



М И Р Физики и техники

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

Резание металлов
излучением мощных
волоконных лазеров

Издание 2–е, испр. и доп.

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2019

УДК 621.7.01

ББК 34.63

В14

**В14 Вакс Е.Д., Лебёдкин И.Ф., Миленький М.Н., Платов Е.С., Раевский Е.В.,
Сапрыкин Л.Г., Толокнов А.В.**

Резание металлов излучением мощных волоконных лазеров

Издание 2-е, испр. и доп.

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 344 с. + 4 с. цв. вклейки

ISBN 978-5-94836-553-4

В 2016 г. сотрудники НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» Е. Д. Вакс, И. Ф. Лебёдкин, М. Н. Миленький, Л. Г. Сапрыкин и А. В. Толокнов опубликовали книгу «Резание металлов излучением мощных волоконных лазеров». Резание различных металлов такими лазерами широко распространено в российской промышленности, и это направление, несомненно, будет развиваться и совершенствоваться далее. Но для этого необходимо понимать природу физических процессов, протекающих при лазерном резании, что позволит разработать методы улучшения его качественных показателей и производительности.

Исправленное и дополненное новыми результатами второе издание этой книги посвящено описанию эффективных решений, разработанных и проверенных экспериментально в НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» в период 2014–2019 гг., для улучшения результатов резания. В данном издании приведены и проанализированы новые дополнительные экспериментальные и теоретические результаты исследований зарубежных фирм, посвященные данной тематике.

Второй и третий разделы книги построены таким образом, чтобы читателям стали более понятны физические процессы лазерного резания и оптимизация условий его проведения. Эти знания позволят реализовать повышенную производительность и достичь улучшенных качественных показателей лазерного резания.

Книга рассчитана на специалистов промышленных предприятий, технологических и научно-исследовательских подразделений и групп, использующих лазерные технологии обработки металлов.

Она также может быть полезна для преподавателей, студентов, операторов лазерных станков и всех «практиков», изучающих или интересующихся тематикой современной лазерной обработки.

УДК 621.7.01

ББК 34.63

© Е.Д. Вакс, И.Ф. Лебёдкин, М.Н. Миленький, Е.С. Платов, Е.В. Раевский,
Л.Г. Сапрыкин, А.В. Толокнов, 2019

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2019

ISBN 978-5-94836-553-4

Содержание

| | |
|---|----------|
| Вступление | 7 |
| Сведения об авторах | 7 |
| Раздел 1. Базовые аспекты лазерного резания металлов | 9 |
| Аннотация к разделу..... | 9 |
| Введение..... | 11 |
| 1.1. Базовые факторы процесса лазерного резания металлов..... | 12 |
| 1.1.1. Поглощение лазерного излучения металлами..... | 12 |
| 1.1.2. Влияние гауссова распределения интенсивности излучения на площади светового пятна его локализации d_1 на процесс резания..... | 14 |
| 1.1.3. Усредненная величина плотности мощности на d_1 — показатель того, как развивается процесс резания..... | 16 |
| 1.2. Модель лазерного резания..... | 17 |
| 1.2.1. Формирование поверхности фронта реза..... | 17 |
| 1.2.2. Математическая модель лазерного резания..... | 22 |
| 1.3. Возможность удаления жидкой фазы потоком ассистирующего газа..... | 25 |
| 1.3.1. Потери давления ассистирующего газа в зазоре между соплом и поверхностью металла..... | 26 |
| 1.3.2. Зависимость массы прошедшего через рез потока ассистирующего газа от структуры ударной волны..... | 30 |
| 1.3.3. Математическое моделирование профиля статического давления в зазоре между соплом и поверхностью изготавливаемой детали и в зоне обработки..... | 35 |
| 1.3.4. Математическое моделирование распределения давления в зазоре между соплом и поверхностью металла с увеличенной толщиной..... | 42 |
| 1.3.5. Экспериментальное моделирование сверхзвуковой струи на фронте реза..... | 46 |
| 1.4. Базовые закономерности процесса лазерного резания металлов на максимально возможную глубину..... | 53 |
| 1.4.1. Аккумуляция тепла, развивающаяся на заданном контуре реза, и ее последствия..... | 53 |
| 1.4.2. Какой должна быть скорость резания..... | 59 |
| 1.4.3. Механизм образования термдеформаций..... | 61 |
| Экспериментальные данные о возникающих при резании пластичных деформациях, анализ условий их образования..... | 67 |
| 1.4.4. Зависимость удаления жидкой фазы от скорости резания..... | 72 |
| 1.4.5. Как образуются ребра на боковой поверхности реза..... | 74 |
| 1.4.6. Какой должна быть ширина реза и от чего она зависит..... | 84 |
| 1.4.7. Оптимизация локализации излучения и ширины реза..... | 86 |
| Метод оптимизации локализации излучения..... | 86 |
| В каком месте каустики надо устанавливать поверхность детали..... | 88 |

| | |
|---|-----|
| 1.4.8. Улучшение оптимизации условий резания подбором сочетания фокусных расстояний коллиматорной линзы лазера и фокусирующего объектива..... | 91 |
| Приближение локализации излучения к оптимальному уровню..... | 96 |
| Литература..... | 104 |

Раздел 2. Резание металлов в среде сжатого воздуха или нейтральных газов волоконным лазером мощностью 1–2 кВт.....

| | |
|--|------------|
| Аннотация к разделу..... | 105 |
| 2.1. Что влияет на процесс резания металлов..... | 107 |
| 2.1.1. Негативное влияние присадок в металлах..... | 108 |
| 2.1.2. Влияние состояния поверхности, конструкции и расположения сопла над поверхностью металла..... | 110 |
| 2.1.3. Влияние фокусного расстояния фокусирующего объектива..... | 113 |
| 2.2. Технология врезания, проведение начала и окончания резания..... | 116 |
| 2.2.1. Врезание..... | 116 |
| 2.3. Алгоритм резания участков разгона, торможения и углов контура реза..... | 122 |
| 2.3.1. Расчет параметров излучения для резания участков разгона и торможения..... | 124 |
| Расчет параметров излучения по первому варианту..... | 125 |
| Режимы резания по второму варианту..... | 128 |
| 2.3.2. Режимы резания углов..... | 129 |
| 2.4. Режимы резания металлов толщиной 0,1–0,5 мм..... | 131 |
| 2.4.1. Расчет скорости резания..... | 131 |
| 2.4.2. Резание нержавеющей стали толщиной 0,5 мм..... | 133 |
| 2.4.3. Резание нержавеющей стали толщиной 0,28 мм..... | 135 |
| 2.4.4. Резание кобальта толщиной 0,14 мм..... | 135 |
| 2.5. Резание в режиме in flu: метод повышения качества и скорости этого процесса..... | 138 |
| 2.5.1. Резание трансформаторной стали толщиной 0,15 мм, проводимое в непрерывном режиме работы лазера..... | 138 |
| 2.5.2. Резание деталей из трансформаторной стали толщиной 0,28 мм, проводимое в импульсном режиме работы волоконного лазера..... | 143 |
| 2.5.3. Резание угловых зон, расположенных на обрабатываемой детали..... | 149 |
| 2.6. Предельная глубина резания в режиме in flu и особенность его проведения..... | 150 |
| 2.7. Режимы резания конструкционной стали в среде сжатого воздуха непрерывным излучением волоконных лазеров..... | 156 |
| 2.7.1. Обобщенный анализ проведенных в период 2009–2011 гг. исследований процесса резания конструкционной стали 3 толщиной 1–2 мм..... | 156 |
| 2.7.2. Повышение плотности мощности на фронте реза..... | 158 |
| 2.8. Условия и результаты резания нержавеющей стали..... | 161 |
| 2.8.1. Особенности резания нержавеющей стали..... | 161 |
| 2.8.2. Зависимость скорости резания и чистоты боковой поверхности реза от содержания присадок (железо, хром, углерод, марганец, кремний и никель)..... | 163 |

| | |
|--|-----|
| 2.8.3. Исследование возможностей минимизации высоты грата при резании нержавеющей стали толщиной 1–5 мм..... | 172 |
| Резание лазером мощностью 2 кВт..... | 172 |
| Условия минимизации высоты грата при резании в среде сжатого воздуха нержавеющей стали с содержанием хрома 12 % толщиной от 1 мм и более..... | 174 |
| Условия минимизации высоты грата при резании нержавеющей стали с содержанием хрома 18 % толщиной до 5 мм..... | 175 |
| Наиболее стабильное и эффективное условие минимизации высоты грата при резании нержавеющей сталей толщиной 4–5 мм волоконным лазером мощностью 2 кВт..... | 178 |
| 2.8.4. Резание нержавеющей стали толщиной до 10 мм излучением лазера мощностью 2 кВт..... | 179 |
| 2.9. Условия и результаты резания сплавов алюминия..... | 184 |
| 2.9.1. Влияние на процесс резания сплавов алюминия их коэффициента отражения, температуры плавления и испарения..... | 184 |
| 2.9.2. Влияние на процесс резания сплавов алюминия ассистирующего газа..... | 188 |
| 2.9.3. Влияние конструкции и проходного диаметра сопла..... | 194 |
| 2.9.4. Влияние на результаты резания установки поверхности обрабатываемого сплава алюминия относительно перетяжки каустики..... | 197 |
| 2.9.5. Сравнение результатов резания сплавов алюминия толщиной до 5 мм, полученных использованием волоконных лазеров мощностью 1 и 2 кВт..... | 201 |
| 2.9.6. Резание алюминиевых сплавов излучением мощностью 2 кВт при постановке поверхности металла в плоскость каустики, расположенную выше ее перетяжки на расстоянии $\Delta f = -1$ мм..... | 207 |
| 2.9.7. Резание алюминиевых сплавов толщиной до 10 мм излучением волоконного лазера мощностью 2 кВт..... | 208 |
| 2.9.8. Условия резания сплава алюминия AlMg3 толщиной от 5 до 10 мм с минимизированной высотой грата излучением волоконного лазера мощностью 2 кВт..... | 212 |
| 2.10. Условия и результаты резания меди..... | 215 |
| 2.10.1. Особенности резания меди..... | 215 |
| 2.11. Условия резания латуни и его результаты..... | 218 |
| 2.11.1. Резание латуни волоконным лазером мощностью 1 кВт..... | 218 |
| 2.11.2. Условия резания латуни волоконным лазером мощностью 2 кВт и его результаты..... | 220 |
| 2.12. Особенности резания специальной стали и константана волоконным лазером мощностью 2 кВт..... | 225 |
| 2.12.1. Резание специальной стали..... | 226 |
| 2.12.2. Резание константана..... | 227 |
| 2.13. Резание металлов импульсным излучением волоконного лазера..... | 230 |
| 2.13.1. Резание деталей из латуни толщиной 0,5–2 мм..... | 230 |
| Выбор длительности и частоты импульсов..... | 232 |
| Расчет перекрытия соседних световых пятен..... | 233 |
| Литература..... | 235 |

| | |
|---|------------|
| Раздел 3. Лазерное резание конструкционной стали в среде кислорода | 236 |
| Аннотация к разделу..... | 236 |
| Введение..... | 238 |
| 3.1. Преимущества, базовые понятия резания в среде кислорода и его основная проблема..... | 239 |
| 3.2. Возможно ли лазерно-кислородное резание без образования ребер на боковой поверхности реза..... | 250 |
| Эксперименты и их результаты..... | 251 |
| Аналитическая часть..... | 254 |
| 3.3. Резание конструкционной стали в среде кислорода излучением волоконного лазера мощностью 1 кВт..... | 259 |
| 3.3.1. Образование поперечной формы фронта реза..... | 260 |
| 3.3.2. Образование ребер на боковой поверхности реза..... | 265 |
| 3.3.4. Результаты резания при повышенном расходе кислорода..... | 267 |
| 3.3.5. Условия проведения резания улучшенного качества..... | 278 |
| 3.4. Резание конструкционной стали в среде кислорода излучением волоконного лазера мощностью 1,5 кВт..... | 283 |
| 3.5. Резание конструкционной стали в среде кислорода излучением волоконного лазера мощностью 2 кВт..... | 291 |
| 3.6. Повышение скорости и улучшение качества резания конструкционной стали толщиной 3–10 мм, проводимого излучением волоконного лазера мощностью 1 кВт в среде кислорода с чистотой 99,97%..... | 296 |
| 3.7. Влияние тепловых деформаций на результаты кислородно-лазерного резания..... | 303 |
| 3.8. Влияние аккумуляции тепла на контуре реза на качество его боковой поверхности..... | 311 |
| 3.9. Понижение аккумуляции тепла на контуре резания..... | 317 |
| 3.10. Исследования возможности резания конструкционной стали толщиной до 16 мм..... | 322 |
| 3.10.1. Особенности резания в среде кислорода конструкционной стали 3..... | 323 |
| 3.10.2. Увеличение глубины качественного резания конструкционной стали 3..... | 325 |
| 3.10.3. Особенности проведения врезания в среде кислорода в конструкционной стали 3 толщиной от 3 до 16 мм..... | 330 |
| 3.11. Влияние остаточных напряжений в конструкционной стали на процесс резания..... | 332 |
| 3.12. Влияние колебаний на результаты резания..... | 335 |
| Литература..... | 339 |
| Закономерности резания металлов мощным волоконным лазером, разработанные в НИЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» | 340 |

Вступление

В начале 2013 г. была опубликована книга «Практика прецизионной лазерной обработки», написанная сотрудниками НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» Е. Д. Вакс, М. Н. Миленьким и Л. Г. Сапрыкиным. В ней рассмотрен широкий спектр применения различных лазеров для сверления и резания металлов, полупроводниковых и диэлектрических материалов.

В 2016 г. сотрудниками НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» Е. Д. Вакс, И. Ф. Лебёдкиным, М. Н. Миленьким, Л. Г. Сапрыкиным и А. В. Толокновым была опубликована книга «Резание металлов излучением мощных волоконных лазеров». С той поры в российской промышленности наибольшее распространение приобрело резание различных металлов такими лазерами. И это направление, несомненно, будет расширяться и совершенствоваться далее. Но для того чтобы это произошло, было необходимо развить понимание физических процессов, протекающих при лазерном резании, и на этой основе разработать методы улучшения его качественных показателей и производительности.

Скорректированное и дополненное новыми результатами второе издание этой книги посвящено описанию разработанных и проверенных экспериментально в НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» эффективных решений для улучшения результатов резания в период 2014–2019 гг. В нем приведены и проанализированы также новые дополнительные экспериментальные и теоретические результаты исследований зарубежных фирм, посвященные данной тематике.

Изложение разделов 2 и 3 во втором издании этой книги построено таким образом, чтобы более полно и понятно изложить для читателей физические процессы лазерного резания и методы оптимизации условий проведения резания, позволяющие реализовать повышенную производительность и улучшенные качественные его показатели.

Сведения об авторах

Кандидат технических наук *Е. Д. Вакс* работает в области лазерной технологии с 1963 г. Он проводил экспериментальные исследования и разрабатывал основы теории лазерного сверления и резания используемых в промышленности материалов. Под его руководством впервые в СССР были разработаны и внедрены в производство: технология и автоматизированные лазерные установки для сверления отверстий в часовых рубиновых камнях, технология и лазерные станки с программным управлением для резания изделий из керамик и фрезерования волок из природного и искусственного алмазов. В последние годы Е. Д. Вакс проводит усовершенствование технологии резания металлов излучением мощных волоконных лазеров, применяемых в соответствующем оборудовании, разрабатываемом и выпускаемом НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ».

Один из создателей отечественной элементной базы квантовой электроники к. т. н. *Л. Г. Сапрыкин* работает в этой области с 1970 г. С конца 80-х и в 90-х годах он был руководителем лазерного направления НИИ «Зенит».

М. Н. Миленский пришел в лазерную индустрию в начале 80-х годов после окончания факультета физической и квантовой электроники МФТИ. В 90-х годах он руководил лабораторией лазерных лидарных систем НИИ «Зенит».

В конце 90-х годов Л. Г. Сапрыкин и М. Н. Миленский организовали и возглавили научно-производственный центр «Лазеры и аппаратура ТМ». В настоящее время этот центр из малого предприятия, выполнявшего разовые заказы, вырос по количеству выполняемых НОКР с разнообразными тематическими направлениями, номенклатуре и объему производства в общепризнанного лидера среди российских производителей лазерного технологического оборудования.

Кандидат технических наук *Е. В. Раевский* — выпускник МФТИ 1985 г. С тех пор основным направлением его научной и производственной деятельности является разработка твердотельных лазеров, применяемых в том числе и для обработки различных материалов. С 2011 г. он работает научным сотрудником в НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ».

Выпускник МВТУ *А. В. Толокнов* работает в НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» с 2004 г. В настоящее время он является заместителем главного инженера АО НИИ ЭСТО. А. В. Толокнов занимается разработкой лазерных установок для резания и сварки различных материалов излучением мощных волоконных лазеров, а также их внедрением на промышленных производствах.

Ведущий инженер *И. Ф. Лебёдкин* работает в технологической лаборатории НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» с 2012 г. В период 2012–2015 гг. он эффективно участвовал в создании технологии резания металлов излучением мощных волоконных лазеров, а также в разработке математического обеспечения для лазерных резательных установок и их внедрении на промышленных производствах. С 2016 г. по настоящее время он занимается разработкой технологии аддитивного изготовления сложнопрофильных деталей из металлических порошков и лазерных технологических установок для этого процесса.

Руководитель лаборатории НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» *Е. С. Платов* закончил МВТУ. Он руководит разработкой технологии резания металлов и диэлектриков, внедряет эти технологии в производство.

РАЗДЕЛ I

БАЗОВЫЕ АСПЕКТЫ ЛАЗЕРНОГО РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Аннотация к разделу

Примерно в 2/3 текста этого раздела приведены новые необходимые для практики данные. Среди них ряд новых закономерностей резания и сопровождающих его процессов. Остальной текст этого раздела повторяет приведенный в книге «Практика лазерной прецизионной обработки», опубликованной в 2013 г. Но с учетом замечаний к нему он отредактирован и в него введен ряд поясняющих дополнений. Тем самым улучшено его изложение и облегчено понимание. Новыми данными являются:

- зависимость коэффициента отражения алюминия и стали от температуры нагрева этих металлов. Без ее учета невозможно понять различие некоторых результатов резания этих металлов;
- уточненный расчет эффективной величины давления ассистирующего газа на поверхности фронта реза. Показано, что для улучшенного удаления его потоком жидкой фазы с поверхности фронта давление подаваемых в сопло сжатого воздуха или нейтральных газов необходимо повысить до 16 атм или даже более;
- формула для расчета усилия удаления жидкой фазы с поверхности фронта ассистирующим газом, из которой следует, что оно пропорционально квадрату скорости его потока;
- расширенное и подробно проанализированное рассмотрение четырех моделей прохождения сверхзвукового потока ассистирующего газа по фронту реза. Показано, как изменяется давление потока по глубине реза и какая из составляющих его скорости производит удаление жидкой фазы с поверхности фронта реза.

Важными для практики результатами, выясненными при этом рассмотрении, являются также следующие факторы:

- а) особенности формирования профиля и величины статического давления в сверхзвуковой струе ассистирующего газа в зазоре между соплом

и поверхностью металла, определяющие прохождение его потока по поверхности фронта реза. Рассмотрено, как это влияет на качество обработки;

б) увеличение в четыре раза давления в зазоре между соплом и поверхностью металла по сравнению с давлением газа в сопле. Из-за этого могут возникнуть вибрации обрабатываемой детали и оптической системы лазерной установки, ухудшающие показатели резания;

в) для улучшения показателей резания необходимо подбирать величину зазора между соплом и поверхностью металла в зависимости от его толщины и от условий проведения резания. С ростом толщины и давления ассистирующего газа зазор должен увеличиваться;

- кино съемка процесса удаления жидкой фазы на выходе реза и ее анализ, подтвердивший, что на скорости резания, близкой к максимально возможной, количество образованной на фронте жидкой фазы становится минимальным;
- объяснение того, почему максимально возможная скорость резания не должна превышать скорость удаления жидкой фазы с поверхности фронта реза;
- объяснение причин, почему, несмотря на некоторое увеличение количества образуемой на фронте жидкой фазы, скорость резания должна быть несколько меньше, чем максимально возможная;
- рассмотрение и анализ влияния на результаты резания тепловых деформаций, развивающихся в металле, расположенном вокруг фронта реза. Приведены и проанализированы конкретные примеры влияния тепловых деформаций на результаты резания;
- введено понятие оптимизированной ширины реза. Объяснено, почему при оптимизированной ширине реза улучшаются показатели резания;
- объяснена необходимость:
 - проведения такой настройки коллиматора лазера, при которой расходимость излучения волоконного лазера понижается до 0,5 мрад;
 - оптимального сочетания фокусного расстояния коллиматора с фокусным расстоянием фокусирующего объектива.

Экспериментально подтверждено, что при этом улучшаются качество и производительность лазерного резания.

Все вышеизложенное относится к резанию металлов, проводимому в среде сжатого воздуха или нейтральных газов. (Процесс кислородно-лазерного резания конструкционной стали рассмотрен в разделе 3.) Какие при этом требования предъявляются к качественным и точностным результатам, показано во введении к разделу.

Введение

Оно предназначено для того, чтобы вкратце представить проблематику, которая рассматривается в данном разделе. Таковой является возможность резания различных металлов необходимой предприятия толщины **в среде сжатого воздуха или нейтральных газов**, а также требования, которые предъявляются к его результатам.

Накопленная НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» статистика показывает, что **резание металлов толщиной 1–10 мм** с удовлетворительной чистотой боковой поверхности реза является наиболее востребованным отечественной промышленностью. Удовлетворительная чистота означает ограничение как высоты образующихся на ней ребер, так и наличия на ней застывшей жидкой фазы, а в ряде применений и глубины зоны термического влияния. Ограничивается также высота грата, образованного на выходе реза из застывшей жидкой фазы. Многие отечественные предприятия, использующие лазерное резание или намеревающиеся это делать, вообще не приемлют его наличия. В целях экономии металла ограничивается и ширина реза. Она не должна превышать 0,5 мм.

В большинстве применений лазерного резания различных металлов удовлетворительные результаты по его предельной глубине, качественным показателям и производительности реализуются с использованием волоконных лазеров мощностью 2 кВт и подбором условий проведения резания. Соответствующая этим условиям предельная его глубина в среде сжатого воздуха равна: для конструкционной стали — 2 мм, для сплавов алюминия — 10 мм, а для нержавеющей стали — до 10 мм. Качественные показатели резания должны быть такими, чтобы его было допустимо считать приемлемым для производств. В подразделе 3 показано, что для реализации качественного резания конструкционной стали толщиной от 3 мм и более его надо проводить в среде кислорода.

Указанная мощность лазера является необходимым, но недостаточным условием обеспечения качественного резания. Достаточным оно становится при оптимизации ряда факторов, влияющих на его проведение. Что надо оптимизировать, каким образом это делается и к каким результатам приводит, рассмотрено в тексте настоящего раздела.

— **Резание металлов толщиной от 0,1 до 0,5 мм.** Исходя из предъявляемых к нему требований его следует считать прецизионным. Такая оценка вытекает из необходимости минимизации зоны теплового влияния на боковой поверхности реза, полного отсутствия грата на его входе и выходе. К этому добавляются жесткие допуски как на размеры вырезаемого контура, так и координаты его размещения. Для проведения этого резания используются волоконные лазеры, работающие в непрерывном или импульсном режиме.

1.1. Базовые факторы процесса лазерного резания металлов

В этой части приведены три базовых фактора, без учета которых невозможно разобраться в процессах, развивающихся при лазерном резании. Таковыми являются: поглощение металлами лазерного излучения, гауссово распределение интенсивности излучения на световом пятне его локализации и усредненная плотность мощности на нем.

1.1.1. Поглощение лазерного излучения металлами

Прежде чем перейти к рассмотрению того, какие процессы развиваются при лазерной обработке металлов и чем определяются ее показатели, следует напомнить о том, как происходит взаимодействие лазерного излучения с ними.

Задолго до появления лазеров было известно, что свет в металлах поглощается свободными электронами, концентрация которых равна $N = 10^{28} \text{ м}^{-3}$. После поглощения через время, равное порядка 10^{-11} – 10^{-12} сек, электроны отдают энергию кристаллической решетке. Такое взаимодействие называется электроно-фононным. Фононы — акустические волны, которые и передают энергию электронов решетке. За счет этого происходит нагрев металла.

Поглощение излучения I_g в металле по глубине h описывается соотношением

$$I(h) = I_g \cdot (1 - R_{\text{ref}}) e^{-\alpha h} \quad (\text{закон Бугера}), \quad (1.1)$$

где R_{ref} — коэффициент отражения, α — коэффициент поглощения, I_g — воздействующее излучение.

Величина $A = 1 - R_{\text{ref}}$ показывает поглощательную способность металлов, являющуюся одним из важнейших для практики лазерной обработки параметров.

Глубина проникновения излучения, называемая иначе скин-слоем, зависит от α , и ее величина равна порядка 10^{-2} мкм. Электрону, получившему избыток тепловой энергии от поглощения кванта света, часто недостаточно одного столкновения для передачи избыточной энергии. Поэтому процесс релаксации энергии может быть многостадийным и, следовательно, носить диффузионный характер. В результате перераспределение энергии происходит не в скин-слое, а в слое, глубина которого равна $l_\alpha = 10^{-1}$ мкм. Материал этого слоя нагревается, а затем теплопроводностью тепло передается вглубь материала.

После того как металл в некотором объеме с глубиной, превышающей l_α , нагреется сначала до температуры плавления, а затем до температуры испарения, начинается его удаление. В него входит и вытеснение образовавшейся жидкой

фазы. Происходит оно под воздействием избыточного давления испарения. Суммарный сьем от испарения и вытеснения жидкой фазы, называемый **абляцией**, формирует канал обрабатываемого отверстия или поверхность фронта реза [1].

Для объяснения изложенных в следующем разделе результатов лазерного резания и для практики его использования в металлообработке следует привести следующую информацию. Высокий коэффициент отражения меди на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм, как известно из сообщений зарубежных и отечественных фирм, производящих волоконные лазеры, делает опасным резание этого металла с их использованием. Дело в том, что отраженное излучение способно повредить лазер. Вот почему во многих опубликованных источниках отсутствуют данные по резанию меди такими лазерами. Однако график, показанный на рис. 1.1, подсказывает, каким образом резание меди может проводиться с использованием волоконного лазера, генерирующего излучение $\lambda = 1,06$ мкм, без опасения его разрушения [2].

Возможность резания меди основывается на том, что при ее нагревании до температуры плавления коэффициент поглощения на $\lambda = 1,06$ мкм увеличивается примерно до $\alpha = 0,9$. Отсюда следует, что если предварительно каким-то

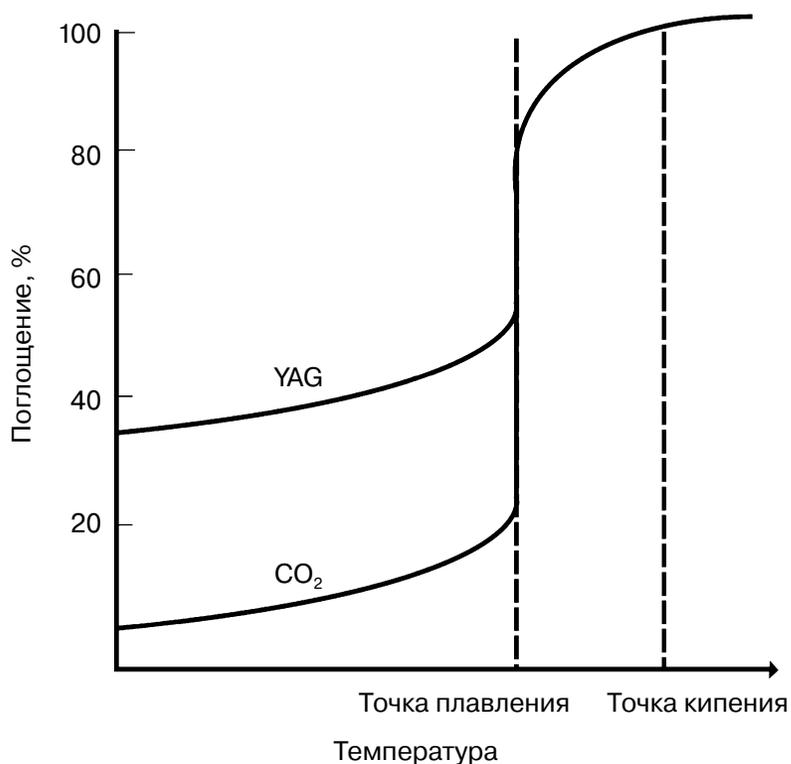


Рис. 1.1. Изменение поглощения меди на длине волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм в зависимости от температуры [2]

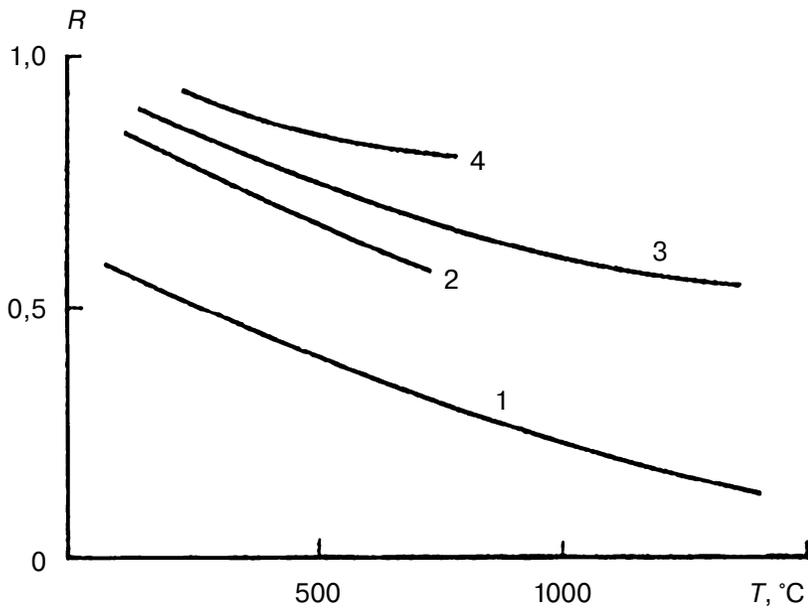


Рис. 1.2. Изменение коэффициента отражения алюминия и железа в зависимости от температуры для различных длин волн [3]: 1 — железо ($\lambda = 1,06$ мкм); 2 — алюминий ($\lambda = 1,06$ мкм); 3 — железо ($\lambda = 10,6$ мкм); 4 — алюминий ($\lambda = 10,6$ мкм)

образом нагреть этот металл до температуры плавления, то далее станет возможным его резание излучением волоконного лазера.

Произойдет это потому, что затем температура плавления на фронте реза будет сохраняться уже автоматически. Каким простым способом можно осуществить предварительный нагрев меди до температуры плавления и почему она после этого поддерживается автоматически, объяснено и подтверждено результатами резания этого металла, приведенными в разделе 2.

Зависимость коэффициента отражения от температуры имеет место не только у меди, но и у алюминия и железа. Эта зависимость показана на рис. 1.2 [3]. Приведенные на нем графические данные подтверждаются примерами резания нержавеющей стали и сплавов алюминия, рассмотренными в разделе 2.

1.1.2. Влияние гауссова распределения интенсивности излучения на площади светового пятна его локализации d_1 на процесс резания

Качественное представление гауссова распределения интенсивности излучения на световом пятне диаметром d_1 , на которое фокусируется излучение на поверхности металла, показано ниже на рис. 1.4б. Представить его в численном виде невозможно из-за отсутствия необходимых для этого измерительных средств. Поэтому

его роль в процессе резания рассматривается далее по настоящему тексту на основании известных физических закономерностей и экспериментальных данных.

Поскольку излучение проходит по фронту реза за счет отражений от его боковой поверхности, то гауссов характер распределения интенсивности сохраняется до глубины фронта, на которой образуется дросселирующий канал. (На фото на рис. 3.7 этот канал виден.) При этом излучение из центральной его зоны, в которой его интенсивность максимальна, проходит по глубине фронта реза с меньшим количеством отражений, то есть с меньшими потерями, возникающими из-за поглощений на каждом из них.

Его воздействие образует наибольшую абляцию по сравнению с той, которая развивается на поверхности фронта реза от воздействия излучения с меньшей интенсивностью, поступающего на него из зоны, находящейся за центральной. Причина — скорость испарения и избыточное давление паров, удаляющих жидкую фазу, пропорциональны интенсивности излучения. Вот почему гауссово распределение является определяющим фактором того, что поперечная форма фронта реза с самого начала его формирования становится конусной.

С учетом данной особенности становится понятным его определяющая роль в формировании на некоторой глубине от входа в рез дросселирующего канала. От его размеров зависят предельная глубина резания, его скорость и качественные показатели. Причина — скопление перед ним и за ним жидкой фазы, из-за чего в этих местах увеличиваются потери излучения и давления ассистирующего газа.

От гауссова распределения зависит глубина распространения теплового поля под боковой поверхностью фронта. Причина — периферийная часть гауссова распределения с интенсивностью, меньшей порога плавления металла, производит дополнительный нагрев этой поверхности. За счет этого увеличивается глубина образовавшегося на ней слоя жидкой фазы. А на некотором расстоянии вглубь от нее уровень нагрева металла достигает температуры, превышающей предел его текучести. Нагретый в верхней зоне фронта до такой температуры металл удаляется избыточным давлением испарения и давлением ассистирующего газа, что расширяет ее.

Суммарные потери давления испарения и ассистирующего газа быстро возрастают по глубине. Потому несколько ниже верхней зоны снижается эффективность удаления образовавшейся здесь жидкой фазы, что приводит к ее накоплению еще до дросселирующего канала. Замедленное ее прохождение через этот канал увеличивает накопление. В результате здесь экранирование излучения может возрасти до того, что резание на некоторое время может прекратиться.

Гауссово распределение определяющим образом влияет на ширину и чистоту поверхности зоны фронта реза, расположенную за дросселирующим каналом. Причина — в ней из-за потерь излучения в абляции превалирует жидкая фаза. Из-за уменьшенного в этой зоне суммарного давления испарения

и ассистирующего газа ее удаление становится менее эффективным. Этим определяется влияние гауссова распределения на ширину реза в этом месте и на чистоту его боковой поверхности. В зависимости от иных условий проведения резания его ширина на выходе может или увеличиться, или уменьшиться. Чистота его боковой поверхности в этом месте ухудшается. На выходе реза образуется высокий грат.

1.1.3. Усредненная величина плотности мощности на d_f — показатель того, как развивается процесс резания

Величина усредненной плотности мощности (W) является таким численным показателем, с помощью которого возможно во многом понять, что происходит на фронте резания и объяснить его результаты. Ее величина на d_f вычисляется из соотношения $W = P/S$, где P — мощность излучения, S — площадь, на которую оно фокусируется.

Значимость величины W на d_f состоит в том, что она позволяет оценить, каким будет состав абляции, развивающейся на фронте реза. А именно — превалирует ли в ее составе испаренная или жидкая фаза. Количество расплава и эффективностью его удаления определяется скорость резания. От состава абляции зависит и предельная глубина резания. Эти зависимости возникают из-за экранирования излучения на жидкой фазе и из-за того, что она препятствует прохождению потока ассистирующего газа. В сумме эти потери ухудшают скорость и качественные показатели резания.

На образование и накопление расплава на фронте реза влияет поперечная его форма и ее размеры. Чем больше величина W , тем цилиндричнее она становится и тем в большей мере удаляется с его поверхности жидкая фаза. С увеличением W в составе абляции уменьшается количество жидкой фазы. Ее уменьшение вызвано еще и тем, что она эффективнее удаляется с фронта соответствующим величине W повышенным давлением избыточного испарения.

С увеличением W глубина резания возрастает еще и потому, что формирующийся на фронте реза у всех металлов толщиной более 2 мм дросселирующий канал образуется на большей высоте от входа в рез [1]. Притом его минимальный диаметр увеличивается, а длина укорачивается. В результате улучшается чистота боковой поверхности реза и уменьшается высота грата на его выходе. Происходит это из-за того, что в зоне канала и за ним скапливается меньшее количество расплава, поскольку он легче удаляется через его дросселирующий проток с увеличенным диаметром и укороченной длиной.

То, с какой максимальной величиной W может производиться резание металлов волоконным лазером, демонстрирует следующий пример. Отечественными предприятиями используются лазеры мощностью не более 3 кВт. При применении наиболее мощного из них его излучение фокусируется обычно

на световое пятно с диаметром, равным $d_1 = 200\text{--}250$ мкм. Усредненная величина плотности мощности на нем не превышает $W = (6\text{--}9) \cdot 10^6$ Вт/см². Такая величина W не более чем в 3–4 раза превышает порог испарения таких металлов, как конструкционная сталь, нержавеющая сталь и сплавы алюминия.

Далее для осознания возможностей лазерного резания по его предельной глубине, по скорости этого процесса и по его качеству следует еще раз выделить то, что плотность мощности быстро уменьшается по глубине фронта. Данное уменьшение приводит к снижению скорости резания, увеличивающемуся с ростом толщины обрабатываемого металла, ухудшению чистоты боковой поверхности реза и росту высоты грат на его выходе.

Тем же ограничивается предельная толщина резания. В этом плане требует объяснения результат резания, полученный при следующих условиях. При использовании для его проведения лазера мощностью 1 кВт, излучение которого фокусируется в световое пятно, равное $d_1 = 250$ мкм, величина W уменьшилась до близкой к порогу испарения. Тем не менее при этом в среде сжатого воздуха возможно резание конструкционной стали толщиной до 5 мм. Хотя и с неудовлетворительными качественными показателями, но все-таки оно возможно. Определяется это тем, что реальное распределение интенсивности излучения на поверхности d_1 является гауссовым. Повышенная его интенсивность в центральной зоне является тем фактором, который позволил проводить резание конструкционной стали толщиной 5 мм.

1.2. Модель лазерного резания

Предваряя рассмотрение этой модели, следует еще раз обратиться к тому, как в реальности формируется продольная поверхность фронта реза. Это позволяет не только понять, сколь сложно в математической модели учесть все особенности этого процесса, но и дополнить их. Тем не менее даже в упрощенном своем виде она позволила установить качественную зависимость скорости абляции от физических констант металлов, а значит, и скорости их резания. Позволяет она также показать, как скорость абляции определяют толщину слоя жидкой фазы, образующейся на поверхности фронта реза. Все это необходимо для понимания того, каким образом можно улучшить показатели резания.

1.2.1. Формирование поверхности фронта реза

Схематическое представление формирования продольной поверхности фронта показано на рис. 1.3 и 1.4а, б. Данный процесс рассматривается для случая проведения резания с использованием импульсного излучения. В принципе, он не отличается от того, который проводится непрерывным излучением.

Определяется это тем, что, как показано в подразделе 1.4, абляция и в этом случае также происходит периодически с конкретной частотой. Периодичность развивается при том, что сквозное резание поддерживается подбором его скорости. Чем она вызвана, объяснено в этом же подразделе. К тому следует добавить, что как и при резании, проводимом импульсным излучением, развитие абляции коррелируется с перемещением d_1 на новую позицию, отстоящую от предыдущей на расстояние, равное Δd_1 .

На рис. 1.3 и 1.4а, б показано, что резание на глубину h производится последовательным перемещением детали относительно d_1 (или, наоборот, d_1 по детали) от импульса к импульсу. В зависимости от частоты следования импульсов скорость перемещения детали устанавливается таким образом, чтобы обеспечить выбранное перекрытие последовательных световых пятен или, что является тем же самым, соответствующую ему величину шага Δd_1 . Забегая несколько вперед, следует отметить, что при резании непрерывным излучением, проводимым на определенной скорости, величина Δd_1 , равная примерно $0,5d_1$, устанавливается программно.

На рис. 1.3 зафиксирована продольная форма фронта реза в момент прекращения действия излучения. Таковой она получается в любом материале при условии, что $\Delta d_1 < d_1$. На данном «стоп-кадре» она соответствует такой энергии

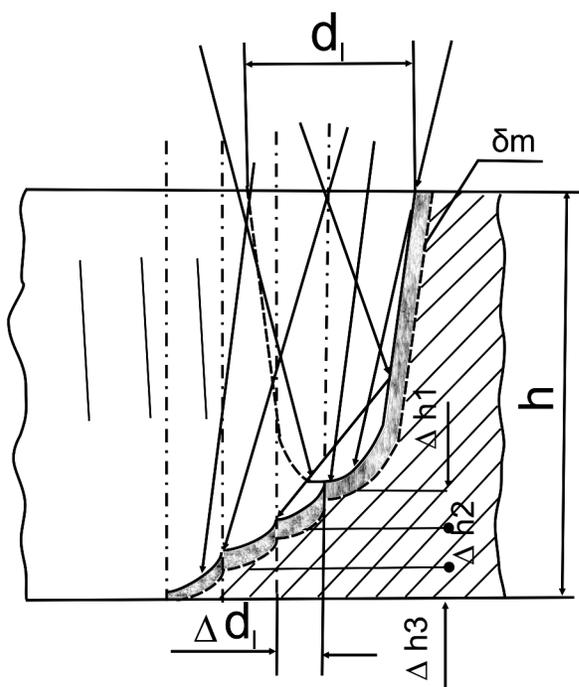


Рис. 1.3. Продольная форма реза [1]

и длительности импульса, при которых образование сквозного фронта происходит от действия излучения четырех последовательных импульсов.

Аналогичная форма фронта реза образуется в любом материале, поскольку при выполнении $\Delta d_1 < d_1$ прирост глубины Δh_n производится суммарным воздействием излучения n импульсов. Происходит это как прямым поступлением части излучения последнего импульса в придонную зону вновь формируемой им поверхности фронта, так и за счет его отражения от нее в направлении придонных зон нескольких до того изготовленных фронтов.

Чем меньше величина Δd_1 , тем излучение большего числа импульсов, производящих абляцию из объема последующего фронта реза шириной ΔS_d , отмеченной на рис. 1.4а штриховкой, участвует в углублении предшествующих фронтов и зоны термического влияния на их боковых поверхностях. Их число зависит от объема материала, удаляемого из объема шириной ΔS_d и глубиной h , и плотности мощности на ΔS_d . Потому в связи с выбранной энергией и длительностью импульсов значение n может находиться в пределах от 1 до n_1 .

Ориентиром для определения числа импульсов n_i и их параметров, образующих сквозной рез, является то их число $n_{ор}$, энергия и длительность которых необходимы для сверления с максимальной скоростью отверстия глубиной h и диаметром, равным примерно ширине реза. Если сквозной рез образуется за существенно большее, чем $n_{ор}$, число последовательных импульсов, то следует повышать их энергию.

И все же при резании металлов, за исключением особо тонких, получается, что $n_i > n_{ор}$. Причины, определяющие возникновение данного неравенства, помогают понять рис. 1.4а, б.

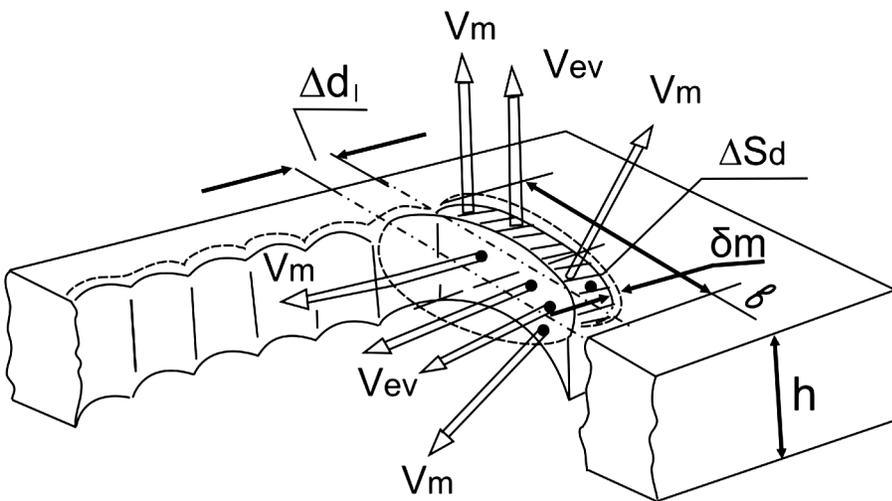


Рис. 1.4а. Абляция во фронтальной зоне реза [1]

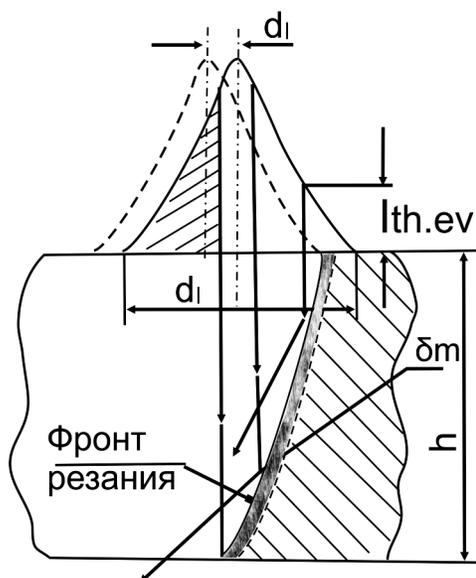


Рис. 1.4б. Прохождение излучения по фронту резания [1]

Абляция материала на фронте реза происходит как за счет испарения, показанного на рис. 1.4а стрелкой V_{ev} , так и удаления жидкой фазы, показанного стрелкой V_m , с поверхности слоя расплава δ_m , образующегося на его поверхности S_{cut} , избыточным давлением испарения. Величина избыточного давления зависит от усредненной плотности мощности W на S_{cut} . От чего зависит величина W на поверхности фронта, помогает понять объяснения к рис. 1.4б.

На рис. 1.4б над верхней поверхностью реза схематически показано гауссово распределение интенсивности излучения на d_l . Пунктирная кривая демонстрирует положение d_l и распределение на нем, предшествующее перемещению детали на расстояние, равное Δd_l . Сплошная кривая — после перемещения. Сплошная линия фронта резания соответствует положению d_l до перемещения. Пунктирная линия — после перемещения.

На поверхность фронта хотя и воздействует излучение с интенсивностью выше порога испарения ($I_{th.ev}$), но распределяется оно на площадь боковой поверхности S_{cut} , много большую площади d_l . Потому W на S_{cut} меньше, чем на поверхности d_l . С увеличением глубины фронта резания только одно данное снижение W уменьшает абляцию на его поверхности.

Но величина W на S_{cut} зависит и от потерь энергии излучения на отражениях от поверхности фронта, и от происходящих при этом поглощений на ней, и от экранирования на жидкой фазе. Все эти потери возрастают с увеличением h [1]. Дополнительные к ним потери возникают следующим образом. Поскольку $\Delta d_l < d_l$, часть излучения (на кривой распределения она заштрихована) проходит через рез насквозь, не производя абляции на его фронте. В зависимости

от того, как изменится интенсивность излучения по его распределению на d_1 , эти потери могут стать весьма ощутимыми, в особенности когда глубина реза $h \geq d_1$.

Суммарные потери определяют, что глубина слоя расплава δ_m , образующегося на S_{cut} , неравномерна по h . Понятно, что на большей глубине фронта она увеличивается из-за возрастающих потерь. Они же и являются причиной возникновения неравенства $n_i > n_{op}$. Вдобавок частичное поглощение излучения, происходящее при его отражении от поверхности фронта, поддерживает во времени высокую температуру металла на S_{cut} . Из-за теплоотвода от находящегося на S_{cut} слоя жидкой фазы за ней увеличивается глубина теплового поля с уровнем температуры, достаточным для изменения исходной структуры металла.

Часть удаляемой с поверхности фронта жидкой фазы попадает на боковую поверхность предшествующей зоны реза, поддерживая во времени ее нагрев вплоть до температуры плавления. Из экспериментальных исследований известно, что разлет жидкой фазы от фронта реза происходит, как показано на рис. 1.4а, во всех возможных направлениях: вверх, вбок и, если рез сквозной, вниз.

В результате такой «поддержки» в этой части реза может развиваться зона теплового влияния такой глубины, наличие которой, как отмечено в начале настоящего раздела, неприемлемо в большинстве случаев применения лазерного резания в тех технологиях изготовления изделий, в которых оно или наиболее эффективно, или является зачастую единственно возможным.

Поскольку при равных условиях обработки избыточное давление испарения на фронте реза понижено по сравнению с тем, которое возникает внутри просверливаемого отверстия, то и эффективность удаления жидкой фазы с него ниже. Та ее часть, которая удаляется вверх и вниз, образует на входе и в большей степени на выходе реза грат. Если он закален, то удалятся последующей механической обработкой.

Чем меньше ΔS_d (или, что является тем же самым, меньше Δd_1), тем меньше объем U_{ab} материала, который удаляется с S_{cut} . Но при этом, как несложно видеть на рис. 1.4б, возрастают потери энергии излучения, проходящего мимо поверхности фронта, что снижает плотность мощности на ней. Поэтому уменьшается избыточное давление испарения, что понижает эффективность удаления жидкой фазы. При этом за поверхностью S_{cut} увеличивается глубина зоны теплового влияния. Чревато это тем, что здесь, а также на расположенной на определенном расстоянии предшествующей части боковой поверхности реза образуются глубокие слои расплава δ_m , под которыми образуется зона термонапряжений. Наличие расплава искажает поперечную форму реза аналогично тому, как это происходит в отверстии при повышении частоты следования импульсов [1]. Тому же, как показано в подразделе 1.5, способствуют термдеформации.

Чем больше ΔS_d , тем больше объем U_{ab} материала, который должен быть удален с поверхности фронта. С учетом гауссова распределения интенсивности излучения на d_1 становится понятным, что при неизменной энергии импульса скорость съема материала из объема U_{ab} изменится. Для того чтобы понять, произойдет ли это в сторону увеличения или уменьшения, необходимо знать, какая часть излучения из гауссова распределения интенсивности будет производить абляцию на увеличенной поверхности ΔS_d . Без этого невозможно также разобраться в том, как изменится качество боковой поверхности реза. Невозможно также однозначно определить, увеличится или нет при этом глубина дефектного слоя на боковой поверхности реза и понизится ли производительность резания.

Для того чтобы об этих показателях резания можно было бы сделать хотя бы какие-то предположения, надо вдобавок учитывать следующие факторы. Первый из них — количество образующейся жидкой фазы зависит от интенсивности излучения в той части распределения по d_1 , которая попадает на увеличенное ΔS_d . Если она такова, что повысит избыточное давление испарения, то повысится эффективность удаления жидкой фазы. Тогда толщина дефектного слоя должна уменьшиться, а скорость резания — увеличиться. Но произойдет ли так или нет, можно установить только экспериментально, поскольку невозможно просчитать воздействия второго фактора.

Второй фактор — это потери на отражении, которые, как видно на рис. 1.4а, с увеличением ΔS_d становятся меньшими. (Меньшая часть отраженного излучения проходит в зону предыдущего положения фронта реза.) Поскольку при этом на S_{cut} повышается W , то на фронте реза толщина слоя δ_m должна стать меньше. Но нельзя быть в этом полностью убежденным, так как с увеличением ΔS_d ограничивается пространство, в которое удаляется жидкая фаза. От этого могут возрасти потери на экранировании. Кроме того, на возросшей поверхности фронта может остаться увеличенное ее количество, величина которого тоже не поддается расчету.

1.2.2. Математическая модель лазерного резания

Вышеизложенное означает, что оптимизация процесса резания, то есть обеспечение удовлетворительной его скорости и высокого качества, — достаточно сложная проблема. Дальнейшее изложение математического представления модели резания подтверждает такой вывод. Для ее упрощения предполагается, что образование сквозного фронта реза глубиной h происходит от действия излучения одного импульса.

В этом случае скорость лазерного резания V_c металла толщиной h определяется следующим образом. При скорости абляции V_{ab} , измеряемой обычно в кубических микронах за единицу времени, из объема U_{ab} фронтальной зоны

ΔS_d его удаление по всей толщине h произойдет за время, равное $t_s = U_{ab}/V_{ab}$. Значит, последующее перемещение детали на величину ΔS_d должно произойти не раньше, чем закончится t_s . Хотя в реальности перемещение может быть и непрерывным, такое допущение не вносит сколь-либо значимой погрешности, поскольку за время действия одного импульса деталь передвинется на расстояние, которое незначительно изменит величину U_{ab} . Например, при длительности импульса 400 мкс и типичной для этого случая скорости резания конструкционной стали толщиной 2 мм, не превышающей 10 м/мин, деталь сместится не более чем на 50 мкм.

Поскольку $V_c = \Delta d_1/t_s$, то связь между V_c и V_{ab} определяется соотношением

$$V_c = \Delta d_1 \cdot V_{ab} / U_{ab}. \quad (1.2)$$

При этом если на частоте следования импульсов F_i выполняется неравенство $1/F_i \leq t_s$, то на фронте резания сьем материала из-за незначительно увеличенного объема U_{ab} будет производиться не одним, а несколькими импульсами. Но так как перемещение между ними мало, то допустимо в соотношении 1.2 это увеличение не учитывать.

В разделе 2 показано, что при резании этой же стали непрерывным излучением в зависимости от его мощности скорость этого процесса может быть выше. В этом случае в соотношении 1.2 следует учитывать соответствующее тому увеличение объема U_{ab} .

Для качественного представления зависимости величины V_{ab} от процессов плавления и испарения, протекающих на фронте реза, можно использовать математическую модель, разработанную специалистами Манчестерского университета [4]. Качественным и упрощенным данное представление является уже потому, что в этой модели не учитываются:

- гауссово распределение интенсивности излучения по d_j ;
- экранирование излучения на жидкой фазе;
- потери энергии при отражениях и поглощениях на поверхности фронта;
- соответствующее этим потерям изменение толщины слоя жидкой фазы по глубине фронта реза и различие эффективности ее удаления на разных его глубинах.

Согласно этой модели уравнение съема материала из объема фронтальной зоны записывается в виде

$$dm_s/dt = dm_{ev}/dt + dm_m/dt, \quad (1.3)$$

где m_s — масса твердого материала, который будет удален из объема зоны фронта реза, ограниченного ΔS_d и h , m_{ev} — масса материала, испаряемого из этого объема, m_m — масса расплавленного материала, удаляемая из этого объема избыточным давлением испарения.

В этой модели принимается, что при установившемся режиме резания испарение происходит с поверхности слоя расплава толщиной δ_m и высотой h со скоростью V_{ev} , а избыточное давление испарения удаляет жидкую фазу из объема слоя δ_m со скоростью V_m . Тогда уравнение 1.3 с некоторыми упрощениями расчета объема слоя δ_m запишется в виде

$$V_{ab} = \rho_m V_{ev} / \rho + 2\rho_m \delta_m V_m / \rho r_1, \quad (1.4)$$

где ρ_m — плотность расплавленного материала, ρ — плотность твердого материала, r_1 — радиус светового пятна, на которое локализуется излучение.

Первое слагаемое правой части уравнения представляет составляющую скорости резания, образуемую испарением расплава. Второе слагаемое — составляющую скорости резания, образуемую удаляемым расплавом. При этом примерная величина δ_m определяется из соотношения

$$\delta_m \approx \alpha_T / V_{ab}, \quad (1.5)$$

где α_T — коэффициент температуропроводности. После подстановки 1.5 в 1.4 и решения квадратного уравнения получается, что

$$V_{ab} = 1/2 \{ \rho_m V_{ev} / \rho + [(\rho_m V_{ev} / \rho)^2 + 8 \rho_m K_m V_m / \rho r_1]^{1/2} \}, \quad (1.6)$$

где K_m — коэффициент теплопроводности расплава.

Скорость испарения зависит от температуры на поверхности расплава T_m и определяется следующим соотношением:

$$V_{ev} = c_0 \exp(-\ddot{u} / T_m), \quad (1.7)$$

где $\ddot{u} = (M_a L_{ev}) / (N_a K_b)$, M_a и L_{ev} — соответственно атомная масса и скрытая теплота испарения, N_a — число Авогадро, K_b — постоянная Больцмана, c_0 — константа, величина которой равна примерно скорости звука в твердой фазе.

Из соотношений 1.5 и 1.6 видно, что толщина слоя жидкой фазы δ_m находится примерно в обратно пропорциональной зависимости от скорости испарения на поверхности δ_m . Точнее говоря, от избыточного давления, которое создает это испарение. Но оно, как теперь понятно, существенно меньше того уровня, который реализуется при сверлении одиночного отверстия с диаметром, равным ширине реза. Потому уже только по этой причине при резании зона теплового влияния окажется глубже, чем при сверлении. Подача в рез ассистирующего газа, давление которого внутри него дополняет давление испарения, как будет показано далее, не обеспечивает существенного повышения эффективности эвакуации жидкой фазы со всей поверхности фронта реза.

Математическое представление модели, по крайней мере, показывает, что величину V_m невозможно рассчитать. Скорость удаления жидкой фазы может быть определена только экспериментально, например с помощью скоростной киносъемки. Но такая съемка позволит определить эту скорость только или

на входе, или на выходе реза. То, какова она внутри реза (а там она меньше, чем на входе, и больше, чем на выходе), остается при этом неизвестным. То есть результаты кино съемки не внесут того, что позволило бы многое не учитывающей модели стать все же пригодной для проведения численных расчетов. Не зная эту скорость, а также плотность расплава, невозможно рассчитать и величину V_{ab} .

В целом же рассмотренная модель является всего лишь введением в многогранную и сложную тематику лазерного резания. Ее особенности выявляются только экспериментальными исследованиями, анализ которых позволяет полнее понять закономерности процессов, протекающих в зоне резания. Только затем возможно будет найти пути решения проблем, возникающих при проведении этого процесса на каждом металле.

В дальнейшем тексте настоящего раздела используются и анализируются данные экспериментальных исследований процессов лазерного резания и сопутствующих им. Целью при этом является определение условий его проведения, позволяющих достичь максимальной производительности и лучшего качества. Изложение данной проблематики целесообразно начать с рассмотрения эффективности подачи на фронт реза ассистирующего газа.

1.3. Возможность удаления жидкой фазы потоком ассистирующего газа

Образующаяся на поверхности фронта жидкая фаза уменьшает производительность и глубину резания, ухудшает чистоту боковой поверхности реза и увеличивает глубину зоны теплового влияния под ней, приводит к образованию графа на его выходе. В связи с этим во всех лазерных технологических установках в целях удаления расплава на фронт реза через специальное сопло подается или сжатый воздух под давлением $P_0 = 8-16$ атм, или инертный газ с максимальным давлением, равным, согласно разным источникам, под давлением до $P_0 \approx 20-30$ атм.

Усилие удаления жидкой фазы с элемента (единицы) площади, развиваемое потоком ассистирующего газа, определяется соотношением

$$P_f = 0,5(c_f \rho u^2), \quad (1.8)$$

c_f — коэффициент, характеризующий сопротивление потоку газа на боковых поверхностях реза, являющийся функцией числа Рейнольдса, равного

$$R = (\rho u b / \mu), \quad (1.9)$$

где ρ — плотность газа, u — скорость прошедшего в рез потока газа, b — характерный размер ширины реза, μ — вязкость газа [5].

То есть скорость газового потока имеет определяющее значение для того, сколько эффективно он будет способствовать удалению с нее жидкой фазы с боковой поверхности отверстия или реза. Отсюда понятно, как важно обеспечение максимальной величины u . В связи с этим далее по тексту настоящего подраздела рассматриваются результаты теоретических и экспериментальных исследований, посвященных данной тематике.

1.3.1. Потери давления ассистирующего газа в зазоре между соплом и поверхностью металла

Понятно, что эти потери могут значительно уменьшить поток ассистирующего газа, проходящий на поверхность фронта реза, и, следовательно, ухудшить его показатели. Потому изначально следует рассмотреть, из-за чего они возникают и каковы их величины. Сделать это помогают схемы распределения потоков ассистирующего газа вне сопла, приведенные на рис. 1.5а, б.

Полное давление газового потока вдоль оси его истечения постоянно и равно сумме статической и динамической составляющих. Динамической составляющей давления допустимо пренебречь. Возможным это становится потому, что значимое влияние на прохождение ассистирующего газа по фронту, как показано в следующих частях данного подраздела, оказывает ударная волна, образующаяся в зазоре между соплом и поверхностью разрезаемого металла.

На выходе из сопла с проходным диаметром d_n газ ускоряется до локальной сверхзвуковой скорости. За соплом происходит адиабатическое расширение газа, давление которого p_c определяется из соотношения

$$p_c = P_0 (2/\gamma_{ad} + 1)^{\gamma(\gamma+1)}, \quad (1.10)$$

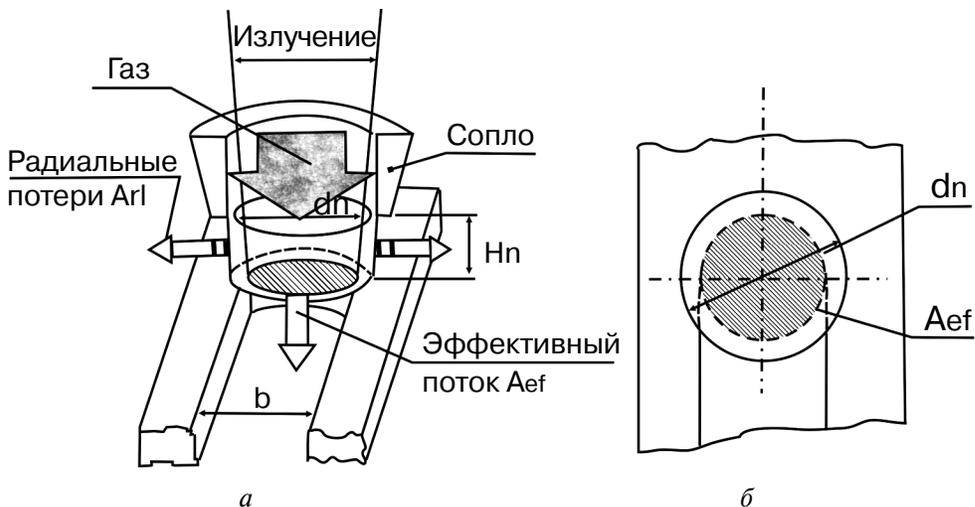


Рис. 1.5. Схема работы сопла [4]

где P_0 — давление газа внутри сопла, γ_{ad} — показатель адиабаты, равный для воздуха 1,4.

Оценка потерь давления при расширении газа вне сопла проводится с учетом площади части его потока, проходящего в рез шириной b , и площади другой части его потока, истекающего в радиальном направлении, ограниченного рабочей дистанцией H_n между соплом и резом [4]. Площадь проходящей в рез эффективной части потока (A_{eff}) показана на рис. 1.5б заштрихованной областью. Она ограничена размерами фронта и проекцией части окружности, диаметр которой равен выходному диаметру сопла. Площадь цилиндрической поверхности, через которую другая часть потока истекает в радиальном направлении, равна

$$A_{rl} = \pi d_n H_n. \quad (1.11)$$

Величина давления в эффективной части потока, определяемая из уравнения непрерывности потока, равна

$$p_{eff} = p_c A_{eff} / (A_{eff} + A_{rl}) = f(P_0). \quad (1.12)$$

Совместно соотношения 1.10 и 1.11 показывают, что для увеличения p_{eff} необходимо уменьшать выходной диаметр сопла d_n и его рабочую дистанцию H_n . Однако хорошо известный из практики факт ограничивает возможность использования и того и другого. Дело в том, что при $d_n < 1$ мм и $H_n < 1$ мм выходное отверстие сопла быстро засоряется продуктами, удаляемыми из зоны обработки. Скорость засорения зависит от глубины реза и теплофизических свойств обрабатываемого материала.

Технически возможно многократно увеличить давление P_0 сжатого воздуха или иного газа внутри сопла и за счет этого повысить p_{eff} . Но и здесь существуют ограничения физического происхождения. При $P_0 > 0,3$ МПа скорость потока газа начинает превышать скорость звука. В этом случае от поверхности разрезаемого материала отходит скачок уплотнения (ударная волна), который ограничивает скорость газа внутри реза [6]. Поэтому, как считают авторы цитируемого источника, не имеет смысла повышать давление внутри сопла более 0,3 МПа (~ 3 кг/см²). Но данное утверждение не учитывает, что не только скачок уплотнения влияет на прохождение ассистирующего газа по фронту реза. В следующих частях настоящего подраздела показано, что наличие скачка не является столь значимым фактором, чтобы не повышать P_0 . К этому следует добавить, что подтверждается это практикой зарубежных фирм, производящих качественное резание металлов при подаче ассистирующего газа в сопло под давлением до 20–30 кг/см². Почему это необходимо делать, показано экспериментально и объяснено в разделе 2.

Внесет ли увеличение P_0 существенное повышение эффективности удаления жидкой фазы, можно оценить из соотношения, связывающего зависимость V_m от давления на фронте реза:

$$p_{ev} + p_{eff} = 1/2 \cdot \rho_m \cdot V_m^2, \quad (1.13)$$

где p_{ev} — давление испарения на фронте [4].

Для того чтобы произвести оценку, за основу следует, во-первых, принять то, что при сверлении отверстия давление испарения внутри канала достигает 100 кг/см^2 [10]. Во-вторых, то, что при резании только из-за потерь излучения на отражении, показанных на рис. 1.4, давление испарения на поверхности фронта будет значительно ниже. К этому еще следует добавить потери излучения из-за его экранирования на жидкой фазе.

Поскольку невозможно подсчитать величину этих потерь, приходится произвести их приблизительную оценку. Ее можно сделать, исходя из того, что, несмотря на их наличие, испарение, как показано в подразделе 1.3, сохраняется в верхней и средней зонах поверхности фронта реза. Далее следует учесть, что при использовании для резания лазера мощностью 2 кВт величина плотности мощности светового пятна локализации излучения с типичным диаметром $d_1 = 200 \text{ мкм}$ равна $W = 6,7 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$. Поскольку данная величина W примерно в три раза больше порога испарения большинства металлов, то из этого следует, что плотность мощности на поверхности указанных зон, расположенных до дросселирующего канала (см. рис. 3.7), понизилась не более чем в три раза. Во столько же раз уменьшилась и величина p_{ev} [1]. То есть здесь $p_{ev} \leq 30 \text{ кг/см}^2$. А за этим каналом величина p_{ev} много меньше 30 кг/см^2 .

Демонстрационный расчет p_{eff} по соотношению (1.12) можно сделать, приняв $H_n = 0,5 \text{ мм}$, $d_n = 1,2 \text{ мм}$ и $b = 0,25 \text{ мм}$. Такая величина ширины реза типична для применений резания металлов, производимого при $d_1 = 200 \text{ мкм}$. При этих условиях получается, что $A_{eff} = 0,049 \text{ мм}^2$, а $A_{П} = 1,88 \text{ мм}^2$. Расчет, проведенный по соотношениям 1.10 и 1.12, показывает, что при $P_0 = 16 \text{ кг/см}^2$ и при этих величинах A_{eff} и $A_{П}$ давление прошедшего в рез потока равно $p_{eff} \approx 10 \text{ кг/см}^2$.

Почему в реальности величина давления на поверхности металла примерно в четыре раза превышает подаваемое в сопло давление assistирующего газа, объяснено в последующей части настоящего подраздела. Если учесть это обстоятельство, то величина эффективного давления в резе будет равна $p_{eff} = 40 \text{ кг/см}^2$. Тем не менее из-за потерь давления в потоке этого газа, возникающих при его прохождении по поверхности фронта, такая прибавка к p_{ev} , меньшему 30 кг/см^2 , не в состоянии значимо повысить эффективность удаления жидкой фазы, скопившейся в дросселирующем канале и за ним. Проявляется это в том, что не происходит увеличения скорости и глубины резания, улучшения чистоты боковой поверхности реза и предотвращения образования грата на его выходе. Отсюда понятно, сколь важно понизить величину радиальной части потока assistирующего газа и увеличить P_0 .

Повышенную эффективность удаления жидкой фазы с поверхности фронта реза обеспечивает двухструйное сопло, геометрия которого показана на рис. 1.6.

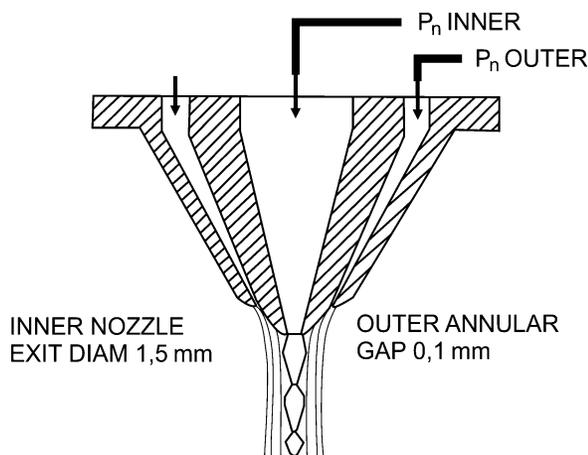


Рис. 1.6. Геометрия двухструйного сопла [1]

Как видно из примеров, приведенных на рис. 1.7а, б, использование такого сопла радикально улучшает чистоту боковой поверхности реза. Получается это за счет того, что поток газа, выходящий из центрального проходного отверстия диаметром этого сопла, равным, например, 1,5 мм (inner nozzle exit diam), окружен потоком газа, истекающим из щелевого кольцевого контура (outer annular gap). Его диаметр превышает диаметр центрального потока на несколько миллиметров. Составляющая скорости его расширения направлена радиально и по отношению к оси сопла. Таким образом ограничиваются потери давления, возникающие из-за расширения центрального потока. Газ во внутреннюю часть сопла (inner) подается под давлением 7 атм, в наружную (outer) — под давлением 3,5 атм. Сопло устанавливается на расстоянии 4–5 мм над поверхностью детали [1].

Как выбирается двухструйное сопло серии НК для резания конкретного металла, рассматривается в разделах 2 и 3. Но не только это определяет

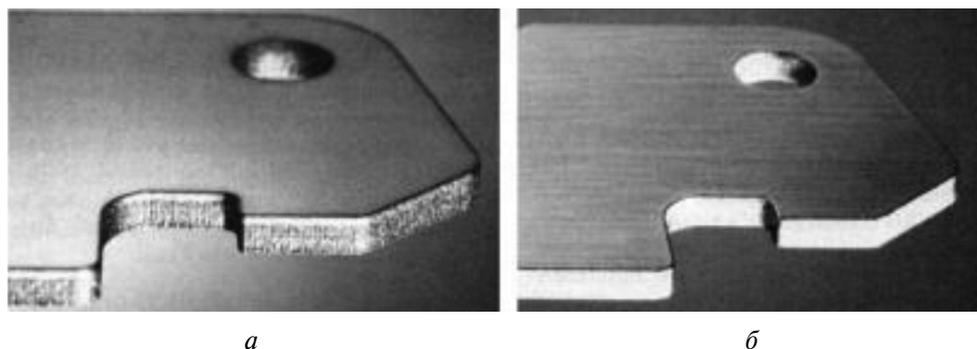


Рис. 1.7. Качество боковой поверхности реза в нержавеющей стали толщиной 2 мм [1]. (а) Рез изготовлен с использованием одноструйного сопла. (б) Рез изготовлен с использованием двухструйного сопла

прохождение потока ассистирующего газа по поверхности фронта реза. Оно зависит также и от тех процессов, которые развиваются в зазоре при условии, что газ истекает из сопла со сверхзвуковой скоростью. Эти процессы рассматриваются в трех последующих частях настоящего подраздела.

1.3.2. Зависимость массы прошедшего через рез потока ассистирующего газа от структуры ударной волны

Важным показателем истечения газовой струи из сопла любой конструкции, влияющим на качество реза, является то, происходит ли оно или нет со сверхзвуковой скоростью. Если отношение давления P_0 внутри сопла к окружающему его атмосферному давлению P_a превышает $P_0/P_a > 1,89$, то поток из него будет истекать со сверхзвуковой скоростью [7].

При такой скорости истечения потока в результате его отражений от атмосферного воздуха образуется ударная волна. Происходит это сразу за кромкой сопла, а далее ударная волна развивается, как показано на рис. 1.8, в форме

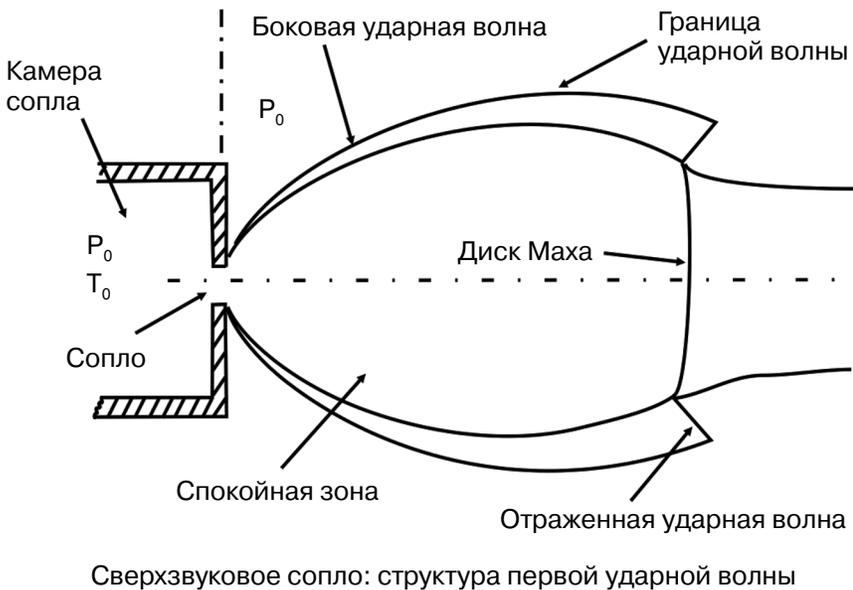


Рис. 1.8. Образование ударной волны в сверхзвуковом потоке [7]

«бочки», в конце которой образуется зона **уплотнения газа**, называемая диском Маха.

Из-за отражений боковой ударной волны от окружающего воздуха за первым диском Маха образуется вторая «бочка», аналогичная по форме первой, и второй диск Маха. И далее подобная структура несколько раз повторяется. Необходимость последующего рассмотрения определяется тем, что структура ударной волны меняется с изменением величины P_0/P_a [7].

Для объяснения того, как структура ударной волны влияет на процесс резания, следует обратиться к результатам теоретических и экспериментальных исследований, в том числе и по измерению массы газа, прошедшего через рез, проведенных в Колумбийском университете (США) [7].

Предваряя рассмотрение результатов этих исследований, следует выделить важную для практики особенность их проведения. А именно то, что все они по необъяснимой причине проводились при подаче ассистирующего газа в сопло под давлением не более 5 атм. По необъяснимой причине потому, что из практики было известно, что для резания металлов толщиной от 0,5 мм и более ассистирующий газ подается в сопло под давлением от 8 атм до в несколько раз большего. Тем не менее результаты этой работы важны показом следующего обстоятельства. А именно того, что при увеличении давления от 8 атм и более процессы в зазоре между соплом и поверхностью металла могут развиваться иначе.

Влияние ударной волны на величину давления на поверхности детали зависит в том числе **от расстояния между ней и соплом**. Какова эта зависимость, демонстрирует кривая на рис. 1.9.

Воздух подается в сопло под давлением 260 кПа (~2,6 атм) и вытекает из него через проходное отверстие диаметром, равным $d_n = 1,5$ мм. На расстоянии от сопла до поверхности детали, находящемся в пределах до ~0,6 мм, давление на ней (а не в резе) постоянно и равно 280 кПа. При увеличении расстояния примерно до 2,7 мм оно быстро уменьшается до минимального уровня. Затем оно мгновенно повышается до ~240 кПа и сохраняется таковым до расстояния, равного ~3,2 мм. После этого оно вновь циклично падает и увеличивается. На расстоянии от сопла до детали, равном ~5 мм, оно достигает 250 кПа и остается на этом уровне на расстоянии еще ~0,4 мм. Далее при сохраняющейся цикличности максимальный уровень давления остается примерно таким же, а минимальный постепенно увеличивается и достигает 180 кПа на расстоянии между соплом и деталью, равном 8,5 мм.

Данная цикличность соответствует показанной на рис. 1.8 структуре ударной волны, образующейся при указанном давлении в сопле. Когда поверхность детали оказывается в ее спокойной зоне, то давление на ней повышается. Если она попадает в зону диска Маха, то давление на ней резко снижается, поскольку через уплотнение проходит меньшее количество ассистирующего газа.

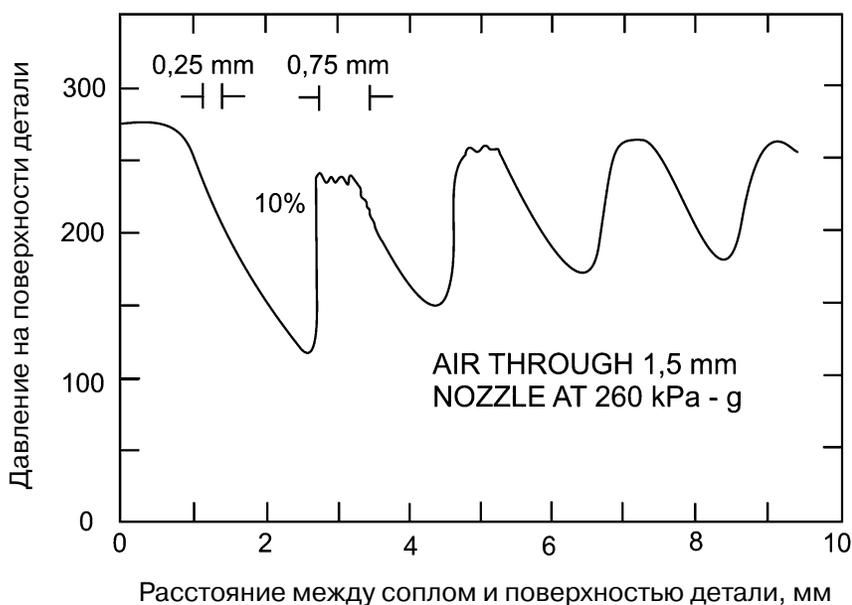


Рис. 1.9. Давление на поверхности детали в зависимости от расстояния между ней и соплом [7]

Наиболее длинный участок максимального и стабильного давления находится в пределах 0–0,5 мм. Но располагать сопло столь близко от поверхности детали чревато его относительно быстрым засорением продуктами испарения и жидкой фазой. Засорение будет происходить значительно медленнее, если сопло установить на расстоянии, равном 5 или 7,5 мм от поверхности детали. При этом на расстоянии от 5 до 10 мм максимум давления на поверхности детали снижается примерно на 10% относительно к давлению на участке 0–0,5 мм. Данная ситуация сложилась скорее всего потому, что радиальному расширению сверхзвукового потока в зоне 5–10 мм из-за сниженного давления **в уплотнениях на его боковой границе** уже способен препятствовать окружающий воздух. Но, как показывает рассмотрение, проведенное в следующих частях данного подраздела, невозможно быть уверенным в том, что при этом повысится или понизится эффективность удаления из реза жидкой фазы.

Из того же рассмотрения становится понятным, что при увеличении давления в сопле до 8–16 атм ход графика, показанного на рис. 1.9, может существенно измениться. То есть для его построения придется получить новые данные, для чего потребуется стенд с соответствующим оборудованием. Но приведенный выше пример использования двухструйного сопла, устанавливаемого над поверхностью металла на 4–5 мм, показывает, что провести эти исследования целесообразно.

Направленность следующих исследований, проводимых в Колумбийском университете, основывалась на том, что структура ударной волны определяется величиной отношения P_0/P_a . В связи с этим целью исследований являлось теоретическое и экспериментальное изучение влияния величины этого отношения на поток газа, проходящий через отверстие глубиной 2 мм. Их результатом стали демонстрируемые на рис. 1.10 графики зависимости массы воздуха (m_h), прошедшего через это отверстие в единицу времени, от давления на поверхности детали. (Если бы указывалось давление в сопле, то этот эксперимент не был бы связан с предыдущим.) Расчетные и экспериментальные данные для этих графиков получены при использовании сопла с диаметром проходного отверстия, равным $d_n = 0,7$ мм, расположенного над поверхностью детали на расстоянии, равном $H_n = 1$ мм и $H_n = 2$ мм.

Сравнение графиков на рис. 1.9 и 1.10 выявляет различие в прохождении воздуха через отверстие при использовании сопел с проходным диаметром $d_n = 1,5$ мм и $d_n = 0,7$ мм. При давлении в сопле с $d_n = 1,5$ мм, равным 260 кПа, на расстоянии его расположения над деталью $H_n = 0,6$ мм, как отмечено выше, начинается спад давления на поверхности детали, что **снижает массу воздуха**, прошедшего через рез. Снижение продолжается при увеличении H_n до 2,7 мм. А при использовании сопла с $d_n = 0,7$ мм, расположенного над деталью на расстоянии

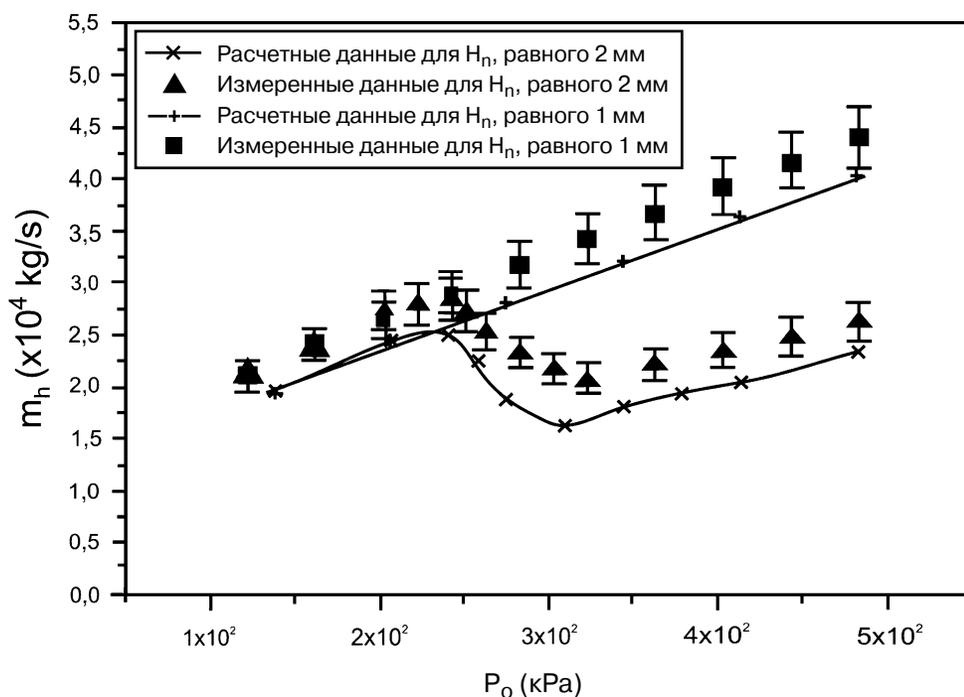


Рис. 1.10. Зависимость массы газа $m_h(\times 10^4$ kg/s), прошедшего через отверстие, от давления в сопле P_0 (кПа) [7]

$H_n = 1$ мм, при том же давлении воздуха в нем, как видно на рис. 1.10, измеренная масса воздуха, прошедшего через рез, не снижается.

На расстоянии между этими соплами и деталью, равном $H_n = 2$ мм, отмеченного различия нет. При использовании обоих сопел величина расчетной массы, прошедшей через их отверстие при давлении в них 260 кПа, приблизилась к минимальной. На рис. 1.9 видно, что на этом расстоянии при использовании сопла с $d_n = 1,5$ мм давление на входе в рез приближается к минимальному. При этом и масса воздуха, прошедшего через рез, станет минимальной.

Вероятно, что отмеченное различие определяется величинами диаметров проходного отверстия сопла, что отражается на структуре ударной волны. Получается так, что уменьшение размера d_n при $H_n = 1$ мм приводит к отсутствию спада величины m_h в диапазоне изменений давлений в сопле от $1,5 \cdot 10^2$ до $5,5 \cdot 10^2$ кПа. Более того, в этом диапазоне величина m_h равномерно увеличивается до $4 \cdot 10^4$ кг/сек. Соответственно этому повысится эффективность удаления жидкой фазы с поверхности отверстия.

При $H_n = 2$ мм в соответствующем на рис. 1.10 графике имеется минимум, за которым m_h медленно повышается с ростом давления. При максимальном давлении $5 \cdot 10^2$ кПа величина m_h достигает $2,5 \cdot 10^4$ кг/сек. Но примерно такая же ее величина реализуется при давлении, равном примерно $2,3 \cdot 10^2$ кПа. То есть при увеличении на 1 мм расстояния между деталью и соплом с $d_n = 0,7$ мм, давление в котором не превышает 5 атм, эффективность удаления жидкой фазы в диапазоне давлений от $2,5 \cdot 10^2$ до $5 \cdot 10^2$ кПа понижается по сравнению с той, которая реализуется при $H_n = 1$. Но засорение сопла будет происходить медленнее. Подтвердятся ли данные результаты при использовании сопла с $d_n = 1,5$ мм или иным размером d_n , могут показать только такие же измерения, которые потребовались для построения графиков на рис. 1.10.

Для того чтобы стало понятным, почему увеличение P_0/P_a при $H_n = 2$ мм приводит к колебаниям величины m_h , следует коротко изложить, как изменяется структура сверхзвукового потока по глубине отверстия. Для этого ниже рассматриваются результаты математического моделирования, представленные в работе [7].

Здесь же следует обратить внимание на то, что данные экспериментальных исследований, приведенные в работе [7], показывают, что лучшие показатели резания на глубину 2 мм, проводимого в среде воздуха или инертного газа, при давлении, не превышающем 5 атм, реализуются подбором расстояния между соплом и поверхностью детали. Применительно к резанию на большую глубину, проводимому в зависимости от свойств обрабатываемого металла с давлением в сопле до 20–30 атм, это означает необходимость подбора оптимальных величин как диаметра сопла, так и его расположения относительно поверхности детали. В этом случае целесообразно провести измерения, аналогичные

тем, которые потребовались для построения рассмотренных выше графиков. Их количество позволяет уменьшить использование эмпирической формулы для расчета дистанции (X_M) от сопла до первого диска Маха. Она такова:

$$X_M = 0,67d_n (P_0/P_a)^{1/2}. \quad (1.14)$$

И все же для того чтобы понять, чем определяется эффективность удаления жидкой фазы с поверхности фронта реза и можно ли ее повысить, следует обратиться к более подробному рассмотрению того, что происходит в сверхзвуковом потоке газа в зазоре между соплом и поверхностью детали и как это влияет на поток в отверстии.

1.3.3. Математическое моделирование профиля статического давления в зазоре между соплом и поверхностью изготавливаемой детали и в зоне обработки

В основу нижеприведенного текста положены результаты математического моделирования сверхзвуковой струи в зазоре между соплом и поверхностью обрабатываемой детали, проведенного специалистами Калифорнийского университета. Эта работа позволила выявить **две принципиально важные для практики особенности формирования профиля и величины статического давления в сверхзвуковой струе в зазоре** и показать, как это отражается на прохождении потока ассистирующего газа внутри обрабатываемого отверстия и как влияет на качество обработки [7].

Прежде чем перейти к их рассмотрению, следует остановиться на принятых для моделирования условиях. Оно проводится для обработки отверстия в детали толщиной 1,6 мм с использованием сопла с проходным диаметром $d_n = 0,711$ мм. То, что происходит в сверхзвуковой струе, рассматривалось при величине зазора между соплом и деталью, равного $H_n = 2$ мм, и величинах давления в сопле, равных $P_a = 207$ кПа и $P_a = 276$ кПа. На рис. 1.11а, б приведены профили статического давления в зазоре и внутри обрабатываемого отверстия, полученные для двух различных уровней давления при $H_n = 2$ мм. Эти рисунки в том числе помогают понять, какие процессы обусловили данные, приведенные в виде графиков на рис. 1.10. Причина, порождающая эти процессы и их суть, становится понятной из последующего рассмотрения.

Для рассмотрения того, что демонстрируют рис. 1.11а, б, следует представить терминологию, используемую в цитируемой работе. Ударную волну, образующуюся при истечении сверхзвукового потока из сопла, ее авторы называют «нормальной ударной волной». После того как она отражается от поверхности детали, ее называют или «отклоненной», или «инцидентной» ударной волной.

Рис. 1.11а, б демонстрирует изменения в структуре ударной волны в зазоре и в обрабатываемом отверстии, произошедшие с увеличением давления в сопле