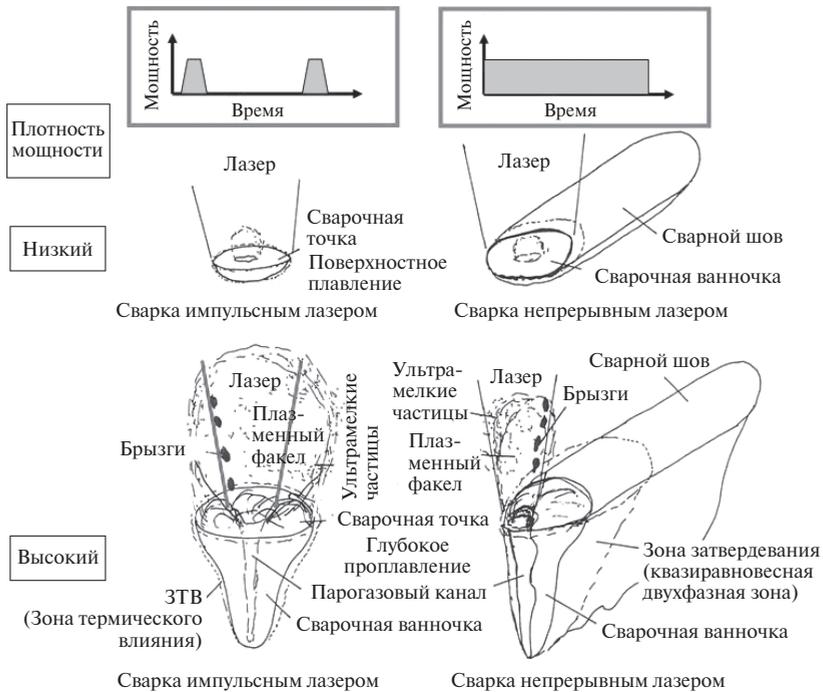


Рис. 1.5. Схема точечной сварки и образования сварного шва при помощи импульсного (PW) и непрерывного (CW) лазерного излучения: показано, как в зависимости от сочетания плотности мощности и длительности воздействия лазерного излучения на материал происходит или поверхностное плавление за счет теплопроводности свариваемого материала (верхний ряд) или глубокое проплавление с образованием парогазового канала (нижний ряд)

лазерного излучения слегка увеличивается, но при достижении температуры плавления абсорбция начинает возрастать и значительно увеличивается, когда температура в облучаемой лазером области достигает точки кипения. С этого момента почти вся лазерная энергия тратится на испарение, а потери на теплопроводность становятся несущественными. Остаточное давление от испарений приводит к образованию каверны или парогазового канала. Коэффициент связи (поглощение) лазерной энергии с металлом схематически показан на рис. 1.6. Он увеличивается в зависимости от температуры и состояния поверхности. Поскольку лазерное поглощение в случае формирования парогазового канала из-за многократных отражений излучения внутри канала чрезвычайно увеличивается, то парогазовый канал при сварке с глубоким проплавлением рассматривается как эффективный процесс соединения.

С началом образования парогазового канала над поверхностью появляется яркий светящийся факел выбрасываемых испаряющихся атомов металлов и частиц конденсированного пара. Разбрызгивание капель расплава иногда происходит из-за попадания сильной струи испарений в парогазовый канал.

Сечения лазерных сварных швов алюминиевого сплава, полученные с помощью лазерной CO_2 -сварки при мощности 5 кВт в среде защитного газа He, N_2 или Ar, представляет рис. 1.7. Глубина проплавления при двух скоростях сварки уменьшается в следующем порядке: He, N_2 , Ar. Примеры снимков, выполненных высокоскоростной видеосъемкой во время лазерной CO_2 -сварки при вышеописанных условиях, показаны на рис. 1.8. Ar плазма и N плазма наблюдаются в соответствующих газах, хотя признаков He плазмы во время сварки не видно. Вполне понятно, что уменьшение глубины проплавления при работе с CO_2 -

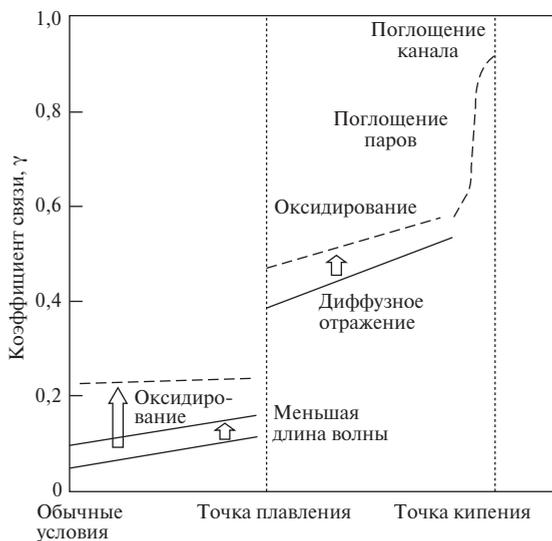


Рис. 1.6. Зависимость коэффициента связи лазерной энергии с металлом от температуры, характерная для стальных или алюминиевых сплавов

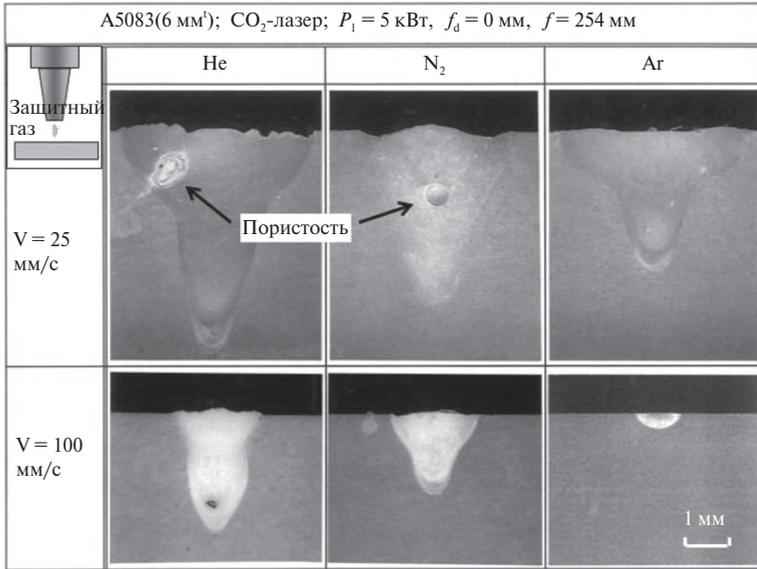


Рис. 1.7. Микрошлифы поперечного сечения сварного шва, выполненного CO₂-лазером при скорости 100 мм/с при разных защитных газах He, N₂ и Ar

лазером, особенно в газах Ar и N₂, связано с их тенденцией к формированию плазмы и стремлением к стабилизации ее объема в пространстве. Чтобы получить глубокое проплавление при сварке высокомошными CO₂-лазерами, требуется использовать газовую смесь с концентрацией He более 50%. Формирование плазменного факела и/или плазмы и их воздействие на глубину проплавления представлены на рис. 1.9. Ar плазма или N плазма легко формируются в случае CO₂-лазерной сварки, в то время как при сварке YAG-, дисковым и волоконным лазером лазерно-индуцированный факел создается только из парогазового канала. С точки зрения механизма поглощения взаимодействие между



Рис. 1.8. Образование плазменного факела и газовой плазмы во время CO₂-лазерной сварки в защитных газах He, N₂ и Ar (снимки получены с помощью высокоскоростной видеосъемки)

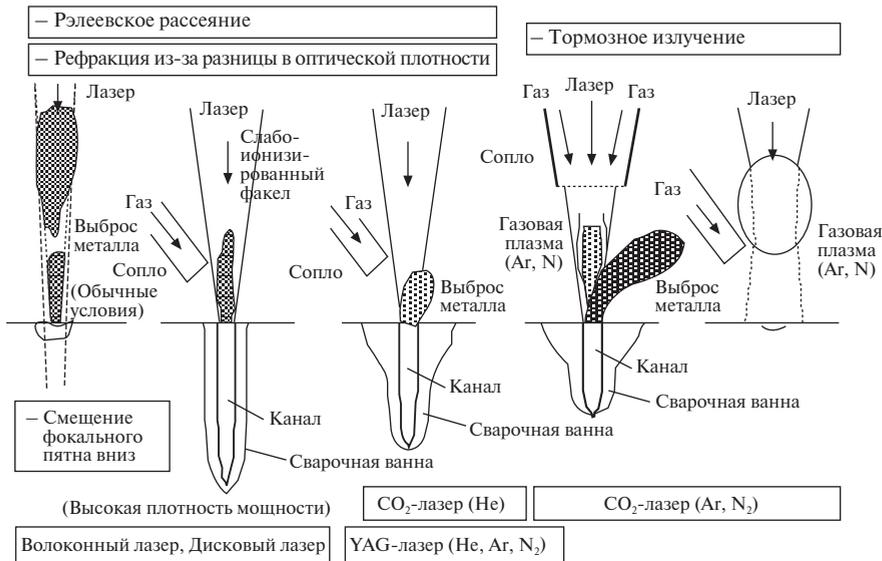


Рис. 1.9. Схема процесса формирования плазмы и образования выбросов при лазерной сварке и их влияние на глубину проплавления (в отсутствии защитного газа или в защитном газе He, N₂ и Ar)

излучением CO₂-лазера и газовой плазмой происходит за счет обратнотормозных электронов, образующихся в поле ионов и нейтральных атомов и влияния плазмы. В случае использования CO₂-лазера действие механизма обратного тормозного поглощения примерно в 100 раз выше, чем у YAG-, дискового или волоконного лазера. Температура плазменного факела во время сварки с длиной волны лазера около 1 мм оценивается около 3000—6000 К в зависимости от величины плотности мощности примерно в 1—1000 кВт/мм². Возникновение данных эффектов относят к рефракции, появляющейся из-за разницы между оптическими плотностями факела и окружающей среды, а также к рэлеевскому рассеянию — из-за образования ультрадисперсных частиц. При высоком плазменном факеле и, как следствие, существовании низкого показателя преломления глубина проплавления значительно уменьшается. И механизм формирования глубины проплавления меняется от типа образования парогазового канала к типу теплопроводности (в фокальном пятне) за счет отражения луча и смещения вниз фокального пятна. При отсутствии высокого факела или области низкого показателя преломления (а именно: толщины области взаимодействия плазменного факела с лазерным лучом) достигается глубокое проплавление.

Поведение расплава в сварочной ванне и у поверхности наблюдают с помощью построения изображений методом рентгеновской литографии и высокоскоростных видеокамер. Соответственно понятно, что глубина проплавления сварного шва определяется, главным образом, глубиной парогазового канала и частично нисходящим потоком расплава вокруг его основания, как показано

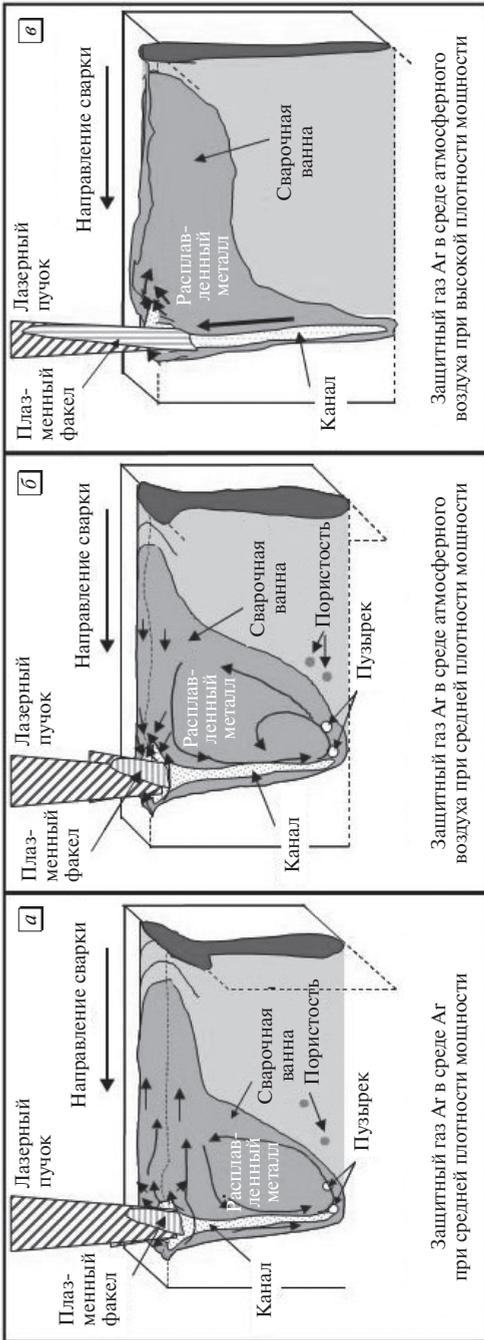


Рис. 1.10. Схематичное представление поведения расплавленного металла в сварочной ванне и геометрия сварного шва и влияние расплавленного металла над (а) или под (б) поверхностью в зависимости от поверхностного натяжения и (в) высокой плотности мощности на глубину проплавления

на рис. 1.10. На поток расплавленного металла у поверхности влияют поверхностное натяжение расплава и сдвиг потока за счет сильной плазменной струи, выбрасываемой из парогазового канала, в результате чего около поверхности происходит формирование типичной формы широкого или узкого сварного шва.

1.4. Глубина проплавления и дефекты сварки

Для соединения мелких деталей применяют точечную сварку импульсным лазером. Сварные швы с глубоким проплавлением формируются при увеличении длительности импульса вблизи фокального пятна, образуемого с помощью системы фокусирующих линз. Тем не менее, максимальная глубина прочной точечной сварки обычно менее 1,5 мм или 3 мм в контролируемых условиях. Потому что в этих условиях легко образуется пористость, особенно в мелких сварных швах при очень кратком времени облучения и в глубоких швах, выполненных с помощью лазерного импульса с прямоугольной формой фронта. Отсюда становится ясно, что, изменяя форму импульса на медленно возрастающую и падающую во времени мощность, можно достичь снижения разбрызгивания и уменьшения пористости. Соответствующие результаты и примеры будут рассмотрены далее в гл. 12. Сварные швы с глубоким проплавлением эффективно формируются при сварке непрерывными лазерами с высокой мощностью. Глубина проплавления сварных швов, получаемых при сварке материалов из нержавеющей стали с помощью волоконного лазера с пучками различных

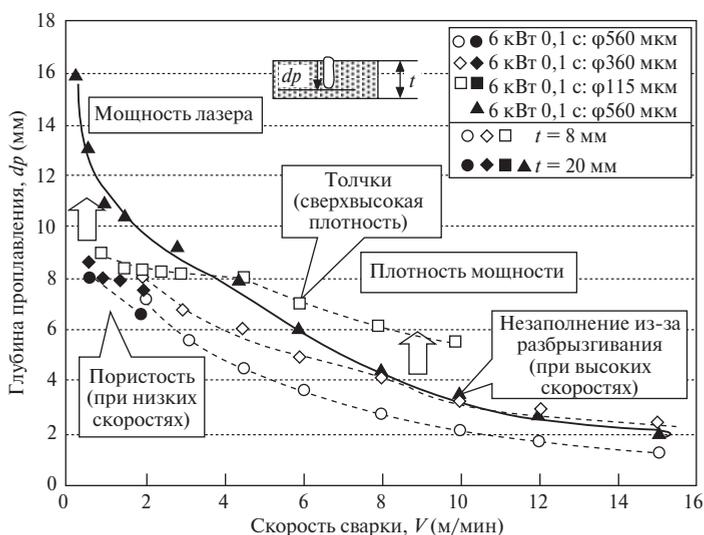


Рис. 1.11. Влияние диаметра пучка (плотности мощности) и скорости сварки на глубину проплавления шва (нержавеющая сталь типа 304, волоконный лазер: мощность 6 кВт и 10 кВт)

диаметров и мощностью 6 кВт и 10 кВт в среде защитного газа Ar, представлена на рис. 1.11. Во время сварки волоконным лазером высокой мощности глубокое проникновение может быть достигнуто даже с защитным газом Ar, хотя в этом случае глубина проплавления уменьшается за счет обратного тормозного поглощения, возникающего из-за образования газовой Ar плазмы, как и в случае применения CO₂-лазерной сварки [3]. Глубина проплавления уменьшается также и с увеличением скорости сварки. Но на высоких скоростях она становится больше, если используется мощный узкий пучок. Становится понятно, что на низких скоростях доминирующим параметром становится мощность лазера. При скорости менее 3 м/мин (50 мм/с) глубина проплавления получается больше при 10 кВт, чем при лазере с мощностью 6 кВт. При низких скоростях сварки легко формируется пористость, в то время как при высоких скоростях пористость предотвращается. Но вспученность или разбрызгивание (в зависимости от меньшего или большего диаметра луча, соответственно) приводит к недостаточному наполнению. При определенных условиях легко образуются дефекты сварки, такие как пористость, трещины, вспученности, недостаточное наполнение и т. д. Эти явления и способы их предотвращения будут описаны в гл. 12.

1.5. Эволюция лазерной сварки

В низком и высоком вакууме могут быть получены прочные швы с чрезвычайно большой глубиной проплавления, как показано на рис. 1.12. Глубина проникновения лазерных сварных швов, полученных при низких скоростях

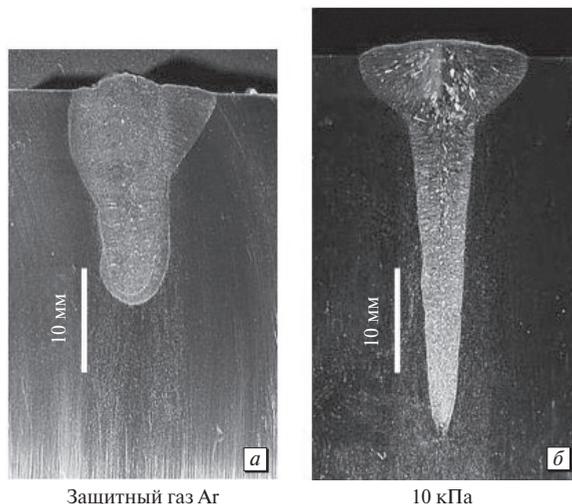


Рис. 1.12. Микрошлифы поперечного сечения шва стали типа 304, выполненного сваркой волоконным лазером мощностью 10 кВт, скорость 0,1 м/мин в защитном газе Ar: 1 атм (а) и низкий вакуум 10 кПа (б)

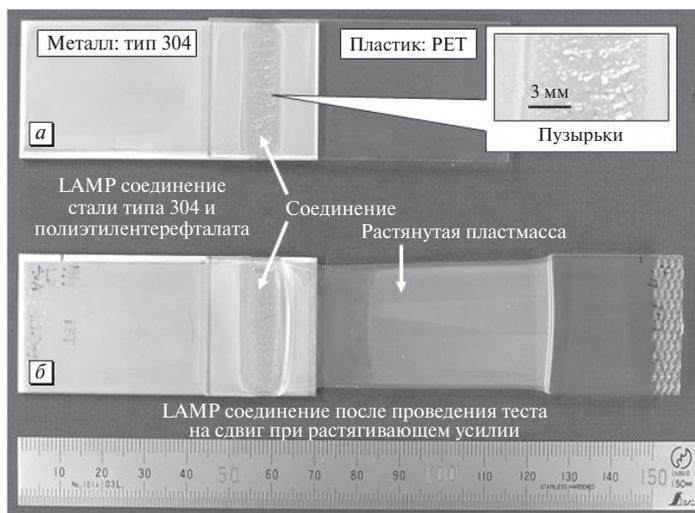


Рис. 1.13. Лазерные соединения внахлест пластины из стали типа 304 толщиной 3 мм и пластины из полиэтилентерефталата толщиной 2 мм до и после проведения теста на сдвиг при растягивающем усилии. Видно, что при сварке в зоне расплавленной пластмассы формируются пузырьки и во время испытания происходит растяжение основного пластика. (LAMP — Laser Assisted Metal and Plastic, технология соединения металла и пластика)

в вакууме (даже при низком вакууме), сопоставима с глубиной швов, полученных электронно-лучевой сваркой [5]. Лазерная сварка может также использоваться при присоединении одного или различных видов пластиков, разнородных металлов, таких как чугун и сталь, сталей и алюминиевых сплавов, или металлов и пластмасс [6]. Недавно было показано, что прочные соединения внахлест можно производить при соединении сталей и легких металлов, таких как алюминиевые или магниевые сплавы, или между металлами, такими как сталь, нержавеющая сталь, алюминиевые сплавы и титановые сплавы, и инженерными пластиками, такими как PA (PolyAmide, *полиамид*), PET (PolyEthylene Terephthalate, *полиэтилентерефталат*) и PC (PolyCarbonate, *поликарбонат*) [6]. Рис. 1.13 [7] показывает лазерное соединение внахлест нержавеющей стали типа 304 и пластиковых листов PET до и после испытания на сдвиг при растяжении. В расплавленной пластмассе в области соединения наблюдается образование мелких пузырьков, также показано удлинение основного пластика PET. На рис. 1.14 [7] представлен снимок поперечного сечения SEM¹ и TEM² рядом с областью соединения при большем увеличении и рентгенограммы

¹ SEM (Scanning Electron Microscopy) — сканирующая электронная микроскопия. — *Прим. пер.*

² TEM (Transmission Electron Microscopy) — трансмиссионная электронная микроскопия. — *Прим. пер.*

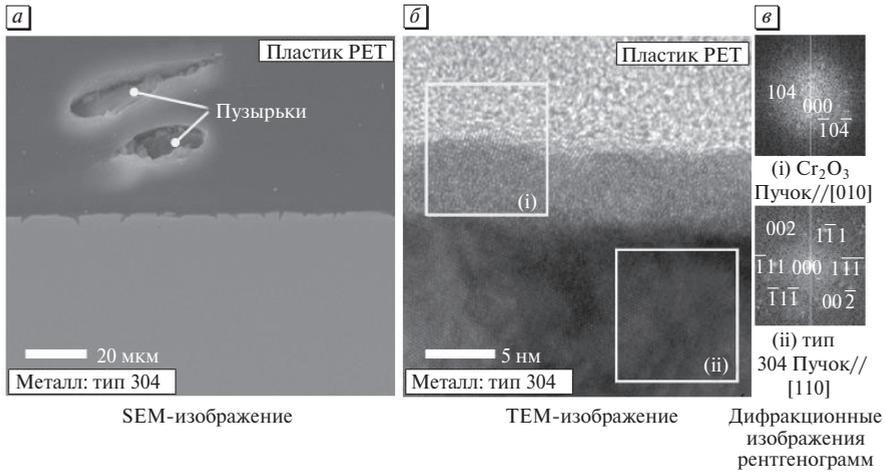


Рис. 1.14. SEM- (а) и TEM- (б) изображения микрошлифов, выполненных около поверхности соединения пластины из стали типа 304 и листа из пластика полиэтилентерефталата, дифракционные изображения рентгенограмм (в) и результаты анализа (серые и черные частицы оксида Cr_2O_3 и стали типа 304 соответственно)

характерных мест. Здесь видна оксидная пленка типа Cr_2O_3 , и следует отметить, что такие оксидные пленки всегда образуются в качестве промежуточного слоя между пластиком и металлом в любых комбинациях. Изображения SEM и TEM ясно показывают образование плотного стыка и то, что лазерное соединение частично осуществляется за счет химического или физического соединения расплавленного пластика с тонкой оксидной пленкой, покрывающей основной металл. Эти результаты подтверждают возможность достижения прочного соединения между металлом и пластиком. Лазерное соединение внахлест без промежуточного слоя металлических и пластиковых листов происходит следующим образом: лазер направляют через прозрачный пластиковый лист или непосредственно прямо на металлическую пластину, а затем пластину нагревают, чтобы расплавить пластмассу в месте соединения. Тогда появятся пузырьки. Некоторое их количество выталкивает расплавленный пластик в поверхностный слой металла. Плотный стык металла и пластмассы выполняется с помощью механизмов химического, физического (силы Ван-дер-Ваальса) и механического (эффект якоря) соединения. Также было успешно получено лазерное соединение металлической пластины с листом GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics; *пластики, армированные стекловолокном*) или CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastics, *углепластик, или иначе — пластики, армированные карбоновым волокном*) [8].

Для получения прочных высококачественных сварных швов требуется контроль процесса. Его можно осуществить с помощью on-line зондирования или адаптивного управления системой во время процесса лазерной сварки [3,4].

Важными индикаторами для контроля являются отраженное лазерного излучения и тепловое излучение, исходящее от лазера и сварочной ванны [9, 10]. Непосредственное наблюдение за ходом лазерной сварки также важно с точки зрения понимания механизмов формирования дефектов. В последнее время большие успехи были достигнуты в этом виде исследований, и разработанные системы контроля затем нашли свое место в практических приложениях.

1.6. Справочная литература

- [1]. Katayama S. (2012), Laser welding, *Ferrum* (Bulletin of the Iron and Steel Institute of Japan), 17(1) 18–29 (in Japanese).
- [2]. Katayama S. (2012), Laser welding of aluminum alloys, *Keikinzoku* (Journal of Japan Institute of Light Metals), 62(2) 75–83 (in Japanese).
- [3]. Katayama S. (2005), New development in laser welding, in *New Developments in Advanced Welding*, ed. by N. Ahmed. Cambridge: Woodhead Publishing pp. 158–197.
- [4]. Katayama S. (2010), Understanding and improving process control in pulsed and continuous wave laser welding, in *Advances in laser materials processing — Technology, research and applications*, eds. by J. Lawrence, J. Pou, D. K. Y. Low. Cambridge: Woodhead Publishing, pp. 181–210.
- [5]. Katayama S., Abe Y., Mizutani M. and Kawahito Y. (2011), Development of deep penetration welding technology with high brightness laser under vacuum, *Physics Procedia*, 12(1) 75–80.
- [6]. Katayama S. (2010), Laser welding of dissimilar materials, *The Review of Laser Engineering*, 38(8) 594–602 (in Japanese).
- [7]. Katayama S. and Kawahito Y. (2008), Laser direct joining of metal and plastic, *Scripta Materialia*, 59(12) 1247–1250.
- [8]. Katayama S., Jung K-W and Kawahito Y. (2010), High power laser cutting of CFRP, and laser direct joining of CFRP to metal, *Proc. of 29th ICALEO 2010*, 103 333–338.
- [9]. Katayama S., Kawaguchi S., Mizutani M., Kawahito Y. and Tarui T. (2008), Welding phenomena and in-process monitoring in high power YAG laser welding of aluminum alloy, *J. of Light Metal Welding & Construction*, 46(10) 480–490 (in Japanese).
- [10]. Kawahito Y. and Katayama S. (2006), In-process monitoring and adaptive control for prevention of through-holes in full-penetration lap welds of aluminum alloy sheets, *Journal of Laser Applications*, 18(2) 93–100.

ГЛАВА 2

РАЗВИТИЕ СО₂-ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

S. Tsukamoto, Национальный институт материаловедения, Япония

DOI: 10,1533 / 9780857098771.1.17

Аннотация. В этой главе описывается лазерная сварка двуокисью углерода (СО₂-лазерная сварка). В первом разделе приведены некоторые типы СО₂-лазеров и отличительные особенности СО₂-лазерной сварки. Также описан процесс лазерной сварки, включая взаимодействие лазерного луча с материалами и газами, формирование парогазового канала, механизм формирования и способы предотвращения дефектов сварки. Даны примеры практического использования СО₂-лазерной сварки.

Ключевые слова: СО₂-лазерная сварка, резонатор, взаимодействие, процесс сварки, применение.

2.1. Введение

С.К.Н. Патель, сотрудник Bell Laboratories, в 1964 году изобрел СО₂-лазер. Он добился превосходных результатов, создав конструкцию СО₂-лазера мощностью до 1 мВт. Позднее усилиями многих других разработчиков и конструкторов мощность и эффективность этого лазера были значительно повышены за счет добавления к активной лазерной среде азота и гелия. В 1966 году компания Coherent выпустила на рынок первый коммерческий СО₂-лазер мощностью 100 Вт. С тех пор работы по усовершенствованию СО₂-лазеров шли непрерывно, и в конце двадцатого века высокомошные лазеры (до 50 кВт) заняли прочные позиции в процессах обработки материалов. Длина волны излучения СО₂-лазера составляет 10,6 мм, она примерно в 10 раз больше длины волны излучения твердотельных лазеров. Следует знать, что длина волны лазерного излучения определяет характеристики лазерной сварки и лазерных модулей, от ее величины зависит характер взаимодействия луча с материалами, защитным газом и плазмой. В данной главе описаны принцип работы и типы СО₂-лазеров, характеристики луча при СО₂-лазерной сварке, взаимодействие СО₂-лазера с материалами, процесс СО₂-лазерной сварки и практическое применение СО₂-лазерной сварки.

2.2. Принцип работы и типы лазеров

В качестве рабочей среды для CO_2 -лазеров используется смесь диоксида углерода, азота и гелия. Чтобы получить лазерный луч с длиной волны 10,6 мм, необходимо ионизировать молекулы газа. Для этого смесь газов возбуждают электрическим разрядом постоянного тока (а — Direct Current, *постоянный ток*) или переменного тока (AC — Alternating Current, *переменный ток*) высокой частоты (RF — Radio Frequency, *радиочастоты*).

Применяют разные системы классификации CO_2 -лазеров, например, по способу отвода тепла и по используемому направлению и скорости прокачки газа. Так как существуют две принципиальные схемы прокачки газа, то CO_2 -лазеры делят на те, в которых используется поперечная прокачка, когда газовый поток проходит поперек оси резонатора (Cross Flow Lasers), и лазеры с продольной прокачкой, когда газовый поток проходит вдоль оси резонатора, то есть — поток аксиальный (Fast Axial Flow). Для поддержания эффективной работы CO_2 -лазеров необходимо выдерживать оптимальную температуру активной среды, не допуская повышения его температуры. В лазерах первого типа, с медленной прокачкой, газ при разряде течет медленно и охлаждается, в основном, через стенки лазерного резонатора (диффузионное охлаждение). Таким образом, на выходе получают стабильный лазерный луч высокого качества. Тем не менее, выходная мощность лазера такой конструкции, как правило, невелика, и для получения в нем излучения высокой мощности потребуются создать очень длинный резонатор. В контуре циркуляции газа имеются теплообменники, проходя сквозь них, нагретый газ охлаждается. В представленной на рис. 2.1 конструкции газовый поток проходит вдоль оси резонатора, в таком лазере можно достичь высокой мощности излучения — до 20 кВт и одновременно на выходе получить луч

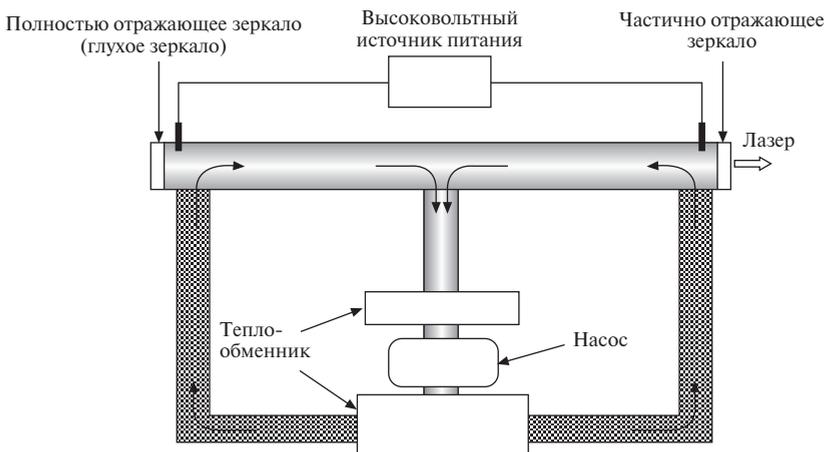


Рис. 2.1. Лазер с наибольшей скоростью потока

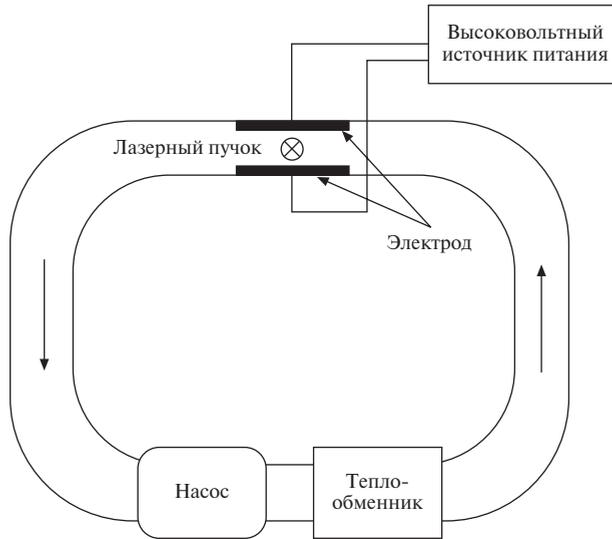


Рис. 2.2. Лазер с поперечной прокачкой

высокого качества. В лазерах с поперечной прокачкой (рис. 2.2) лазерный луч проходит перпендикулярно направлению поля между электродами газоразрядной камеры. В лазерах такого типа можно достичь еще большей мощности излучения, хотя качество луча будет уступать качеству, получаемому в лазерах с высокой скоростью потока. В лазерах с быстрой прокачкой газа охлаждение идет за счет замены нагретых объемов газа (конвективное охлаждение). Но из-за использования компрессора в качестве насоса для создания циркуляции объемный расход газа в такой конструкции увеличивается. Существуют промышленные лазеры мощностью до 50 кВт. Слэб-лазеры (slab lasers) классифицируются как лазеры с медленным потоком. Их называют щелевыми, так как активная среда возбуждается в узком пространстве между двумя широкими водоохла-

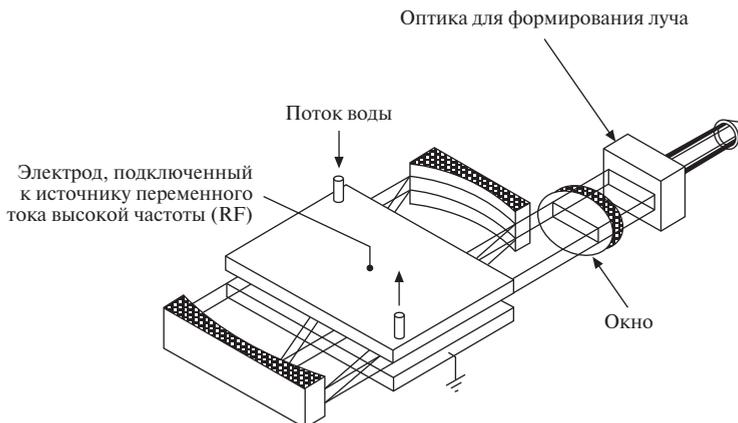


Рис. 2.3. Слэб-лазер с высокочастотной накачкой (Davis J., 2001)

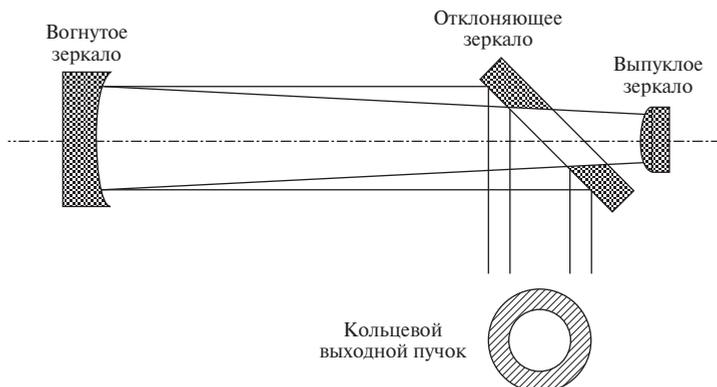


Рис. 2.4. Схема нестабильного резонатора

даемыми электродами (рис. 2.3). Обширная зона разряда и отвод тепла через широкие электроды обеспечивают высокую мощность и высокое качество лазерного луча. Существуют мощные лазеры до 8 кВт с качеством луча $M^2 = 1,05$.

Лазеры с относительно низкой мощностью до 6 кВт имеют устойчивые резонаторы, их выходное зеркало частично пропускает ИК-излучение до 10,6 мм. С другой стороны, высокомошные лазеры построены по схеме с неустойчивым резонатором (рис. 2.4), чтобы избежать искажений и повреждений поверхности зеркал. Неустойчивый резонатор состоит из вогнутых и выпуклых зеркал и отклоняющего, или иначе, поворотного зеркала. В поворотном зеркале, расположенном перед выпуклым зеркалом, выполнено отверстие для многократного прохождения внутри резонатора центральной части пучка. Таким образом,

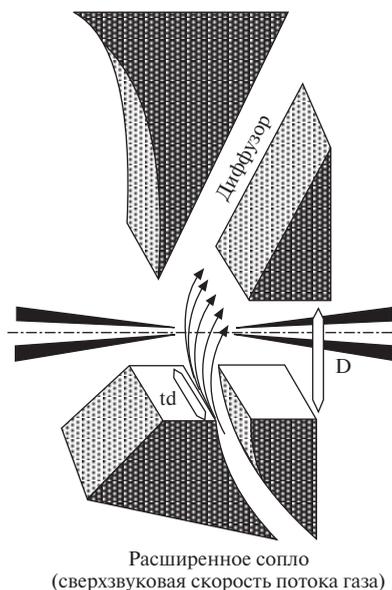


Рис. 2.5. Аэродинамическое окно (источник: TRUMPF Group)

поворотное зеркало отражает на выход лишь внешнюю кольцевую зону пучка, поэтому выходное излучение имеет кольцеобразное сечение. В качестве материала выходных окон, как правило, используют селенид цинка (ZnSe). Чтобы избежать теплового искажения и повреждения окна из ZnSe , в конструкции CO_2 -лазеров мощностью более 10 кВт используют аэродинамическое окно (рис. 2.5): быстрый поток сухого воздуха изолирует лазерный газ в резонаторе от атмосферного воздуха.

2.3. Характеристики пучков CO_2 -лазера

Длина волны излучения CO_2 -лазера составляет 10,6 мм, что в десять раз больше длины волны излучения твердотельных лазеров. Эффективность электрооптического преобразования луча 8–15%, это выше эффективности Nd:YAG -лазеров стержневого типа, но ниже эффективности диодных, волоконных и дисковых лазеров. Основные преимущества CO_2 -лазерных систем по сравнению с другими лазерными системами:

- легкий переход к большим мощностям;
- высокое качество луча;
- относительно низкая стоимость;
- относительная стабильность сварки.

Основные недостатки:

- непрозрачность для излучения CO_2 -лазера материалов, имеющих прозрачность в видимом диапазоне спектра (поэтому для изготовления оптических компонент для CO_2 -лазера необходимы специфические дорогостоящие материалы);
- нельзя использовать оптические волокна для доставки излучения к рабочей зоне обработки материала;
- высокая отражательная способность металлов мешает их обработке излучением CO_2 -лазера;
- высокий уровень поглощения лазерной энергии в лазерно-индуцированной плазме.

Развитие лазерных устройств с высокой выходной мощностью началось с создания CO_2 -лазеров, поскольку наращивать их выходную мощность оказалось не такой сложной инженерной задачей. А в конце XX века уже появились 50 кВт-ные промышленные лазеры. Кроме того, оказалось, что при высоких мощностях можно получать лазерный луч высокого качества. Рис. 2.6 иллюстрирует соотношения между значением параметром пучка ВРР (которое получается как произведение угла расходимости луча и радиуса луча и определяет качество луча) и мощностью луча для разных типов лазеров. Чем ниже значение ВРР, тем выше качество луча. Глядя на рисунок, читатель поймет, что в диапа-

зоне низких выходных мощностей (менее 10 Вт), если сравнить Nd:YAG-лазеры стержневого типа с ламповой и диодной накачкой с CO₂-лазерами, параметр BPP у первых ниже в десять раз, чем у CO₂-лазера.

Это можно объяснить, используя соотношение (2.1) для определения минимального диаметра лазерного пучка, образуемого им в фокальной плоскости оптической системы, формирующей пучок. Дело в том, что в сечении лазерный луч, выходящий из резонатора, имеет плотность мощности, подчиняющуюся распределению Гаусса, потому такие лазерные пучки называют гауссовыми пучками. Характер распределения плотности при распространении пучков в пространстве не меняется, но изменяется их масштаб, который зависит от диаметра сечения пучка. Диаметр гауссова пучка d [мм] пропорционален длине волны излучения λ [мм], что можно выразить следующим уравнением:

$$d = 4\lambda f / \pi D, \quad (2.1)$$

где f (мм) — фокусное расстояние и D (мм) — диаметр пучка на линзе, преобразующей гауссовый пучок.

Лазерная сварка обычно выполняется при помощи лазера многокиловаттного класса мощности. В этом диапазоне высокой мощности в Nd:YAG-лазерах стержневого типа с ростом выходной мощности параметр BPP значительно возрастает из-за появления тепловых искажений в цилиндрическом теле твердотельной рабочей среды лазера. С другой стороны, CO₂-лазеры могут поддерживать высокое качество луча даже при высоком диапазоне мощности.

У дисковых и волоконных лазеров значения параметра BPP почти одинаковы. Не надо забывать и то преимущество CO₂-лазера, что системы на его основе имеют относительно низкую стоимость в расчете на единицу мощности.

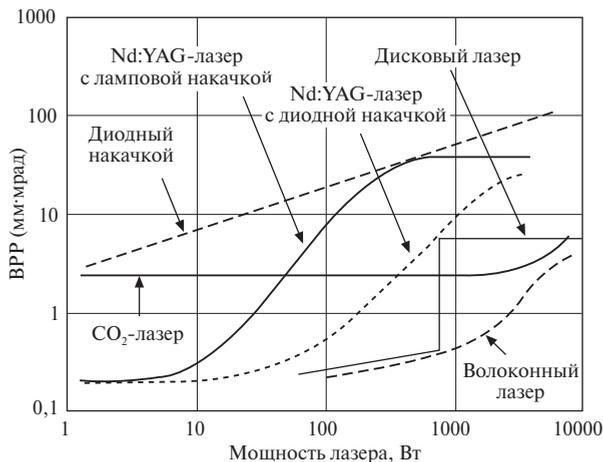


Рис. 2.6. Зависимость параметра качества луча BPP лазеров от их выходной мощности (Katayama S., 2009)

При работе с тяжелыми профилями CO_2 -лазерная сварка сравнительно более стабильна по сравнению с дисковой и волоконно-лазерной сваркой. Большинство недостатков лазерной сварки в среде CO_2 обусловлены большой длиной волны (10,6 мм) его излучения. Прозрачные в видимом диапазоне спектра стекло и кварц оказываются непрозрачными для лазерного излучения с длиной волны 10,6 мм. Оказывается, что такие оптические системы транспортировки излучения в рабочую зону сварки, как кварцевые волокна, в этом случае использовать нельзя. И лазерный луч должен быть доставлен в рабочую станцию при помощи зеркальных отражателей. Поэтому необходимость точной юстировки луча для практических целей ограничивает гибкость такой лазерной сварки. И это — самый большой недостаток CO_2 -лазерной сварки. Кроме того, для изготовления оптических компонентов (защитные стекла и линзы) должны быть использованы специальные дорогостоящие материалы, такие как селенид цинка (ZnSe).

2.4. Взаимодействие лазера с материалами

2.4.1. Поглощение лазерной энергии поверхностью материалов

Когда лазерный пучок попадает на материал, часть его энергии отражается от поверхности материала. Количество отраженного излучения зависит от вида материалов, состояния и температуры его поверхности и длины волны лазерного излучения. Соответственно от этих величин зависит и поглощение лазерного излучения.

В табл. 2.1 приведены значения поглощения некоторых материалов при комнатной температуре в трех диапазонах длин волн, соответствующих излучению: CO_2 -лазера (10,6 мм), Nd:YAG-лазера (1,06 мм) и лазера, работающего на коротких длинах волн (300—600 нм) (Modest, 2001). В целом заметна тенденция к снижению поглощения материалами излучения с уменьшением его длины волны. Только небольшое количество энергии CO_2 -лазера поглощается на поверхности металла. И наоборот, лучи CO_2 -лазера значительно поглощаются большинством керамических поверхностей. Обычно с ростом температуры поверхности поглощение излучения увеличивается. Во время лазерной сварки образование ванны расплавленного металла усиливает поглощение энергии падающего лазерного излучения. В режиме лазерной сварки с образованием парогазового канала, многократное отражение лазерного луча от стенок узкого и глубокого канала значительно усиливает эффективность передачи энергии материалу за счет многократного поглощения. Таким образом, коэффициент поглощения не так уж сильно влияет на геометрию сварного шва при условии, что парогазовый канал все же формируется.

2.4.2. Поглощение лазерной энергии в лазерно-индуцированной плазме

Поглощение падающей на поверхность лазерной энергии обратным тормозным излучением.

Во время CO_2 -лазерной сварки лазерный пучок высокой мощности, попадая на поверхность материала, вызывает его интенсивное испарение. Далее лазерный пучок взаимодействует с испаряющимся материалом и лазерным факелом или лазерной плазмой, которая образуется непосредственно над парогазовым каналом и внутри него. Падающая лазерная энергия I_0 частично поглощается в плазме обратным тормозным излучением, и это ослабляет падающую лазерную энергию. Поэтому сквозь объем плазмы длиной x (м), обладающей коэффициентом поглощения $\alpha(\text{м}^{-1})$, пройдет часть лазерной энергии $I(\text{Вт})$:

$$I = I_0 \exp(-\alpha x). \quad (2.2)$$

Для энергии горячей плазмы (характеризуется тем, что энергия электронов во много раз выше энергии падающих фотонов ($h\omega/\pi \ll kT_e$)), коэффициент поглощения излучения $\alpha(\text{м}^{-1})$ определяется соотношением (дается по Hughes, 1975; Allmen and Blatter, 1995):

$$\alpha = \frac{n_i n_e Z^2 e^6 \lambda^2 \ln(2,25kT_e \lambda/hc)}{24\pi^3 \epsilon_0^3 c^3 m_e k T_e \sqrt{2\pi m_e k T_e}}, \quad (2.3)$$

где ω — угловая частота; n_e и n_i — плотность электронов и ионов (м^{-3}), соответственно, Z — показатель заряда иона, e — заряд электрона (Кл), k — постоянная Больцмана (Дж/К), T_e — температура электронов (К), h — постоянная Планка (Дж·с), c — скорость света (м/с), ϵ_0 — диэлектрическая постоянная (Кл/(В·м)), и m_e — масса электрона [кг]. Из уравнения (2.3) можно видеть, что коэффициент поглощения α прямо пропорционален квадрату длины волны λ . Таким образом, затухание лазерной энергии проявляется в большей степени при CO_2 -лазерной сварке ($\lambda = 10,6$ мкм), чем при сварке твердотельным лазером ($\lambda = 1,06$ мкм), и, соответственно, влияет на геометрию сварного шва. Если предположить, что плазма находится в локальном термодинамическом равновесии (LTE — Local Thermodynamic Equilibrium), и принять $Z = 1$, то коэффициент поглощения α для луча CO_2 -лазера определяется по формуле:

$$\alpha = 1,22 \cdot 10^{39} \frac{n_e^2}{T_e^{2/3}} \ln(1,655 \cdot 10^{-3} T_e). \quad (2.4)$$

Уравнение (2.4) показывает, что более высокий коэффициент поглощения получается для более высокой степени ионизации (более высокая плотность электронов n_e) при снижении температуры электронов T_e . Тенденция к ионизации определяется потенциалом ионизации. Атомы легче ионизируются с умень-

Таблица 2.1. Поглощающая способность некоторых материалов в трех диапазонах длин волн при комнатной температуре (Modest, 2001)

Материал	300—600 нм	1,06 мкм	10,6 мкм
Алюминий			
полированный,		0,06—0,02	0,03—0,06
неполированный		0,2—0,4	0,1—0,4
Медь			
полированная,	0,05	0,04	0,01—0,03
неполированная,	0,05	0,1—0,3	0,05—0,10
окисленная	0,85	0,5	
Золото		0,02—0,04	0,01—0,02
Железо полированное	0,37—0,40	0,25—0,32	0,12
Молибден полированный	0,4—0,5	0,25—0,35	0,05—0,15
Никель	0,5	0,15—0,35	0,05—0,15
Платина		0,25—0,30	0,03—0,08
Серебро		0,03	0,02—0,10
Вольфрам	0,5	0,35	0,03—0,3
Углерод (графит)	0,75	0,8—0,9	0,7—0,9
Алюминий (Al ₂ O ₃)	0,75	0,05—0,1	0,9—0,99
Оксид магния		0,2	0,93—0,98
Диоксид кремния (SiO ₂)	Прозрачный	Прозрачный	0,9
Диоксид циркония (ZrO ₂)		0,1—0,2	0,85—0,98
Карбид кремния (SiC)	0,8—0,9	0,85—0,95	0,8—0,9
Нитрид кремния (Si ₃ N ₄)	0,6—0,7	0,6—0,8	0,9

пением потенциала ионизации элемента. В табл. 2.2 приведены значения потенциалов ионизации некоторых химических элементов. Из инертных газов самый высокий потенциал ионизации имеет гелий, он не ионизируется даже при сварке CO₂-лазером высокой мощности. Именно по этой причине гелий иногда используют в качестве защитного газа при сварке высокомоощным CO₂-инструментом. Применение гелия способствует предотвращению ослабления падающего лазерного излучения абсорбцией в плазме. Потенциал ионизации металлов приблизительно равен половине величины потенциала ионизации аргона; металлы ионизируются легче, чем инертные газы. На рис. 2.7 показано изменение состава плазмы Ag-50 об.% Fe при различных температурах. Железо начинает ионизироваться раньше, чем аргон, то есть при более низкой температуре. И в связи с низким потенциалом ионизации уже на уровне температуры около 10000 К плотность ионов железа достигает своего максимального значения. А концентрация ионов аргона достигает своего максимального пика лишь в момент, когда температура достигнет более высокого значения около 17000 К.

Таблица 2.2. Потенциал ионизации некоторых элементов

Элемент	H	He	Ar	N	O	Al	Ti	Fe	Ni	Cu
Потенциал ионизации (В)	13,60	24,59	15,76	14,53	13,62	5,98	6,82	7,87	7,64	7,73

На рис. 2.8 представлена зависимость коэффициента поглощения излучения аргоновой плазмы от температуры. Наибольшего значения коэффициент поглощения достигает приблизительно при 17000 К, так как плотность ионов и электронов аргона при этой температуре максимальна. При CO_2 -лазерной сварке малой мощности из-за низкой температуры плазмы происходит ионизация только металлов, но не защитного газа. Защитный газ ионизируется лишь при лазерной сварке высокой мощности. На рис. 2.9, *a* показана лазерно-индуцированная плазма, образовавшаяся в результате 5 кВт CO_2 -лазерной сварки с коаксиальным экранированием Ar. Монохроматические изображения некоторых линий спектра, таких как атом аргона (Ar I: 696,5 нм), ион аргона (Ar II: 480,7 нм) и атом железа (Fe I: 381,5 нм), представлены на рис. 2.9, *b–z* (Tsukamoto et al., 1999). Ион аргона отчетливо наблюдается в центре объема плазмы, где идет непосредственное взаимодействие лазерного пучка с плазмой (рис. 2.9, *o*), он окружен атомами аргона (рис. 2.9, *b*). Таким образом, при CO_2 -лазерной сварке с высокой мощностью газ в плазме, как правило, формируется в пространственной области, расположенной над заготовкой. С другой стороны, металлическая плазма образуется в основном внутри парогазового канала и непосредственно над ним (см. рис. 2.9, *z*).

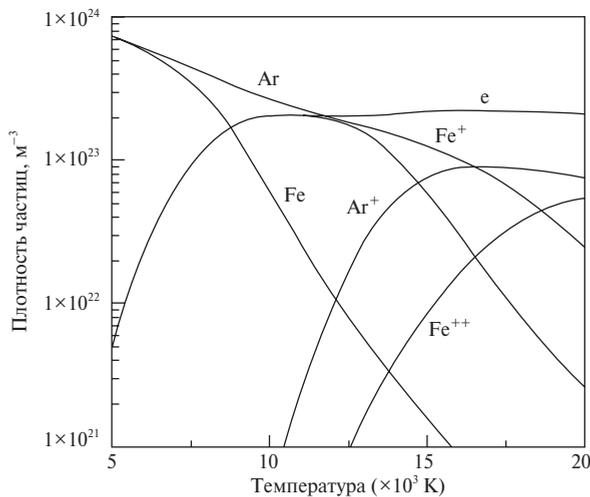


Рис. 2.7. Изменение химического состава плазмы Ar-50 об.% Fe в зависимости от температуры

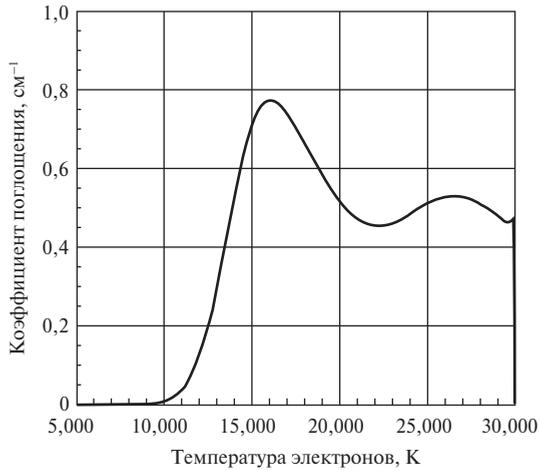


Рис. 2.8. Коэффициент поглощения Аг плазмы

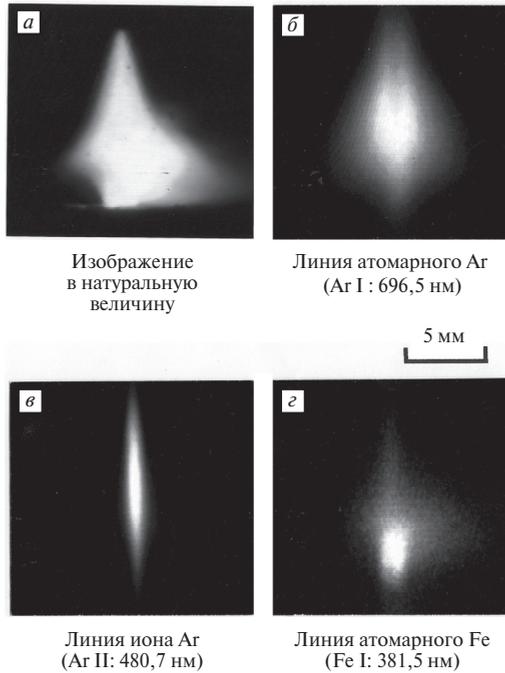


Рис. 2.9. Лазерно-индуцированная плазма, образовавшаяся во время CO_2 -лазерной сварки (5 кВт, $f_d = -2$ мм, защитный газ Аг: 40 л/мин, монохромные фотографии): а — обычное изображение, б — изображение атома аргона (Ag I: 696,5 нм), в — изображение иона аргона (Ag II: 480,7 нм), г — изображение атома железа (Fe I: 381,5 нм)

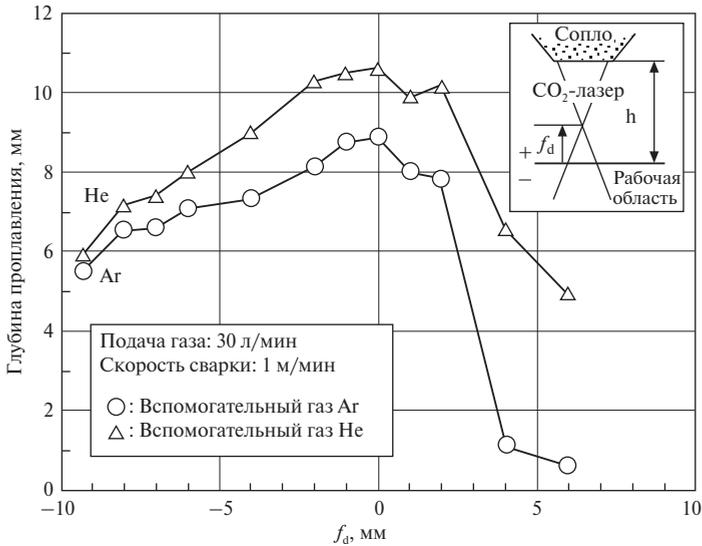


Рис. 2.10. Влияние защитного газа на глубину проплавления при CO_2 -лазерной сварке (сталь C-Si-Mn)

Образование плазмы существенно влияет на процесс формирования геометрии сварного шва. Рис. 2.10 демонстрирует глубину проплавления, получаемую с использованием различных защитных газов при 5,4 кВт CO_2 -лазерной сварке. Глубина проплавления всегда меньше в среде защитного газа аргона. Это вызвано ослаблением падающего лазерного излучения в плазме аргона, в то время как гелий не ионизируется в процессе сварки благодаря обладанию высоким потенциалом ионизации. На рис. 2.11 видна глубина проплавления при 20 кВт-ной CO_2 -лазерной сварке с гелием в качестве защитного газа (глубина меняется в зависимости от скорости сварки). Со снижением скорости сварки глубина проплавления увеличивается, но при скорости ниже 50 см/мин этот

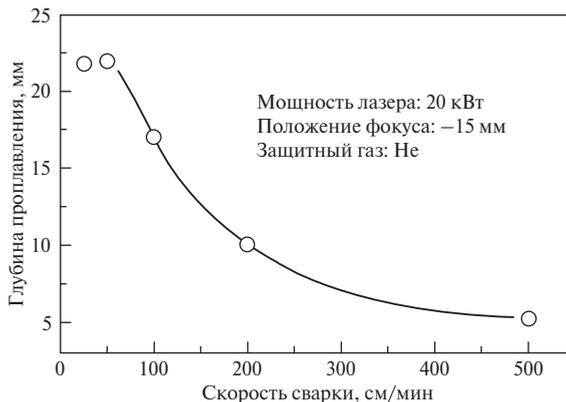


Рис. 2.11. Глубина проплавления в зависимости от скорости лазерной сварки в среде CO_2 (сталь C-Si-Mn)

эффект достигает насыщения. Такая зависимость отсутствует при сварке материалов твердотельным лазером. Рост глубины проникновения при лазерной сварке в среде CO₂ приписывают ослаблению лазерной энергии металлической плазмой, образующейся внутри парогазового канала.

Диагностика плазмы

Из формулы (2.4) видно, что коэффициент поглощения в плазме зависит от электронной плотности n_e и температуры электронов T_e . n_e определяется температурой T_e с учетом LTE. Поэтому было проведено много научно-исследовательских работ, направленных на измерение T_e во время CO₂-лазерной сварки методами спектроскопии (Rockstroh and Mazumder, 1987; Mazumder et al., 1987; Sokolowski et al., 1988, 1989; Poueyo et al., 1992; Miyamoto and Maruo, 1992; Verwaerde and Fabbro, 1995; Tsukamoto et al., 1996). Интенсивность термически возбужденной спектральной линии ϵ_{nm} определяется по формуле:

$$\epsilon_{nm} = \frac{hcA_{nm}n_0g_n}{4\pi\lambda Z(T)} \exp(-E_n/kT_e) \quad (2.5)$$

где A_{nm} — вероятность перехода линии (с⁻¹) Эйнштейна, n_0 — плотность атома или иона (м⁻³), g_n — статистический вес n , $Z(T)$ — функция распределения, E_n — уровень энергии (Дж). Из уравнения (2.5) T_e может быть определено путем измерения абсолютного значения спектральной интенсивности ϵ_{nm} с учетом LTE. Это называется методом абсолютной спектральной интенсивности. T_e также может быть определена как отношение спектральных интенсивностей ϵ_{nm} одного химического элемента в различных спектральных линиях. Это называется «метод относительной интенсивности». В этом случае учитывать LTE не обязательно. Из уравнения (2.5)

$$\frac{\epsilon_{nm}\lambda}{A_{nm}g_n} = K \exp(-E_n/kT_e), \quad (2.6)$$

$$\ln\left(\frac{\epsilon_{nm}\lambda}{A_{nm}g_n}\right) = -\frac{1}{kT_e} E_n + \ln K, \quad (2.7)$$

где K является константой. Если мы измерим спектральные интенсивности некоего химического элемента, расположенные в различных спектральных участках $\ln(\epsilon_{nm}\lambda/A_{nm}g_n)$ в зависимости от энергии E_n , то можем вычислить T_e из разницы температур электронов. Это называется «метод Больцмана» и часто используется для определения температуры электронов в плазме. Рис. 2.12 показывает температурный профиль плазмы, сформированной в процессе CO₂-лазерной сварки мощностью 5 кВт с аргоном в качестве защитного газа, вытекающим из коаксиального сопла со скоростью 30 л/мин (Tsukamoto et al., 1999). Точка фокуса находится на поверхности образца. Пиковая температура около

22000 К соответствует центру плазменного объема; это область обогащена ионами аргона (рис. 2.9, в), что получилось из-за непосредственного взаимодействия лазерного пучка с плазмой. Значение этой температуры приближено к пиковой температуре аргона, соответствующей условиям дуговой сварки в среде инертного газа. Если мы знаем распределение температуры электронов по объему плазмы (см. рис. 2.12), то можем вычислить плотность электронов в любой части плазмы с учетом LTE и коэффициента поглощения, используя формулу (2.4). В результате мы сумеем оценить степень поглощения плазмой излучения при

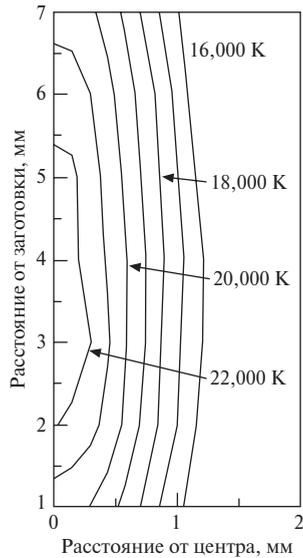


Рис. 2.12. Температурный профиль аргоновой плазмы, сформированной над заготовкой во время CO_2 -лазерной сварки (5 кВт, $f_d = 0$ мм, защитный газ Ar: 30 л/мин)

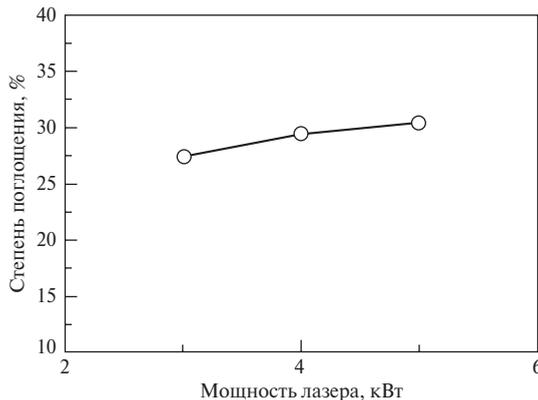


Рис. 2.13. Влияние мощности лазера на степень поглощения плазмой его излучения

различных режимах сварки. На рис. 2.13—2.15 показана степень поглощения, соответствующая различным условиям сварки (Tsukamoto et al., 1999). С увеличением мощности лазера степень поглощения излучения плазмой постепенно возрастает (см. рис. 2.13). Расход защитного газа не оказывает сильного влияния на поглощательную способность плазмы. Если скорость потока возрастает с 20 до 60 л/мин, то температура, при которой наблюдается максимальная плотность ионов и электронов в плазме, немного снижается с 22000 до 20000 К (см. рис. 2.14, а).

В этом температурном диапазоне величина коэффициента поглощения уменьшается вместе со снижением температуры (см. рис. 2.8). Но и размер объема плазмы также уменьшается с возрастанием скорости подачи потока защитного газа (см. рис. 2.14, б). В результате коэффициент поглощения имеет приблизительно постоянное значение в широком диапазоне скоростей потока.

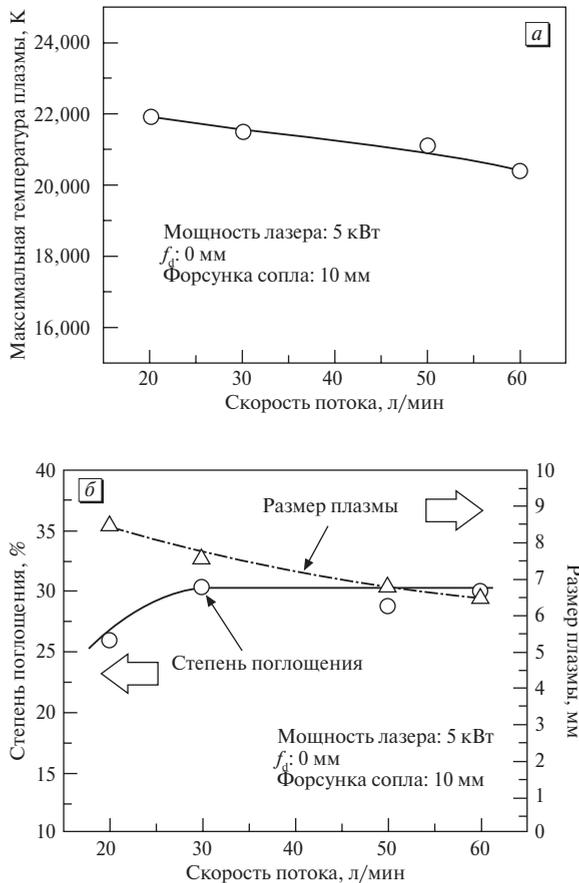


Рис. 2.14. Максимальная температура плазмы, размер плазмы и степень поглощения для различной скорости потока защитного аргона: а — максимальная температура плазмы, б — размер и способность поглощения плазмы

Степень поглощения наиболее существенно зависит от состояния фокусировки луча. Расстояние дефокусировки f_d не сильно влияет на максимальный уровень температуры, как показано на рис. 2.15, *а*. С другой стороны, способность к поглощению, значительно увеличивается с перемещением фокусной точки вверх от поверхности материала к области выше обрабатываемого образца, как показано на рис. 2.15, *б*. Это вызвано расширением плазмы и дефокусировкой f_d . Размер объема плазмы возрастает с увеличением плотности мощности излучения вблизи области формирования плазмы. Эффективным способом борьбы с ослаблением падающего лазерного излучения плазмой является создание потока инертного газа, обладающего высоким потенциалом ионизации. Гелий или смесь гелия с аргоном обычно используется в качестве защитного газа при CO_2 -лазерной сварке с высокой мощностью. Среди параметров режима сварки

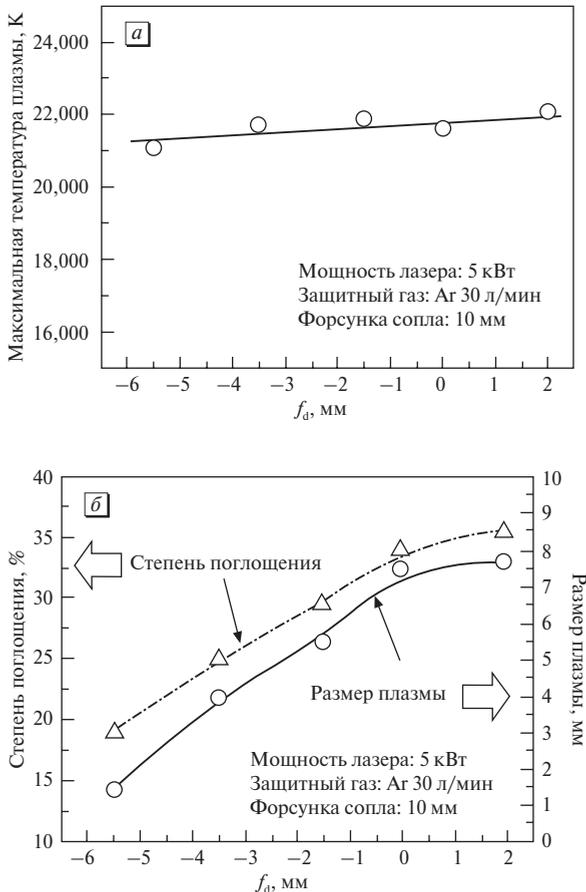


Рис. 2.15. Максимальная температура плазмы, размер плазмы и степень поглощения при различных расстояниях расфокусировки f_d : *а* — максимальная температура плазмы, *б* — размер и способность поглощения плазмы

состояние фокусировки луча является наиболее значимым. Для предотвращения поглощения плазмы плотность мощности чуть выше поверхности образца должна быть уменьшена путем выбора отрицательного расстояния дефокусировки.

Мониторинг плазмы

Плазма генерируется и поддерживается испарением материалов и поглощением энергии лазерного излучения обратным тормозным излучением. Таким образом, излучение плазмы дает много информации о процессе сварки и иногда используется для контроля условий сварки, процесса сварки и образовании дефектов. На рис. 2.16, а, б представлен типичный пример операционного контроля глубины проникновения с помощью подачи импульса в плазму (Mogi and Miyamoto, 1997).

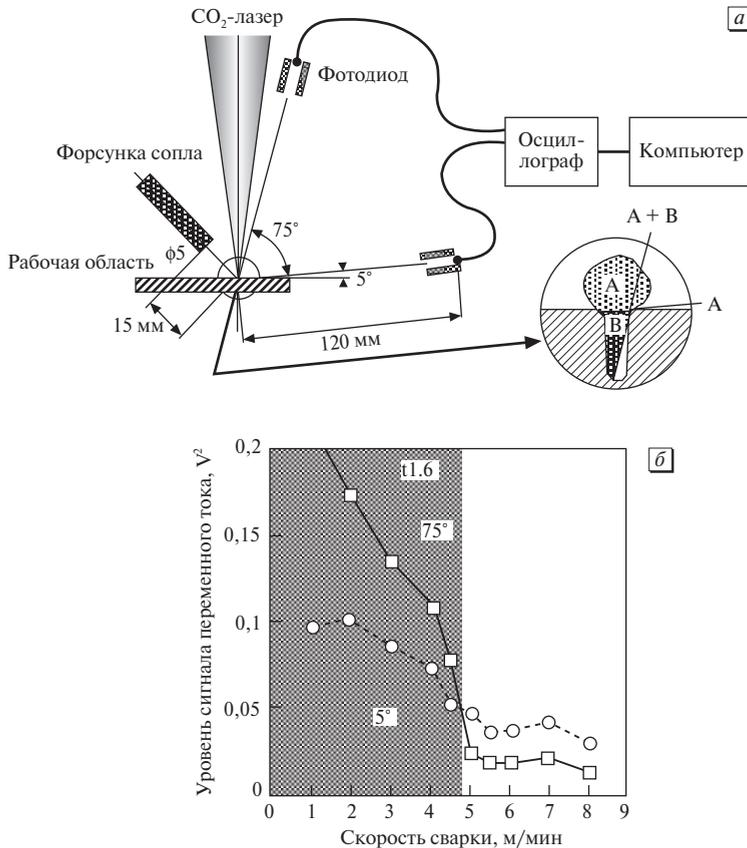


Рис. 2.16. Операционный мониторинг глубины проникновения с помощью регистрации импульсов в плазме (Mogi and Miyamoto, 1997): а — схематичное изображение экспериментальной модели, б — среднее квадратичное значение импульса плазмы в зависимости от скорости сварки (толщина пластины: 1,6 мм)

СО₂-лазерная сварка с частичным и полным проплавлением проводилась на мягких сталях толщиной 1,6 и 4 мм. Излучение плазмы регистрировалось двумя фотодиодами, расположенными под разными углами: 75° и 5° (рис. 2.16, а). Фотодиод, расположенный под углом 5°, предназначен для регистрации излучения только вблизи поверхности плазмы (А на рис. 2.16, а). В то же время фотодиод, находящийся под углом 75°, регистрирует излучение плазмы парогазового канала и приповерхностной плазмы (А + В на рис. 2.16, а). Импульсы возникают в плазме с частотой 2—4 кГц в зависимости от скорости сварки, и на рис. 2.16, б показаны среднеквадратичные значения интенсивности плазменных импульсов, регистрируемых в указанном частотном диапазоне. Заштрихованная область на графике соответствует условиям возникновения полного проплавления. Ясно, что сварку с полным или частичным проплавлением можно различить между собой по сигналу с фотодиода, расположенного под углом 75°. Среднеквадратичное значение интенсивности импульса плазмы значительно выше при полном проплавлении, чем при частичном проплавлении.

2.5. Процесс сварки и образование дефектов

2.5.1. Баланс давлений на стенки парогазового канала

В режиме лазерной сварки с образованием парогазового канала из-за испарения материалов образуется узкий и глубокий канал. Лазерная энергия может передаваться в материал через парогазовый канал, это создает условия для узкого и глубокого проплавления. Тем не менее, парогазовый канал в основном неустойчив, если его длина превышает его окружность ($l > 2\pi r$, где l — глубина канала, r — радиус канала). Парогазовый канал, как правило, закрывается в некоторых интервалах вдоль линии проплавления. Это явление называется неустойчивостью Рэля (Rayleigh, 1945; Chandrasekhar, 1961). Когда канал закрывается из-за неустойчивости, лазерный луч начинает взаимодействовать с расплавленным металлом, закрывшим часть канала, и вновь открывает канал под высоким давлением отдачи, как показано на рис. 2.17. Таким образом, парогазовый канал колеблется в радиальном направлении, пока оно существует и поддерживается во время лазерной сварки с глубоким проплавлением, это иногда вызывает дефекты сварки. Статически парогазовый канал поддерживается за счет баланса давлений, действующих на стенки канала.

$$P_{abl} + \delta P_g = P_\sigma + P_h, \quad (2.8)$$

где P_{abl} — давление отдачи (Н/м²), δP_g — избыточное давление пара ($\delta P_g = P_v - P_0$, P_v — давление паров, P_0 — атмосферное давление) (Н/м²), P_σ — давление поверх-

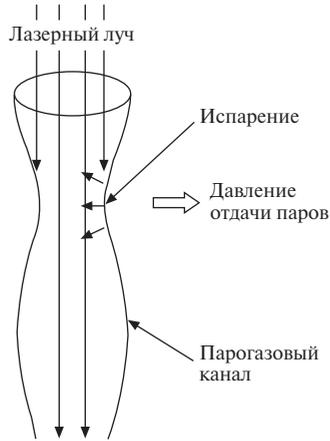


Рис. 2.17. Особенности формирования парогазового канала во время лазерной сварки. Закрытие канала из-за неустойчивости Рэлея предотвращается прямым облучением лазера

ностного натяжения ($P_\sigma = \sigma/r$, σ — поверхностное натяжение (Н/м), r — радиус парогазового канала (м)) (Н/м^2) и P_h — гидростатическое давление (Н/м^2).

Давление на левую боковую стенку открывает канал, а на правую — закрывают его. Во время сварки эти давления на стенки канала уравниваются. При CO_2 -лазерной сварке пары металла частично ионизируются и образуют плазму внутри канала. В этом случае температура образовавшейся плазмы выше, чем при сварке твердотельным лазером из-за высокого коэффициента поглощения излучения CO_2 -лазера. Плазма высокой температуры, образующаяся внутри канала, может увеличить δP_g и при CO_2 -лазерной сварке радиус канала может расти. Возможно, это является одной из причин, поддерживающих стабильность процесса CO_2 -лазерной сварки.

2.5.2. Формирование дефектов в местах неполного проплавления при лазерной сварке CO_2

Стабильность парогазового канала оказывает существенное влияние на формирование дефектов. Специалистам, использующим лазерную сварку, известно, что при обработке толстостенных изделий одной из главных проблем является образование пористости. Пористость, как правило, формируется при сварке с неполным проплавлением, как видно на продольном сечении (рис. 2.18). На рис. 2.19 изображен рентгенографический снимок парогазового канала в месте неполного проплавления стали С-Si-Mn при лазерной сварке CO_2 . Изображение микрорентгенографии образца получено при помощи высокоскоростной видеокамеры. Образование пузырьков отчетливо наблюдается у основания парогазового канала (Matsunawa et al., 1997; Matsunawa, 2001; Katayama et al., 1997; Tsukamoto et al., 2001, 2002). Пузырьки, образующиеся у основания парогазового

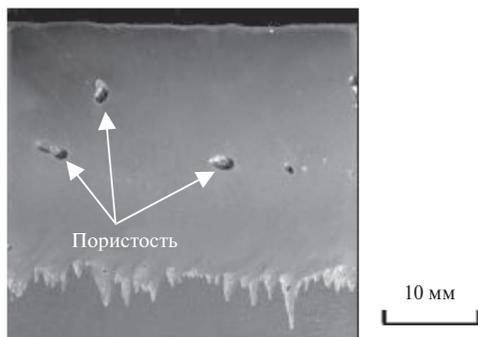


Рис. 2.18. Продольное сечение сварного шва, выполненного непрерывным излучением при сварке в среде CO_2 (сталь C-Si-Mn, 20 кВт, $f_d = 1,0$, скорость 1 м/мин, защитный газ: He, 50 л/мин)

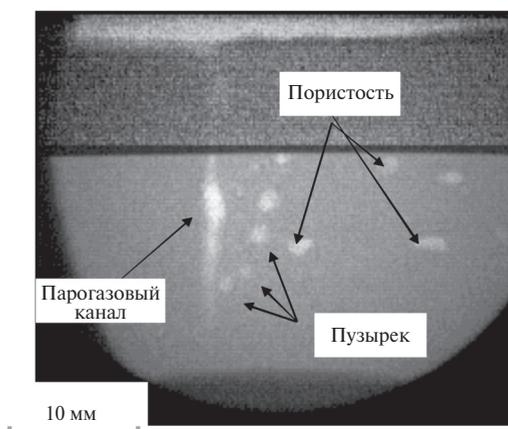


Рис. 2.19. Рентгенографический снимок пароголового канала (сталь C-Si-Mn, 20 кВт, $f_d = 1,0$, скорость 1 м/мин, защитный газ: He, 50 л/мин)

канала, соединяются друг с другом, и большинство из них после затвердевания превращается в поры. На рис. 2.20 показан процесс формирования пузырьков у основания пароголового канала. Во время сварки у основания образуется сужение (рис. 2.20, в), а затем наплавляемый металл закрывает канал (рис. 2.20, г).

Закрытие пароголового канала обычно предотвращают лазерным облучением наплавляемого сверху металла, как было описано выше. Однако если пароголового канал нестабилен и степень взаимодействия между лазерным пучком и расплавленным металлом канала увеличивается, то наблюдается большое потребление лазерной энергии, и это снижает вклад мощности лазерного излучения в область у корня до значений, меньших некоторого критического величины. В результате пароголового канал закрывается у корня согласно механизму, описанному как нестабильность Рэлея. Описание процесса указывает на то, что для предотвращения пористости необходимо следить за стабилизацией парого-

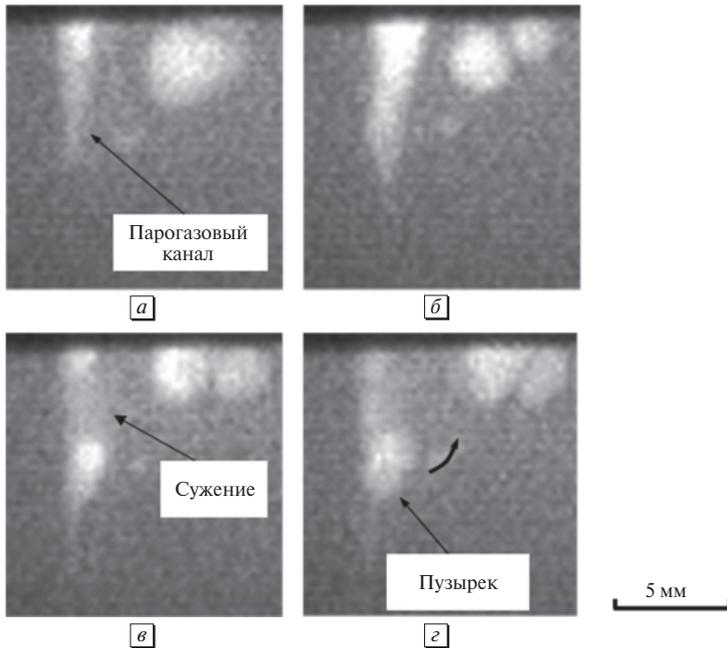


Рис. 2.20. Формирование пузырька у основания канала (рентгенографический снимок парогазового канала): *a* — 0 мс, *б* — 7 мс, *в* — 16 мс, *з* — 17 мс

зового канала. В качестве защитного газа для предотвращения формирования пористости при сварке нержавеющей стали с высоким содержанием Cr обычно используется азот (Ishide et al., 1992), потому что растворимость азота увеличивается с ростом концентрации Cr. Пузырьки газа в процессе сварки не образуются, так как азот растворяется в ванне расплавленного металла.

Тем не менее, при слишком высокой мощности CO_2 -лазерной сварки использовать азот в качестве защитного газа невозможно. Причина кроется в значительном ослаблении лазерной энергии из-за большого количества образующейся плазмы. Также использовать азот в качестве защитного газа не эффективно при лазерной сварке углеродистых сталей, причиной является низкая растворимость в них азота.

Другой способ предотвращения пористости — это стабилизация парогазового канала с помощью модуляции мощности лазера (Tsukamoto et al., 2002). Формирование пористости эффективно предотвращается путем оптимизации модуляции. На рис. 2.21 показано процентное соотношение формирования пористости P_f (отношение (%) суммарной пористости и места сварки металла) при лазерной сварке CO_2 в среде стали C-Si-Mn в зависимости от модуляции мощности лазера. Мощность излучения импульсного лазера модулируется на пике прямоугольного импульса и базовой мощности 20 и 12 кВт соответственно. В данных условиях формирование пористости полностью прекращается при

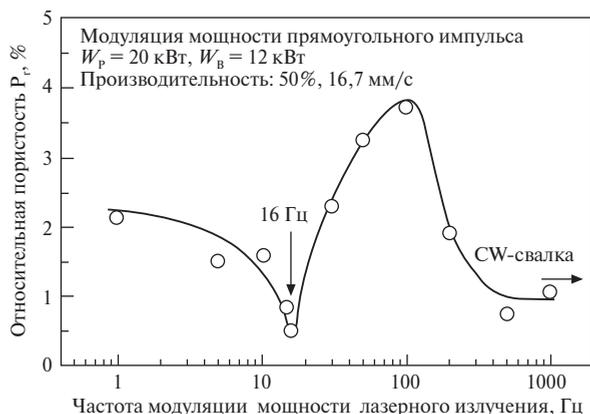


Рис. 2.21. Соотношение пористости P_p , формирующейся в процессе сварки, и частоты модуляции мощности лазера (модуляция мощности прямоугольного импульса)

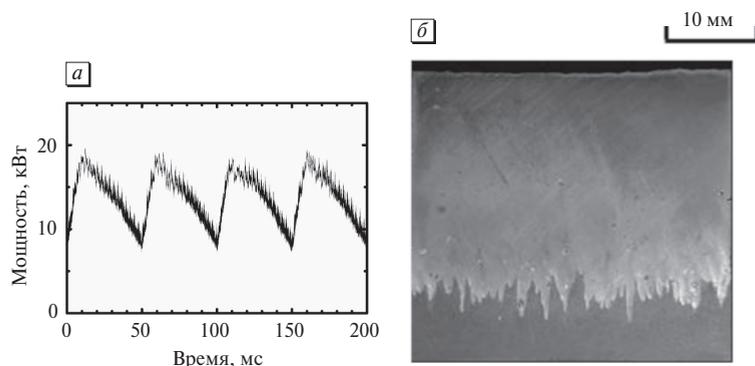


Рис. 2.22. Предотвращение формирования пористости при оптимальной модуляции мощности: *а* — форма волны, *б* — продольное сечение сварного шва

частоте модуляции мощности лазера 16 Гц. Эта частота модуляции совпадает с собственной частотой колебаний ванны расплавленного металла. Стабилизация парогазового канала была подтверждена радиографической съемкой, проведенной после подбора условий оптимальной модуляции. За счет оптимизации формы сигнала удается усилить эффект предотвращения формирования пористости, это достигается путем оптимизации формы сигнала и модуляции (рис. 2.22, *а, б*).

2.5.3. Дефектообразование при CO_2 -лазерной сварке с полным проплавлением в один проход

При лазерной сварке с полным проплавлением в один проход образование пористости, вызванной нестабильностью парогазового канала, менее вероятно,

но пористость возникает с помощью другого механизма. Типичный пример показан на рис. 2.23, где лазерная сварка с полным проплавлением осуществлялась на стали C-Si-Mn без обратного экранирования (Tsukamoto et al., 2003). На рис. 2.24, *a* показано рентгеновское изображения в проходящем свете при

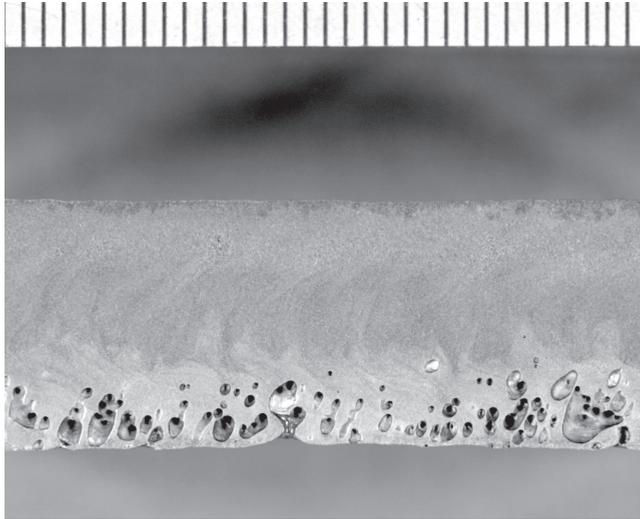


Рис. 2.23. Продольное сечение сварного шва, выполненного CO_2 -лазерной сваркой на стали C-Si-Mn толщиной 11 мм без обратного экранирования (11 кВт, $f_d = 0$ мм, 1 м/мин)

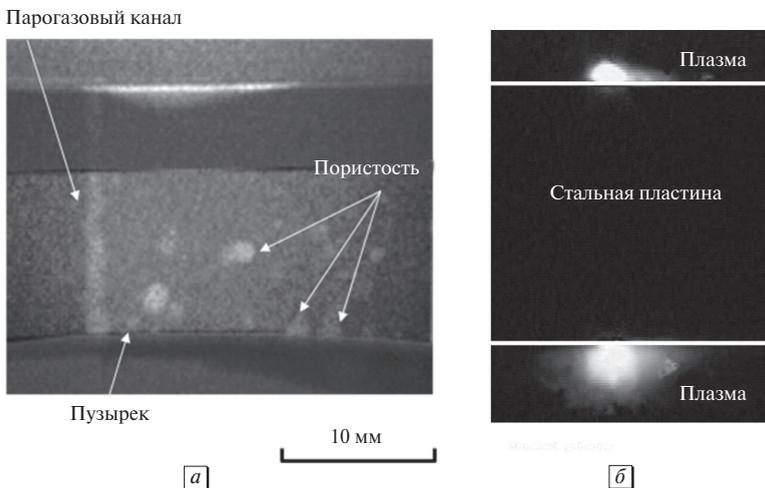


Рис. 2.24. Поведение стали C-Si-Mn толщиной 15 мм при CO_2 -лазерной сварке с полным проплавлением в один проход (20 кВт, $f_d = 0$ мм, 1 м/мин): *a* — операционный рентгенографический снимок; пузырьки образуются в ванне расплавленного металла за парогазовым каналом, *б* — формирование воздушной плазмы у задней поверхности

CO₂-лазерной сварке с полным проплавлением стали C-Si-Mn толщиной 15 мм без обратного экранирования. Пузырьки образуются в расплавленном металле за парогазовым каналом. Это вызвано пересыщенным азотом в ванне расплавленного металла.

Во время лазерной сварки с полным проплавлением чрезмерная лазерная энергия, которая проникает сквозь стальную пластину, образует воздушную плазму на задней поверхности, как показано на рис. 2.24, б. Плазма содержит много атомарного азота, который гораздо легче растворяется в расплавленной стали, чем двухатомный азот (Dong et al., 2004). Концентрация азота в расплаве возрастает вблизи дна, и если она превышает растворимость двухатомного азота, то в расплавленном металле образуются пузырьки. Эффективный способ предотвращения появления такого типа пористости — это обратное экранирование инертного газа. Тем не менее, формируется усадочная трещина. И этот процесс сопровождается локальным расширением секции поперечного сварного шва, очень чувствительного к появлению усадочной трещины, как показано на рис. 2.25, а (Tsukamoto et al., 2003). Образование такого поперечного сечения сварного шва вызвано возмущением парогазового канала. Во время сварки инертный газ поступает в канал от задней поверхности и расширяется в нем, как показано на рентгеновском изображении в проходящем свете (рис. 2.25, б). В свою очередь возникает локальное расширение канала, что ведет к образованию усадочной трещины. Небольшое денитрирование такими элементами, как алюминий, проявляет эффективность в борьбе с появлениями пористости без формирования усадочной трещины (Tsukamoto et al., 2004). Достаточно 0,8 весового процента алюминия, чтобы предотвратить пористость в процессе свар-

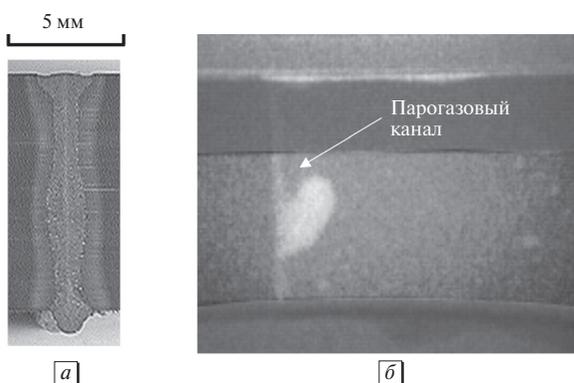


Рис. 2.25. Формирование сечения, склонного к формированию горячих трещин, и формирование парогазового канала во время CO₂-лазерной сварки с полным проплавлением стали C-Si-Mn толщиной 15 мм при обратном экранировании аргона (16 кВт, $f_d = 0$ мм, 1 м/мин): а — поперечное сечение шва, выполненного лазерной сваркой, б — операционный рентгенографический снимок парогазового канала



Область, обогащенная алюминием
(0,8 % массы Al)

Рис. 2.26. Продольное сечение швов, выполненных лазерной сваркой с предварительным нанесением алюминия на заднюю поверхность основного металла толщиной 200 мм, что предотвратило формирование пористости

ки с полным проплавлением углеродистых сталей толщиной 15 мм (рис. 2.26). В таком случае обратное экранирование инертным газом уже не является необходимым условием, ведь тогда усадочная трещина в металле сварного шва не образуется. Добавление никеля и углерода является также эффективной помощью в предотвращении пористости (Tsukamoto et al., 2006). С увеличением концентрации углерода или никеля в основном металле режим затвердевания меняется с полностью ферритного на ферритно-аустенитный или аустенитно-ферритный. Более высокая растворимость азота в аустенитной фазе предотвращает образование пористости в сталях с высоким содержанием углерода или никеля.

В последнее время были разработаны лазеры высокой мощности — волоконные и дисковые лазеры. Эти лазеры — очень привлекательные инструменты для сварки пластин крупного сечения. Тем не менее остаются нерешенными некоторые проблемы (Rominger, 2011). При использовании волоконных и дисковых лазеров в сварке высока вероятность образования брызг, проплавления на всю толщину и недостаточного заполнения. В некоторых случаях соблюдение оптимальных условий сварки сильно ограничено в сравнении с CO_2 -лазерной сваркой. Механизмы различных процессов лазерной сварки с помощью CO_2 и другими инструментами еще не очень хорошо изучены. Плазма парогазового канала, достигающая высокой температуры и образующаяся при CO_2 -лазерной сварке, может быть одним из факторов, способствующих стабилизации парогазового канала за счет увеличения δP_g (см. уравнение (2.8)).

2.6. Промышленное применение CO₂-лазерной сварки

CO₂-лазеры класса высокой мощности, которые способны осуществлять сварку в режиме образования парогазового канала, были разработаны в середине 1970-х. С тех пор CO₂-лазерная сварка стала использоваться в различных отраслях промышленности. В этом разделе приведены некоторые примеры ее промышленного применения.

2.6.1. Автомобильная промышленность

С конца 1970-х и 1980-х годов в автомобильной промышленности началось применение CO₂-лазерной сварки. Различные части силовых агрегатов, включая элементы коробки передач, ступицы и валы, были сварены CO₂-лазером (Petring, 2004). Высокая производительность, низкий приток тепла и низкий уровень искажений стали основными преимуществами лазерной сварки по сравнению с другими процессами. И до сих пор CO₂-лазеры используются для этих задач. Лазерная сварка широко внедрена в производство таких частей кузова автомобиля, как двери, передние и боковые панели, боковые балки и арки колес.

Как показано на рис. 2.27, плоские металлические листы, отличающиеся толщиной, прочностью и разностью покрытий, соединяют лазерной сваркой перед формовкой и обрезкой. Композиция из вариации листовых металлов позволяет снизить вес автомобиля и уменьшить количество используемых компонентов. Как следствие, общая стоимость производства снижается, и повышается безопасность эксплуатации автомобиля за счет улучшения управления энергией удара при аварии. Эта техника получила индустриальное распространение с середины 1980-х годов. Большинство сварочных линий для линейной сварки оснащены CO₂-лазерами мощностью 5–10 кВт. С другой стороны, Nd:YAG-, во-

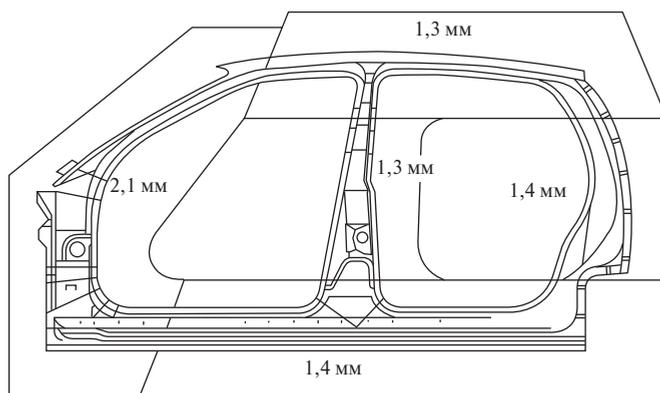


Рис. 2.27. Заготовки, выполненные лазерной сваркой

локонные или дисковые лазеры используются главным образом для нелинейной сварки. Применение лазерной сварки в кузовных цехах началось в середине 1980-х. Тогда некоторые автомобильные компании установили у себя 5 кВт-ные CO_2 -лазеры, чтобы сваривать элементы кузова, готовые к покраске, например, для присоединения крыши к боковым рамам. Тем не менее, в конце 1990-х годов уровень использования CO_2 -лазеров снизился. Это было связано с установкой на конвейерных линиях промышленных роботов с Nd:YAG-лазерами, которые были приспособлены для проведения трехмерной лазерной сварки. Использование дистанционной лазерной сварки началось с 2000-х годов для производства компонентов кузова автомобиля. Лазерный модуль, снабженный высокоскоростными сканирующими зеркалами, формирует лазерное пятно, которое быстро перемещается по обрабатываемой поверхности, покрывая требуемую широкую область, и быстро сваривает отдельные участки. В таких модулях установлены лазеры с высоким качеством луча и большим фокусным расстоянием, обычно большим одного метра. Слэб(Slab)- CO_2 -лазеры были впервые использованы для получения лазерных пучков высокого качества. Их основные преимущества — уменьшение тактового времени и высокая производительность. Благодаря прогрессу в разработке и создании мощных дисковых и волоконных лазеров с высоким качеством пучка появилась новая система дистанционной сварки как части роботизированной сварки. Использование волоконных и дисковых лазеров делает дистанционную сварку более гибкой и быстрой, благодаря этому ее использование расширяется.

2.6.2. Авиационная промышленность

Airbus начал применять CO_2 -лазеры для сварки стрингера и обшивки фюзеляжа на панелях самолетов в начале 2000-х (Schumacher et al., 2002; Vollertsen et al., 2004).

Это было достигнуто благодаря развитию лазерных сварочных модулей, а также благодаря созданию сплава Al-Mg-Si-Cu. Вместо обычной клепки стрингеры соединяют с обшивкой путем одновременной лазерной сварки с обеих сторон, как показано на рис. 2.28. Чтобы избежать образования горячих трещин, используется сварочная проволока Al-12% Si. Снижение веса, высокая производительность, улучшение коррозионной стойкости и хорошие экономические характеристики являются основными преимуществами замены традиционного процесса клепки лазерной сваркой.

2.6.3. Судостроение

Первым применением лазерной сварки в судостроении стало производство трехслойных панелей на верфи Meyer Werft в середине 1990-х (Roland et al., 2004). Тогда производилась сварка плоских панелей до 10 мм в толщину к бал-

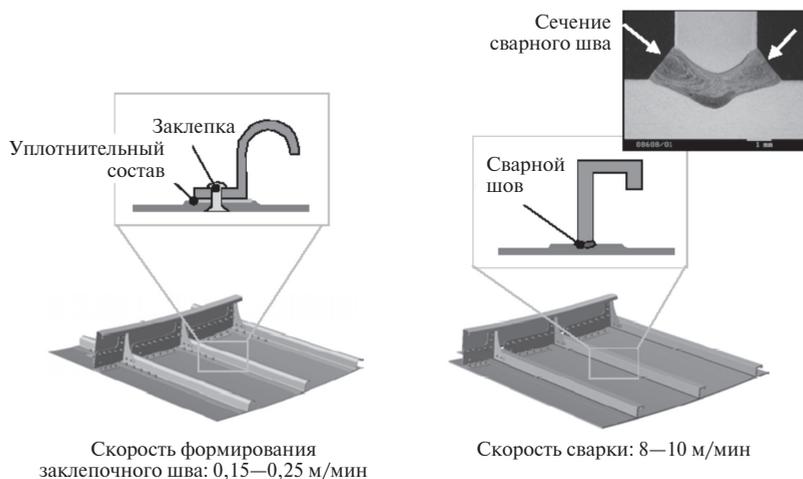


Рис. 2.28. Сравнение процессов клепки и лазерной сварки при соединении стрингера и пластины (Vollertsen et al., 2004)

кам с помощью CO_2 -лазера мощностью 12 кВт (рис. 2.29). С применением новой технологии были достигнуты высокие показатели: снижение веса при высокой прочности, повышение твердости и уменьшение уровня искажений. В Европе в середине 1990-х годов был разработан ряд национальных проектов с использованием основных принципов лазерной сварки в среде CO_2 . Это форсировало применение лазерной сварки в области судостроения. Сварка длинных прямых стыковых швов и угловая сварка толстых стальных пластин были внедрены в компаниях Odense Steel Shipyard (Sellerup, 1999), Fincantiaeri (Manzon, 1998) и Blohm & Boss (Kahl, 1998) в конце 1990-х годов. Используемая ими линия состоит из платформы, оснащенной мощными CO_2 -лазерами от 12 до 18 кВт. Линия включает в себя системы контроля и управления с обратной связью, подготовку краев и систему обработки и/или систему подачи проволоки. Наиболее привлекательным преимуществом установки лазера высокой мощности является уменьшение искажений, это значительно снижает общие трудозатраты на дополнительные операции правки.

Улучшение механической точности позволило автоматизировать производственную линию и достичь высокого уровня производительности. В компании Meyer Werft были установлены четыре лазер/GMA гибридных сварочных установки с конца 1990-х до начала 2000-х годов (Roland et al., 2004). И в настоящее время доля гибридных сварных швов на большом круизном судне близится к 50% от общей длины всех швов. Благодаря гибкости систем подачи волокна на некоторых судостроительных предприятиях были установлены волоконные и дисковые лазеры. Тем не менее, от CO_2 -лазеров предпочитают не отказываться, так как они обеспечивают стабильность сварочного процесса. Эти лазеры также установлены на новых линиях.

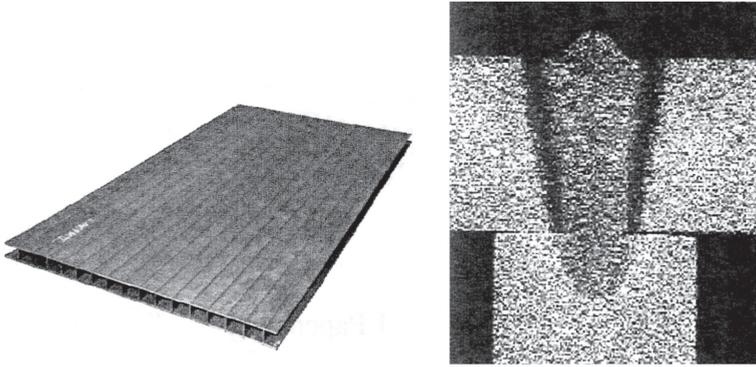


Рис. 2.29. Многослойная панель, полученная при помощи лазерной сварки

2.6.4. Металлургия

С начала 1980-х годов в металлургии стали использовать 5—10 кВт CO_2 -лазеры для сварки листов горячего или холодного проката на линиях непрерывной сварки. Замена стыковой сварки на лазерную сварку привела к тому, что качество сопряжения листов было значительно улучшено. В начале 2000-х годов для сварки горячих стальных стержней толщиной 30 мм на непрерывной линии чистой прокатки были применены два 45 кВт-ных CO_2 -лазера (Minamida, 2002). В начале 1980-х годов для повышения производительности CO_2 -лазеры стали использовать для изготовления сварных труб малого диаметра из нержавеющей стали. И до сих пор в этой области применяются CO_2 -лазеры. В середине 1990-х годов для изготовления труб со средним диаметром и толстостенных труб была применена сварка CO_2 -лазером мощностью 25 кВт в сочетании с высокочастотной индукционной катушкой подогрева (Hayashi et al., 1996; Ono et al., 2001).

2.6.5. Другие применения

Высокомощные CO_2 -лазеры оказались востребованными при изготовлении изделий по заказам некоторых химических заводов, например, заводов по переработке нефти. На рис. 2.30 показано широкое ограждение из толстых листов нержавеющей стали, изготовленных с помощью CO_2 -лазера.

Тавровые профили также могут быть изготовлены при помощи CO_2 -лазеров (рис. 2.30, б), где 25 мм стрингер приварен к балке. Компоненты плазменного реактора, используемого для производства таких сложных полупроводниковых материалов, как углеродные нанотрубки, изготавливаются также методом лазерной сварки в среде CO_2 , потому что CO_2 -лазерная сварка обеспечивает низкий уровень искажений. По этой же причине сварка с помощью CO_2 -лазеров является одной из технологических операций при производстве коньковой спортивной обуви.



Рис. 2.30. Изделия, полученные CO₂-лазерной сваркой для химического завода: (а) ограждение диаметром 4 м, (б) соединения стрингера толщиной 25 мм и балки

2.7. Дальнейшие перспективы

Лазерная сварка CO_2 применялась в различных отраслях промышленности с середины 1970-х годов. В начале 1990-х годов были разработаны Nd:YAG-лазеры мульткиловаттного класса. Их большое преимущество заключается в системе подачи лазерного излучения в рабочую зону по оптоволокну, хотя, заметим, качество пучка YAG-лазеров стержневого уступает качеству пучка CO_2 -лазеров. Поэтому применение YAG-лазерной сварки ограничено в основном областью сварки тонких пластин. В середине 2000-х годов были разработаны дисковые и волоконные лазеры высокой мощности. Поскольку качество луча этих лазеров очень высокое, их стали использовать не только для сварки тонких пластин, но и при сварке тяжелых крупных профилей. По причине бурного развития и внедрения этих лазеров заметно снижается использование CO_2 -лазерной сварки в индустрии. Тем не менее, остается ряд задач, по-прежнему недоступных для волоконной и дисковой лазерной сварки из-за сопровождающих их проблем полного оплавления, разбрызгивания и наличия узкого диапазона оптимальных условий для проведения процесса сварки. Пока эти проблемы не будут решены, CO_2 -лазерная сварка по-прежнему будет востребована, а CO_2 -лазеры — пользоваться спросом.

2.8. Благодарность

Автор выражает благодарность г-ну М. Дамену, Институт Фраунгофера лазерных технологий, за его полезную информацию о процессе сварки в среде CO_2 и ее практических применениях.

2.9. Литература

- [1]. Allmen M. von and Blatter A. (1995), *Laser Beam Interaction with Materials*, 2nd edn. Berlin: Springer.
- [2]. Chandrasekhar S. (1961), *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*. (1961), Oxford: Clarendon Press.
- [3]. Davis J. (2001), Slab lasers, in *LIA Handbook of Laser Materials Processing*, edited by Ready J. F. and Farson D. F., Orlando, FL: Laser Institute of America.
- [4]. Dong W., Kokawa Y., Tsukamoto S., Sato Y. S. and Ogawa M. (2004), Mechanism governing nitrogen absorption by steel weld metal during laser welding, *Metall. Mater. Trans. B*, 35B, 331–338.
- [5]. Hayashi T., Inaba Y., Matuhito Y., Yamada T. and Kudo T. (1996), Development of high power welding process for pipe, *Proc. ICALEO 1996*, D, 132–140.
- [6]. Hughes T. P. (1975), *Plasma and laser light*. The Institute of Physics, Bristol: Adam Hilger, 39–54.

- [7]. Ishide T., Nagura Y., Matsumoto O., Nagashima T., Kidera T. and Yokoyama A. (1992), High power YAG laser welded sleeving technology for steam generator tubes in nuclear power plants, *Proc. LAMP 1992*, 957–962.
- [8]. Kahl A. (1998), Compact shipyard, *Proc. Intel. Conf. IIW'98*, DVS195, 60–63.
- [9]. Katayama S. (2009), Laser welding for manufacturing innovation, *J. Japan Welding Society*, 78, 682–692 (in Japanese).
- [10]. Katayama S., Seto N., Kim J. D. and Matsunawa A. (1997), Formation mechanism and reduction method of porosity in laser welding of stainless steel, *Proc. ICALEO'97*, G-83–92.
- [11]. Manzon L. (1998), Welding in shipbuilding industry, *Welding Review International*, May, 6–8.
- [12]. Matsunawa A. (2001), Problem and solutions in deep penetration laser welding, *Sci. Technol. & Weld Joining*, 6, 351–354.
- [13]. Matsunawa A., Kim J. D. and Katayama S. (1997), Porosity formation in laser welding, *Proc. ICALEO'97*, G-73–82.
- [14]. Mazumder J., Rockstroh T. J. and Krier H. (1987), Spectroscopic studies of plasma during cw laser gas heating in flowing argon, *J. Appl. Phys.*, 62, 4712–4718.
- [15]. Minamida K. (2002), High power laser applications in Nippon Steel Corporation, *Proc. SPIE*, 4831, 402–410.
- [16]. Miyamoto I. and Maruo H. (1992), Spacial and temporal characteristics of laser-induced plasma in CO₂ laser welding, *Proc. LAMP'92*, 311–316.
- [17]. Modest M. F. (2001), Reflectivity and absorptivity of opaque surface, in *LIA Handbook of Laser Materials Processing*, edited by Ready J. F. and Farson D. F., Orlando, FL: Laser Institute of America, 182.
- [18]. Mori K. and Miyamoto I. (1997), In-process monitoring of laser welding by the analysis of ripples in the plasma emission, *J. Laser Application*, 9, 155–159.
- [19]. Ono M., Shinozaki T., Shinbo Y., Sekine Y., Iwasaki K. and Takahashi M. (2001), Development of high power pipe welding process, *Quarterly J. Japan Welding Society*, 19, 233–240.
- [20]. Petring D. (2004), Laser applications in European automotive manufacturing: Historical review and recent trends, *J. Japan Welding Society*, 73, 7–14.
- [21]. Poueyo A., Deshors D., Fabbro R., de Frutos A. M. and Orza J. M. (1992), Study of laser induced plasma in welding conditions with continuous high power CO₂ laser, *Proc. LAMP'92*, 323–328.
- [22]. Rayleigh J. W. S. (1945), *The Theory of Sound, Vol. 2*. New York: Dover Publications.
- [23]. Rockstroh T. J. and Mazumder J. (1987), Spectroscopic studies of plasma during cw laser materials interaction, *J. Appl. Phys.*, 61, 917–923.
- [24]. Roland F., Manzon L., Kujala P., Brede M. and Weitzenbock J. (2004), Advanced joining techniques in European shipbuilding, *J. Ship Production*, 20, 200–210.
- [25]. Rominger V. (2011), High-performance laser welding — a comparison of CO₂ lasers and high brilliance solid-state lasers, *Laser Tech. J.*, 8, 32–35.
- [26]. Schumacher J., Zerner I., Neye G. and Thormann K. (2002), Laser beam welding of aircraft fuselage panels, *Proc. ICALEO 2002*.
- [27]. Sellerup M. (1999), Laser welded ship are afloat, *Industrial Laser Solution*, April, 20–22.
- [28]. Sokolowski W., Herziger G. and Beyer E. (1988), Spectral plasma diagnostics in welding with CO₂ lasers, *Proc. SPIE'88*, 1020, 96–102.

- [29]. Sokolowski W., Herziger G. and Beyer E. (1989), Spectroscopic study of laser induced plasma in the welding process of steel and aluminium, *Proc. SPIE'89*, 1132, 288—295.
- [30]. Tsukamoto S., Hiraoka K., Asai Y., Irie H. and Yoshino M. (1996), Characteristics of stably induced laser plasma, *Proc. ICALEO'96*, 81, B76—B85.
- [31]. Tsukamoto S., Asai Y., Tanaka H. and Shida T. (1999), High-speed measurement of plasma temperature in CO₂ laser welding, *Proc. ICALEO '99*, 87, D73—D82.
- [32]. Tsukamoto S., Kawaguchi I., Arakane G. and Honda H. (2001), Suppression of porosity using pulse modulation of laser power in 20 kW CO₂ laser welding, *Proc. ICALEO 2001*, C1702.
- [33]. Tsukamoto S., Kawaguchi I., Arakane G. and Honda H. (2002), Keyhole behaviour in high power laser welding, *Proc. SPIE, 1st Intl. Symp. on High Power Laser Macroprocessing*, 4831, 251—256.
- [34]. Tsukamoto S., Arakane G., Kawaguchi I. and Honda H. (2003), Keyhole behaviour in high power laser welding of thick steel plates, *Proc. ICALEO 2003*, A176—A183.
- [35]. Tsukamoto S., Arakane G., Honda H. and Kuroda S. (2004), Formation mechanism and prevention of weld defects in full penetration laser welding of thick steel plates, *Proc. ICALEO 2004*, 104—110.
- [36]. Tsukamoto S., Arakane G., Kojima K., Otani T. and Ohkita S. (2006), Effect of alloying elements on porosity formation in laser welding of heavy section steel plates, *Proc. ICALEO 2006*, 26—33.
- [37]. Verwaerde A. and Fabbro R. (1995), Experimental study of continuous CO₂ laser welding at subatmospheric pressure, *J. Appl. Phys.*, 78, 2981—2984.
- [38]. Vollertsen F., Schumacher J., Schneider K. and Seefeld T. (2004), Innovative welding strategies for the manufacture of large aircraft, *Proc. IIW Intl. Conf. 2004*.