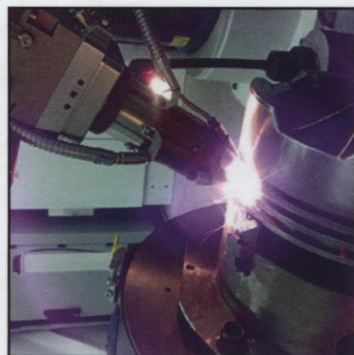


физики и техники

Справочник
по лазерной сварке

Редактор оригинального
издания С. Катаяма



ТЕХНОСФЕРА



М И Р 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

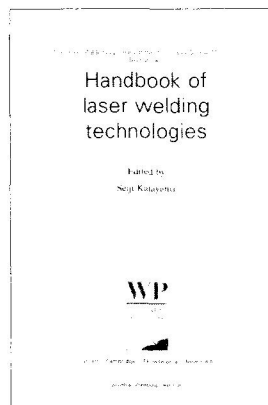
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 704 с. + 34 с. цв. вклейки

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 Элзивер 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.)

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

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 Розенталя (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 передаточных механизмов	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

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

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

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

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