

физики и техники

Е.Д. Вакс, И.Ф. Лебёдкин,
М.Н. Миленький,
Л.Г. Сапрыкин,
А.В. Толокнов

**Резание металлов
излучением мощных
волоконных лазеров**



ТЕХНОСФЕРА



М И Р **физики и техники**

**Е.Д. Вакс
И.Ф. Лебёдкин
М.Н. Миленький
Л.Г. Сапрыкин
А.В. Толокнов**

**Резание металлов
излучением мощных
волоконных лазеров**

**ТЕХНОСФЕРА
Москва
2016**

УДК 621.7.01**ББК 34.63****В14**

**В14 Вакс Е.Д., Лебёдкин И.Ф., Миленский М.Н., Сапрыкин Л.Г., Толокнов А.В.
Резание металлов излучением мощных волоконных лазеров
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 352 с. + 4 с. цв. вклейки
ISBN 978-5-94836-427-8**

Первый раздел книги посвящен расширенному рассмотрению определяющих результатов процесса лазерного резания физических закономерностей. К таковым относятся: зависимость коэффициента отражения металлов от температуры их нагрева; прохождение ассистирующего газа по фронту реза и его влияние на удаление образующейся на поверхности фронта жидкой фазы; необходимость ограничения максимально возможной величины скорости резания; оптимизация ширины реза на его входе; более эффективный способ локализации излучения; согласование фокусных расстояний фокусирующего объектива и коллиматора лазера; влияние на показатели резания тепловых деформаций.

В двух других разделах книги приводятся установленные анализом результатов проведенных в НПП «Лазеры и аппаратура ТМ» в период 2005–2014 гг. экспериментальных исследований закономерности лазерного резания металлов, наиболее часто используемых отечественной промышленностью. Таковыми являются конструкционная сталь, резание которой проводится в зависимости от ее толщины в среде сжатого воздуха или кислорода, нержавеющей стали и сплавы алюминия различных марок, резание которых необходимо проводить в среде нейтральных газов, а также ряд других металлов, необходимых для изготовления изделий различного назначения.

На основании вышеотмеченного и анализа опубликованных данных двух ведущих зарубежных фирм, успешно работающих в области лазерного резания, стало возможно сформулировать условия его проведения, позволяющие реализовать как повышенные качественные результаты данного процесса, так и его производительность и экспериментально подтвердить их.

УДК 621.7.01**ББК 34.63**

© 2016, Е.Д. Вакс, И.Ф. Лебёдкин, М.Н. Миленский, Л.Г. Сапрыкин, А.В. Толокнов
© 2016, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-427-8

Содержание

Вступление.....	7
Раздел 1. Базовые аспекты лазерного резания металлов.....	9
Аннотация к разделу.....	9
Введение.....	10
1.1. Базовые факторы процесса лазерного резания металлов.....	11
Поглощение лазерного излучения металлами.....	12
Влияние гауссового распределения интенсивности излучения по d_f на процесс резания.....	14
Усредненная величина плотности мощности на d_f — показатель того, как развивается процесс резания.....	16
1.2. Модель лазерного резания.....	17
Формирование поверхности фронта реза.....	17
Математическая модель лазерного резания.....	22
1.3. Возможности удаления жидкой фазы потоком ассистирующего газа.....	25
Потери давления ассистирующего газа в зазоре между соплом и поверхностью металла.....	26
Зависимость массы прошедшего через рез потока ассистирующего газа от структуры ударной волны.....	30
Математическое моделирование профиля статического давления в зазоре между соплом и поверхностью обрабатываемой детали, а также в зоне обработки.....	35
Экспериментальное моделирование сверхзвуковой струи на фронте реза.....	46
1.4. Базовые закономерности процесса лазерного резания металлов.....	54
Какой должна быть скорость резания.....	54
Как образуются ребра на боковой поверхности реза.....	61
Оптимизация ширины реза и способа локализации излучения.....	70
Какой должна быть оптимальная ширина фронта реза.....	72
Оптимизация способа локализации излучения.....	73
В каком месте каустики надо устанавливать поверхность детали.....	75
Улучшение оптимизации условий резания подбором сочетания фокусных расстояний коллиматорной линзы лазера и фокусирующего объектива.....	79
Приближение локализации излучения к оптимальному уровню.....	83
1.5. Влияние термодформаций на процесс резания металлов.....	91
Механизмы образования термодформаций.....	92

Экспериментальные данные о возникающих при резании пластичных деформациях, анализ условий их образования	101
Выводы	106
1.6. Скоростное резание металлов толщиной 0,1–0,5 мм	107
Расчет скорости резания	107
Резание нержавеющей стали толщиной 0,5 мм и ковара толщиной 0,14 мм	109
Литература	112
Раздел 2. Резание металлов в среде воздуха или нейтральных газов волоконным лазером мощностью 1–2 кВт	113
Аннотация к разделу	113
2.1. Вводная часть	115
Негативное влияние присадок в металлах	115
Влияние состояния поверхности	117
Влияние конструкции и расположения сопла над поверхностью металла	118
Фокусирующий объектив и локализация излучения на поверхность металла	120
2.2. Технология врезания, проведение начала и окончания резания	123
Врезание	123
Алгоритм резания участков разгона, торможения и углов контура реза	128
Расчет параметров излучения для резания участков разгона и торможения	131
Расчет параметров излучения по первому варианту	131
Режимы резания по второму варианту	134
Режимы резания углов	136
2.3. Режимы резания конструкционной стали в среде сжатого воздуха непрерывным излучением волоконных лазеров	138
Условия проведения и результаты резания, проводимого лазерами различной мощности	138
Возможности уменьшения высоты грата при резании конструкционной стали толщиной 1–3 мм	147
Резание конструкционной стали толщиной 2 мм	151
Условия уменьшения высоты грата при резании конструкционной стали толщиной 2 мм	151
Условия уменьшения высоты грата при резании конструкционной стали толщиной 3 мм	155
2.4. Условия и результаты резания нержавеющей сталей	156
Особенности резания нержавеющей сталей	157

Зависимость скорости резания и чистоты боковой поверхности реза от содержания присадок (железо, хром, углерод, марганец, кремний и никель).....	158
Исследование возможностей минимизации высоты грата при резании нержавеющей стали толщиной 1–5 мм.....	165
Иные условия минимизации высоты грата при резании в среде сжатого воздуха нержавеющей стали с содержанием хрома 12 % толщиной от 1 мм и более.....	177
Иные условия минимизации высоты грата при резании нержавеющей стали с содержанием хрома 18 % толщиной до 5 мм.....	179
Резание нержавеющей стали толщиной до 10 мм излучением лазера мощностью 2 кВт.....	181
2.5. Условия и результаты резания сплавов алюминия.....	186
Особенности резания сплавов алюминия.....	186
Влияние ассистирующего газа.....	189
Влияние конструкции и проходного диаметра сопла.....	194
Экспериментальное подтверждение преимуществ установки поверхности обрабатываемого металла ниже перетяжки каустики.....	198
Сравнение результатов резания сплавов алюминия толщиной до 5 мм, полученных использованием волоконных лазеров мощностью 1 кВт и 2 кВт.....	202
Резание алюминиевых сплавов излучением мощностью 2 кВт при постановке поверхности металла в плоскость каустики, расположенную выше ее перетяжки на расстоянии $\Delta f = -1$ мм.....	208
Резание алюминиевых сплавов толщиной до 10 мм излучением мощностью 2 кВт.....	209
Условия резания сплава алюминия AlMg3 толщиной от 5 мм и до 10 мм с минимизированной высотой грата.....	213
2.6. Условия и результаты резания меди и латуни.....	217
Особенности резания меди.....	217
Резание латуни лазером мощностью 1 кВт.....	219
Условия резания латуни лазера мощностью 2 кВт и его результаты.....	221
2.7. Особенности резания специальной стали и константана лазером мощностью 2 кВт.....	227
Резание специальной стали.....	227
Резание константана.....	229
2.8. Резание в режиме in fly — метод повышения скорости этого процесса.....	232
Резание трансформаторной стали толщиной 0,15 мм.....	232
Предельная глубина резания в режиме in fly и особенность его проведения.....	237

2.9. Резание металлов импульсным излучением волоконного лазера	243
Резание деталей из трансформаторной стали толщиной 0,28 мм	243
Резание деталей из латуни толщиной 0,5–2 мм	248
Выбор длительности и частоты импульсов	250
Расчет перекрытия соседних световых пятен	251
Литература	253
Раздел 3. Лазерное резание конструкционной стали в среде кислорода	254
Аннотация к разделу	254
Введение	255
3.1. Преимущества, базовые понятия резания в среде кислорода и его основная проблема	256
3.2. Возможно ли лазерно-кислородное резание без образования ребер на боковой поверхности реза?	268
Эксперименты и их результаты	268
Аналитическая часть	271
3.3. Резание конструкционной стали в среде кислорода излучением волоконного лазера мощностью 1 кВт	277
Образование поперечной формы фронта реза	278
Образование ребер на боковой поверхности реза	282
Результаты резания с повышением расхода кислорода	285
Условия проведения резания улучшенного качества	295
3.4. Резание конструкционной стали в среде кислорода излучением волоконного лазера мощностью 1,5 кВт	300
3.5. Резание конструкционной стали в среде кислорода излучением волоконного лазера мощностью 2 кВт	308
3.6. Повышение скорости и улучшение качества резания конструкционной стали, проводимого излучением волоконного лазера мощностью 1 кВт в среде кислорода с чистотой 99,97 %	312
3.7. Влияние термодетформаций на результаты кислородно-лазерного резания	320
3.8. Влияние аккумуляции тепла на контуре реза на качество его боковой поверхности	327
3.9. Понижение аккумуляции тепла на контуре резания	332
3.10. Исследование возможности резания конструкционной стали толщиной до 16 мм	337
Увеличение глубины качественного резания до 16 мм	340
3.11. Влияние остаточных напряжений в конструкционной стали на процесс резания	344
3.12. Влияние колебаний фокусирующего объектива вдоль направления резания на его результаты	347
Литература	351