

ПОЛУЧЕНИЕ ЗАГОТОВОК АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКОЙ

Л. А. Павеле,
А. А. Протопопов



«Инфра-Инженерия»

Л. А. Павеле, А. А. Протопопов

ПОЛУЧЕНИЕ ЗАГОТОВОК АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКОЙ

Учебник

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2019

УДК 621.791.94
ББК 30.61
П12

Рецензенты:

директор ООО НПП «Вулкан-ТМ» д. т. н., проф., *В. И. Золотухин*;
директор ООО ПФ «Тулапроцесс» к. т. н., доц. *Э. С. Решетько*

Павеле, Л. А.

П12 Получение заготовок автоматизированной термической резкой : учебник / Л. А. Павеле, А. А. Протопопов – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. – 236 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0366-5

Систематизирован опыт различных отраслей промышленности и крупнейших производителей оборудования для термической резки. Проанализированы прогрессивные способы разделения материалов, предложены критерии для проведения их сравнительной оценки. Рассмотрены физико-химические особенности кислородной, плазменной, лазерной и гидроабразивной резки, а также гибридных способов разделения материалов. Предложен анализ расчетных методик, компьютерных моделей и программного обеспечения для выбора параметров лазерной резки.

Для студентов и аспирантов, специализирующихся в области сварочного и заготовительного производства, а также для инженерно-технических работников промышленных предприятий, технологических и проектных институтов.

УДК 621.791.94
ББК 30.61

ISBN 978-5-9729-0366-5

© Павеле Л. А., Протопопов А. А., 2019
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2019
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СПОСОБАХ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ	7
1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ	7
1.2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ	11
1.2.1. Кислородная резка	11
1.2.2. Плазменная резка	18
1.2.3. Лазерная резка	26
1.2.4. Гидроабразивная резка	29
1.2.5. Резка комбинированными источниками энергии	30
1.3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	35
2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ	45
2.1. ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ	46
2.2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ БАЛАНС МОЩНОСТИ	47
2.3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ФОКУСИРОВКА И ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ	52
2.3.1. Распространение и фокусировка лазерного излучения	52
2.3.2. Поглощение излучения	56
2.4. ДИНАМИКА ТЕЧЕНИЯ ПЛЕНКИ РАСПЛАВА ПРИ РЕЗКЕ НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	63
2.4.1. Металл толщиной до 10 мм	63
2.4.2. Металл толщиной свыше 10 мм	67
2.5. ГАЗОДИНАМИКА ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ГАЗА	70
2.6. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РЕЗКЕ В КИСЛОРОДЕ И АЗОТЕ	75
2.6.1. Резка в азоте	75
2.6.2. Резка в кислороде	76
2.7. МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ РЕГУЛЯРНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ СТЕНОК ПРИ РЕЗКЕ НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	80
2.8. ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	85
3. КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ	91
3.1. ОБЗОР ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА	91
3.1.1. Гидростатические (стационарные) тепловые модели	92
3.1.2. Теплогазогидродинамические модели	94

3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	100
3.2.1. Имитация в промышленности	100
3.2.2. Моделирование в образовании	106
4. ТОЧНОСТЬ И КАЧЕСТВО ЗАГОТОВОК	
ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ	109
4.1. КИСЛОРОДНАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ РЕЗКА	109
4.2. ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА	113
4.3. ГИДРОАБРАЗИВНАЯ РЕЗКА	114
5. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССА.....	116
5.1. КИСЛОРОДНАЯ РЕЗКА	116
5.2. ПЛАЗМЕННАЯ РЕЗКА.....	123
5.3. ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА.....	135
5.4. ГИДРОАБРАЗИВНАЯ РЕЗКА	146
6. ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА	149
6.1. КИСЛОРОДНАЯ РЕЗКА	149
6.1.1. Классификация оборудования.....	149
6.1.2. Портальные машины	150
6.1.3. Портально-консольные машины	160
6.1.4. Шарнирные машины.....	163
6.1.5. Переносные машины	164
6.1.6. Резаки	169
6.2. ПЛАЗМЕННАЯ РЕЗКА.....	171
6.2.1. Классификация и виды оборудования	171
6.2.2. Оснастка.....	184
6.3. ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА.....	187
6.3.1. Классификация оборудования.....	187
6.3.2. Состав лазерных технологических комплексов (ЛТК).....	188
6.3.3. Специализированные и специальные ЛТК	190
6.3.4. Универсальные ЛТК	190
6.4. ГИДРОАБРАЗИВНАЯ РЕЗКА	224
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	228

ВВЕДЕНИЕ

*Все должно быть изложено так просто,
как только возможно, но не проще.*

Альберт Эйнштейн

Термическая резка в современном мире производственных технологий занимает одно из значимых мест, благодаря ряду преимуществ, обусловленных ее способом. Эта гибкая технология достаточно точно и быстро реагирует на технические, научные и экономические изменения и быстро адаптируется к новым требованиям.

Традиционное разделение на резку термическим и механическим воздействием не отражает сложившуюся ситуацию на рынке технологий: разработку и стремительное внедрение в производство гибридных технологических процессов разделения материалов (лазер + плазма, лазер + кислород и т.д.), развитие технологии гидрорезки, разработку оборудования нового поколения, сочетающего в себе несколько технологий (например, комбинацию «лазер – пресс») и т.д.

Сложившаяся ситуация требует подкрепления теоретической базой. Поэтому в настоящем учебнике с современных позиций проанализированы и классифицированы способы разделения материалов, предложены критерии для проведения их сравнительной оценки. Рассмотрены физико-химические особенности способов термической резки, как традиционных и широко используемых, так и новых, которые только «завоевывают» рынок.

Большое внимание в учебнике уделяется процессу лазерной резки, так как лазерная обработка материалов – это одна из технологий, определяющих уровень производства в промышленно развитых странах. В учебнике приведены основные принципы выбора энергетических, оптических и газогидродинамических параметров лазерной резки. С современных позиций нестационарного движения расплава в канале реза под действием сверхзвуковой струи газа с учетом неоднородности его течения рассматривается процесс бороздообразования боковых стенок реза.

Развитие компьютерной техники сделало возможным решение таких задач, которые раньше не решались при проектировании технологии из-за большого объема вычислений. В настоящей работе изложены новые подходы к проектированию технологии лазерной резки. Проведен анализ существующих расчетных методик, компьютерных моделей и программного обеспечения для проектирования технологии лазерной резки. Как известно, компьютерное моделирование технологических процессов в настоящее время особенно актуально. Автором представлен также собственный опыт компьютерного моделирования лазерной резки и его результаты, на основании которых разработаны технологические рекомендации по выполнению высокопроизводительной и высококачественной резки.

Анализ точности и качества заготовок, получаемых различными способами термической резки, является первостепенным для оптимизации технологических

процессов. В учебнике представлена оценка указанных параметров по Российским и Международным стандартам.

В работе рассмотрены также технологии выполнения кислородной, плазменной, лазерной и гидроабразивной резки, а также технологические рекомендации, составленные на основе анализа и систематизация опыта применения термической резки на российских и зарубежных предприятиях и собственных исследований автора. Проведен обзор состояния разработок и выпуска отечественного и зарубежного промышленного технологического оборудования для термической резки.

Учебник дает возможность заинтересованному читателю изучить основы термической резки, научить ориентироваться в требованиях, предъявляемых к производственным технологиям и соответственно к квалификации специалистов на современном рынке. Настоящая работа может быть использована для изучения и исследования процессов лазерной обработки материалов, связанных с глубоким проникновением лазерного луча в материалы, таких как лазерная резка, лазерная сварка с глубоким проплавлением, лазерное сверление и т.д.

Материал учебника апробирован при чтении лекций, проведении лабораторных работ по дисциплинам:

- «Технология конструкционных материалов» (для направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 27.03.01 «Стандартизация и метрология», 27.03.02 «Управление качеством», 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов», 17.05.02 «Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное оружие», 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов», 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей»);
- «Оборудование машиностроительных производств» (для направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение», профиль «Оборудование и технология сварочного производства»);
- «Технологическая подготовка сварочного производства» (для направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение», профиль «Оборудование и технология сварочного производства»);
- «Конструкторско-технологическая подготовка сварочного производства» (для направления подготовки 15.04.01 «Машиностроение», профиль «Машины и технология сварочного производства»).

Учебник рекомендуется для специалистов в области заготовительного производства, а также для инженерно-технических работников промышленных предприятий, технологических и проектных институтов. Может быть полезным для студентов, магистрантов и аспирантов, специализирующихся в указанной области.

Авторы благодарят директора АО «Интерсварка» (г. Тула) **А. В. Волкова** за предоставление материалов по оборудованию.

Замечания и пожелания просьба высылать по адресу e-mail: la_pavele@mail.ru

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СПОСОБАХ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ

1.1. Классификация способов и области применения

Процесс резки заключается в разделении целого на части или же в получении деталей определенной формы из исходного материала с целью их дальнейшей механической обработки и получения конечного продукта.

По принятой в технической литературе классификации существует два основных способа разрезания металлических и неметаллических материалов:

- **резка механическим воздействием:** разрезание ножницами, фрезерование, сверление, штамповка, пиление и т.д.
- **резка термическим** (электрохимическим, электрофизическим и физико-химическим) **воздействием:** кислородная, кислородно-флюсовая, электродуговая, плазменная, лазерная.

Некоторые способы резки, например, такие как электродуговая, морально устаревают и применяются в единичных случаях. Им на смену приходят новые современные технологии разделения материалов, которые из экзотических быстро становятся незаменимыми для большинства предприятий. В связи с постоянным совершенствованием существующих и разработкой новых технологий разделения материалов понятие «*термическая резка*» в технической литературе все чаще заменяется современным более точным определением – «*резка струей...*»: В соответствии с изложенным подходом рассмотрим различные способы разделения материалов, как «резку струей»:

- кислородная резка: струей кислорода (иногда с добавлением порошка железа);
- плазменная резка: плазменной струей (потоком ионизированных частиц);
- резка лазером: потоком светящихся частиц (фотонов);
- резка водой: струей воды под очень высоким давлением (иногда с добавлением абразива). В этой технологии отсутствует термическое воздействие на разрезаемый материал. И в связи с принятой классификацией рассмотрим этот способ разделения материалов, как «резку струей».

Фундаментальное различие механического и термического способов резки заключается в том, что при термическом воздействии абсолютно исключен факт применения силы, независимо от толщины разрезаемого материала. То есть, термический способ можно назвать «*бесконтактным*», и, рассматривая явления, происходящие в зоне взаимодействия *струи-деталь*, в качестве режущего инструмента будем подразумевать струю газа, ионов, воды и т.д.

В зависимости от вида формоизменения обрабатываемой заготовки различают разделительную и поверхностную резку. При *разделительной резке* (рис. 1.1. а) результатом обработки является относительно узкий сквозной прорез на всю толщину металла, а при *поверхностной резке* (рис. 1.1. б) производится сжигание или расплавление металла лишь на поверхности заготовки на относительно небольшую глубину с одновременным удалением жидкого окисла или расплава посредством сдувания струей газа.

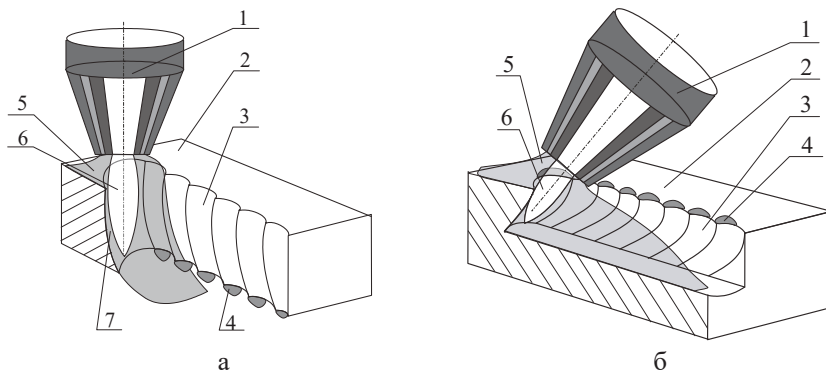


Рис. 1.1. Пример разделительной (а) и поверхностной (б) кислородной резки:

1 – мундштук; 2 – заготовка; 3 – поверхность реза; 4 – грат;
5 – подогревающая пламя; 6 – режущее пламя; 7 – фронт резки

В таблице 1.1 приведены основные способы резки струей, их преимущества, недостатки и области применения. Четких границ между областями применения различных способов резки струей не существует, и поэтому при их определении должна производиться комплексная технико-экономическая оценка эффективности способа резки для каждого конкретного случая.

Таблица 1.1
Основные способы резки струей

Способы резки	Достоинства	Недостатки	Области применения
Кислородная	• диапазон толщин 3 – 1000 мм; • низкая стоимость оборудования и его простота; • возможность резки одновременно несколькими горелками	• резка только углеродистых и низколегированных сталей • широкий разрез; • значительная зона термического влияния; • невысокая точность получаемых заготовок;	• резка углеродистых и низколегированных сталей; • прямолинейная и криволинейная резка заготовок различной формы из листового проката в диапазоне толщин 3 – 1000 мм;

Продолжение таблицы 1.1

Способы резки	Достоинства	Недостатки	Области применения
Кислородная		ухудшение санитарно-гигиенических характеристик процесса	- одно- и двухсторонняя разделка кромок сварных швов; - вырезка дефектных участков сварных швов, обрезка технологических планок
Кислородно-флюсовая	То же	То же	резка заготовок из хромоникелевых и коррозионно-стойких сталей толщиной до 450 мм, чугуна, цветных металлов и сплавов
Плазменная	- диапазон толщин 0,4 – 150 мм; - высокая скорость резки; - стабильность качественных показателей; - малая зона термического влияния; малое количество грата; малые деформации разрезаемого металла	- низкая скорость резки толщин свыше 50 мм; - высокая стоимость оборудования; - ухудшение санитарно-гигиенических характеристик процесса; - высокий уровень шума	- резка малоуглеродистых, хромо – никелевых сталей и цветных металлов толщиной до 100 мм; - случаи, когда требования по качеству находятся между требованиями к лазерной и кислородной резке
Лазерная резка	- высокая скорость обработки; - точность вырезки деталей; - малая зона термического влияния; малые деформации; малое количество грата; - возможность выполнения малых отверстий; - возможность выполнения резки, сверления и фрезерования на одном оборудовании	- высокая стоимость обработки для толщин свыше 15 мм; - высокая стоимость оборудования	- возможность резки практически любых материалов и сплавов от металла, до стекла и пластика; - случаи, когда требуется особая точность обработки детали; - обработка сложных профилей

Способы резки	Достоинства	Недостатки	Области применения
Гидроабразивная резка	- отсутствие перегрева выше 100 °С и структурных изменений, термических деформаций заготовок; - возможность резки любых материалов с высокой прочностью и отличными физико-химическими свойствами; - высокая скорость обработки; - возможность выполнения резки, сверления и фрезерования на одном оборудовании; - точность вырезки деталей; - экологическая чистота, полная пожаро- и взрывобезопасность	- высокая стоимость оборудования; - сложность оборудования и условий его эксплуатации; - высокий уровень шума	Неограниченная номенклатура материалов: бумага, картон, ткани, кожа, резина, древесина, полимерные материалы (винипласт, фторопласт, органическое стекло), фольгированная и металлизированная пластмасса, металлы и сплавы, в том числе, труднообрабатываемые (твердые и магнитные сплавы, титан, коррозионно-стойкие и жаропрочные стали), композиционные материалы, керамика, натуральный и искусственный гранит и мрамор, стекло и др.

*Таблица составлена по материалам сайтов [104–108], данным проспектов фирм ESAB (Швеция), «MESSER GRIESHEIM», Trumpf, Rofin-Sinar (Германия), работам [29, 60].

Основные тенденции развития термической и механической резки, сложившиеся к началу 2000-х годов представлены на рис. 1.2. Приоритеты обработки заготовок переместились от кислородной и механической резки к лазерной и плазменной. На толщинах до 25 мм лазерная резка становится доминирующей.

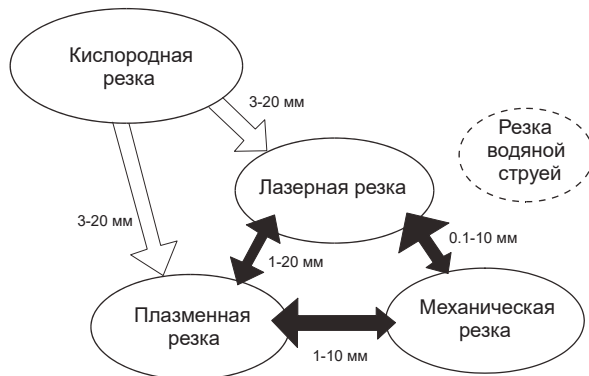


Рис. 1.2. Структурные изменения в резке конструкционных материалах, сложившиеся в мире к началу 2000-х годов [8]

1.2. Физико-химические основы

Наиболее широкое применение в промышленности имеют три вида термической резки: газопламенная кислородная, плазменная и лазерная. Их общее заключается в локальном ослаблении молекулярных связей твердого тела путем интенсивного нагрева и удаления расплавленных участков газовой струей. Для нагрева металла используются следующие источники теплоты: экзотермическая реакция окисления металла в кислороде при кислородной резке, энергия ионизированного газа при плазменной резке, и энергия лазерного луча при лазерной резке. Одной из новых технологий резки, стремительно завоевывающей рынок, является гидрорезка или гидроабразивная резка, в которой в качестве режущего инструмента используется энергия сверхзвуковой струи жидкости.

1.2.1. Кислородная резка

Кислородная резка, несмотря на некоторые ограничения, сегодня остается одним из основных процессов газопламенной обработки, благодаря очевидным преимуществам перед другими способами разделения материалов (простоте, относительной дешевизне применяемой технологии и оборудования, возможности разделения материалов в диапазоне толщин 3 – 1000 мм и т.д.). Ее сущность заключается в сжигании металла в кислороде и выдувании струей газа продуктов горения.

При разделительной кислородной резке образуются сквозные разрезы, а при поверхностной – канавки круглого очертания (рис. 1.1). Разделительная резка может производиться без или со скосом кромок под сварку. В отличие от сварки кислородная резка на вертикальной плоскости или в потолочном положении не представляет трудности и может производиться в любом пространственном положении.

Схема процесса кислородной резки приведена на рис. 1.1. Смесь кислорода с горючим газом выходит из мундштука резака и сгорает, образуя пламя, которое называют *подогревающим*. Когда металл нагревается до температуры начала горения, по осевому каналу мундштука подается технически чистый кислород. Он попадает на нагретый металл и воспламеняет его. В процессе горения выделяется значительное количество теплоты. К термическому и химическому действию может присоединяться механическое действие струи газа, выталкивающие жидкие и размягченные продукты из полости реза. Нижележащие слои металла нагреваются, и горение быстро распространяется в глубину, прожигая сквозное отверстие, через которое режущая струя кислорода выходит наружу, пробивая металл.

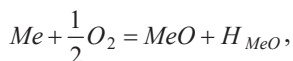
Таким образом, кислородная резка состоит из нескольких процессов:

- подогрева металла;
- сжигания металла в струе кислорода;
- выдувания расплавленного шлака из полости реза.

Подогревающее пламя обычно не тушат, и оно горит в течение всего процесса резки, так как теплоты, выделяющейся при сжигании железа в кислороде,

недостаточно для возмещения всех потерь теплоты в зоне резки. Если подогревающее пламя потушить, то процесс резки быстро прекращается, металл охлаждается настолько, что кислород перестает на него действовать, и реакция горения металла в кислороде останавливается.

Окисление металла происходит на фронтальной поверхности струи режущего кислорода с образованием тонкой прослойки жидкого металла на границе раздела между жидкой пленкой оксидов и твердым металлом. Окисление определяет энергобаланс, а, следовательно, и скорость процесса резки, так как при этом выделяется дополнительная мощность. На фронте резки протекает следующая реакция:



где H_{MeO} – энтальпия реакции окисления.

Металл при резке нагревают пламенем, которое образуется при сгорании какого-либо горючего газа в кислороде. Для резки пригодны горючие газы и пары горючих жидкостей, дающие температуру пламени при сгорании в смеси с кислородом не менее 1800 °С. В качестве *горючих газов* используют ацетилен, пропан, природный газ и водород. Кислород, сжигающий нагретый металл, называют *режущим*. Особенно важную роль при резке играет чистота кислорода. Она должна быть не менее 98,5 – 99,5 %. С понижением чистоты кислорода сильно снижается скорость резки, а следовательно и производительность процесса, и сильно увеличивается расход режущего газа.

Пламя является основным источником теплоты при резке. Пламя нагревает и расплавляет металл в зоне реза. При резке наиболее широко применяется кислородно-ацетиленовое пламя высокой температуры (3200 °С), обеспечивающее концентрированный нагрев. Однако в настоящее время часто используют газы – заменители: пропан – бутан, метан, природный газ. Состав горючей смеси, т.е. соотношение кислорода и горючего газа, определяет температуру и влияние пламени на металл. Изменяя состав горючей смеси, газорезчик изменяет основные параметры пламени.

Все горючие газы, содержащие углеводороды, образуют пламя, которое имеет три четко различимые зоны: ядро, восстановительную зону и факел (рис. 1.3) [60].

Водородное пламя ярко различных зон не имеет, что затрудняет его регулировку по внешнему виду. При зажигании газовой струи, вытекающей из сопла, пламя перемещается по направлению движения струи газовой смеси.

Скорость истечения для каждого газа подбирается так, чтобы пламя не проникало внутрь сопла горелки и не отрывалось от него. Газ в струе должен нагреться до температуры воспламенения 450 – 500 °С, а газы – заменители при 550 – 650 °С. Поэтому, ядро пламени при сгорании газов – заменителей длиннее, чем при сгорании ацетилена. Процесс горения горючего газа в кислороде экзотермический, т.е. идет с выделением теплоты.

Схема нормального ацетилено – кислородного пламени и график распределения температур по длине, а также состав пламени по зонам представлены на рис. 1.4. [60]

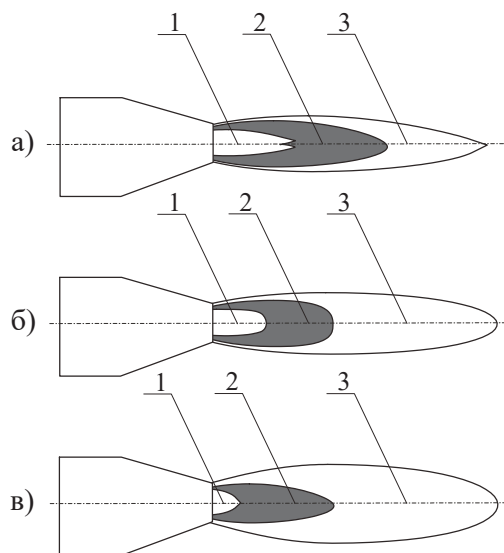


Рис. 1.3. Виды пламени:

*а – окислительное; б – нормальное; в – науглероживающее;
1 – ядро; 2 – восстановительная зона; 3 – факел*

Первая зона – *ядро* – имеет резко очерченную форму (близкую к цилиндру), плавно закругляющуюся в конце, а ярко светящаяся оболочка состоит из раскаленных частиц углерода, образующихся при распаде ацетилена, которые сгорают в наружном ее слое. Частицы углерода светятся, поэтому оболочка ядра является самой яркой частью сварочного пламени, несмотря на то, что ее температура относительно невысока (не более 1500 °С).

Вторая зона – *восстановительная* (средняя) – располагается за ядром и отличается от него более темным цветом.

Длина ее зависит от номера мундштука и достигает 20 мм. Эта зона состоит из продуктов неполного сгорания ацетилена – оксида углерода и водорода. Она называется восстановительной, так как оксид углерода и водород раскисляют расплавленный металл. Зона имеет высокую температуру (3140 °С) в точке, отстоящей на 3 – 6 мм от конца ядра.

Третья зона – *факел* (зона полного сгорания) – находится за восстановительной зоной. Она состоит из углекислого газа и паров воды, которые образуются в пламени при сгорании оксида углерода и водорода восстановительной зоны за счет кислорода воздуха. В факеле протекает вторая стадия горения ацетилена. Как углекислый газ, так и водяные пары при высоких температурах окисляют железо, поэтому факел пламени называют также *окислительной зоной*. Температура в ней значительно ниже, чем в восстановительной и колеблется от 1200 °С до 2520 °С [60].

В зависимости от соотношения между кислородом и ацетиленом существуют три основных вида сварочного пламени: окислительное, нормальное науглероживающее.

Окислительное пламя (рис. 1.3 а) образуется при избытке кислорода, когда в горелку на один объем ацетилена подают более 1,3 объема кислорода. Пламя с некоторым избытком кислорода будет частично выжигать углерод.

Нормальное пламя (рис. 1.3 б) – получается, когда в горелке на один объем кислорода подают 1,1 – 1,2 объема ацетилена. Это пламя характеризуется отсутствием свободного кислорода и углерода в восстановительной зоне.

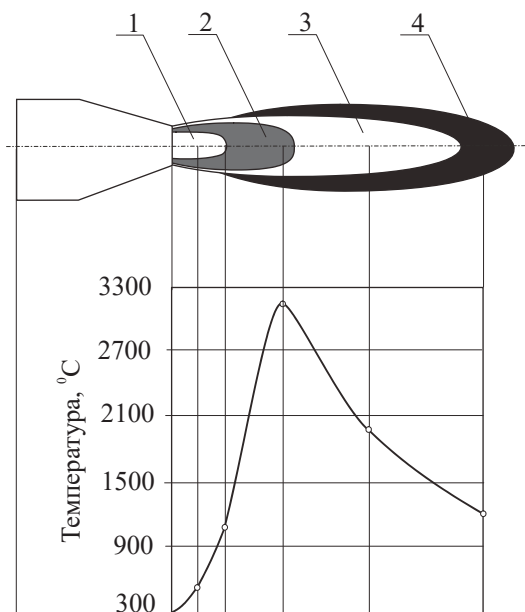


Рис. 1.4. Образование пламени и распределение температур по его длине:

1 – ядро (ацетилен + кислород из горелки); 2 – восстановительная зона (оксид углерода + водород); 3 – факел (углекислый газ + пары воды + азот); 4 – кислород + азот из воздуха

Науглероживающее пламя (рис. 1.3 в) – получается при избытке ацетилена, когда в горелку на один его объем подается менее 0,95 объема кислорода. С уменьшением содержания кислорода и увеличением ацетилена в газовой смеси реакции окисления замедляются, поэтому увеличивается количество свободного углерода. Ядро такого пламени теряет резкость очертания, на конце появляется зеленый венчик, что свидетельствует об избытке ацетилена. При большом избытке ацетилена пламя начинает коптить. Температура науглероживающего пламени ниже, чем у нормального и окисленного.

Кислородной резке подвергаются только те металлы и сплавы, которые удовлетворяют следующим условиям [60]:

- температура воспламенения металла в кислороде должна быть ниже температуры его плавления. Этому требованию соответствуют низкоуглеродистые стали, температура воспламенения которых в кислороде около 1300 °С, а температура плавления около 1500 °С. Увеличение содержания углерода в стали сопровождается повышением температуры воспламенения в кислороде и понижением температуры плавления. Поэтому с ростом содержания углерода кислородная резка сталей ухудшается.
- температура плавления оксидов металлов, образующихся при резке, должна быть ниже температуры плавления самого металла. В противном случае тугоплавкие оксиды не будут выдуваться струей режущего кислорода, что нарушит нормальный процесс резки. Этому условию не удовлетворяют высокохромистые стали и алюминий. При резке высокохромистых сталей образуются тугоплавкие оксиды с температурой плавления 2000 °С, а при резке алюминия – оксид, температура плавления которого около 2050 °С. Кислородная резка их невозможна без применения специальных флюсов.
- теплоты, которая выделяется при сгорании металла в кислороде, должно быть достаточно для поддержания непрерывного процесса резки. При резке стали около 70 % теплоты выделяется в результате сгорания металла в кислороде и только 30 % ее поступает от подогревающего пламени резака.
- образующиеся при резке шлаки должны быть жидкотекучими и легко выдуваться из места реза.
- теплопроводность металлов и сплавов не должна быть слишком высокой, иначе теплота от подогревающего пламени и нагретого шлака интенсивно отводится от места реза, процесс резки становится неустойчивым и в любой момент может прерваться.

Указанным условиям удовлетворяет лишь железо и низко – и среднеуглеродистые стали. Большинство других металлов не поддаются кислородной резке. В табл. 1.2. приведены характеристики кислородной резки углеродистых сталей.

Таблица 1.2
Характеристика кислородной резки углеродистых сталей

Сталь	Содержание углерода, %	Характеристика кислородной резки
Низкоуглеродистая	$\leq 0,3$ %	Резка без затруднений
Среднеуглеродистая	св.0,3 % до 0,7 %	Резка затруднена
Высокоуглеродистая	св.0,3 % до 1 % ≥ 1 % – 1,2 %	Резка затруднена. Требуется предварительный подогрев стали до 300 – 700 °С Резка невозможна (без применения флюсов)

Возможность резки кислородом конструкционных сталей оценивают (по аналогии с оценкой свариваемости) по содержанию в них эквивалентного углерода:

$$C_{\text{э}} = C + 0,16Mn + 0,3(Si + Mo) + 0,4Cr + 0,2V + 0,04(Ni + Cu) \quad (1.1)$$

Цифры, стоящие перед обозначением элементов, указывают их содержание в сталях (в процентах).

Таблица 1.3

Характеристика кислородной резки конструкционных сталей по содержанию в них эквивалента углерода [60]

Содержание, %		Характеристика резки	Марка стали
углерода	эквивалентного углерода		
До 0,3	До 0,6	Возможна резка в любых условиях без ограничений и без подогрева до или после резки	15Г, 20Г, 10Г2, 15М, 15НМ и др.
До 0,5	0,6-0,8	В летнее время – хорошая без подогрева В зимнее время необходим подогрев до 150 °С	30Г, 40Г, 30Г2, 15Х, 20Х, 15ХФ, 10ХФ, 15ХГ, 20М, 12ХН3А, 20ХН3А и др.
До 0,8	0,8-1,1	Резка затруднена в связи с возможностью образования закалочных трещин. Необходим предварительный подогрев до 300 °С	50Г – 70 Г, 35 Г2 – 50Г2, 30Х – 50Х и др., 12ХМ – 35ХМ, 20ХГ – 400ХГ, 12Х2Н4А – 20Х2Н4А, 40ХФА, 5ХНМ, 25ХМФА и др.
Более 0,8	Более 1,1	Резка затруднена в связи с возможностью образования трещин после резки. Необходим предварительный подогрев до 300 – 400 °С и замедленное охлаждение	25ХГС – 50ХГС, 20Х3, 35ХЮА, 37ХН3А, 35Х2МА, 25НВА, 38ХМЮА, 40ХГМ, 45ХНМФА, 50ХГА, 50ХФА, 50ХТФА, 5ХНМ, и др.

Влияние легирующих примесей на процесс кислородной резки представлено в табл. 1.4 [85].

Для высоколегированных сталей, чугуна, цветных металлов процесс кислородной резки не применяется, так как при этом необходимо обеспечить расплавление и перевод в шлак образующихся тугоплавких оксидов, что может быть достигнуто путем повышения температуры в разрезе или переводом шлаков в более легкоплавкие соединения.

Таблица 1.4

Влияние легирующих элементов в стали на процесс кислородной резки

Наименование легирующего элемента	Процесс кислородной резки при содержании примесей, %		
	нормальный	затруднен	невозможен
Углерод	До 0,4	Св. 0,4	1 – 1,25
Марганец	До 0,4	Св. 0,4	14
Кремний	До 0,4	Св. 0,4	Св. 4
Хром	До 5	–	Св. 5
Никель	До 7-8	Св.8	–
Молибден	До 0,25	–	–

Для резки высоколегированных хромоникелевых сталей, чугуна, меди и ее сплавов применяется *кислородно-флюсовая резка*. Ее сущность заключается в том, что в зону реза вводится порошкообразный флюс, который, поступая на кромку разреза, сгорает в струе кислорода и значительно повышает температуру в области взаимодействия струи кислорода и металла. Продукты окисления сплавляются с оксидом поверхностной пленки, образуют шлаки с более низкой температурой плавления, которые довольно легко удаляются из разреза. В качестве флюса наиболее широко применяется железный порошок марки ПЖМ5М по ГОСТ 9849 или его смеси с порошками магнезия, алюминия, силикокальция [86].

Существует следующие способы повышения экономичности кислородной резки [59]:

- а) *резка металлов кислородом низкого давления*. При этом способе варьируется площадь сопла при неизменном давлении кислорода. Сопло используется цилиндрическое большой длины, давление кислорода перед соплом не должно превышать 0,4 – 0,5 МПа, смешение горючего газа с подогревающим кислородом – внешнее, что обеспечивает горение горючего газа по всей толщине разрезаемого металла.
- б) *резка с кислородной завесой*. Фирмой «Танака» (Япония) был предложен способ резки, при котором с целью уменьшения загрязнений режущей струи кислорода между подогревающим пламенем и струей кислорода подают кислород со сравнительно небольшой скоростью течения. Медленный поток кислорода предотвращает подсос в струю

режущего кислорода пламени и воздуха, обеспечивая чистоту кислорода, что приводит к повышению скорости резки. Проведенные во ВНИИАВТОГЕНмаш исследования показали, что при резке сталей толщиной 20 мм применение «Кислородной завесы» увеличивает скорость резки в 1,35 – 1,5 раза по сравнению с обычным способом, однако требует увеличения удельного расхода кислорода в 1,6 – 1,9 раз. Кроме того, увеличивается ширина реза.

- в) *пульсирующая резка*. Повышение скорости и качества резки обусловлено пульсирующим поступлением режущего кислорода в резак. Скачки уплотнения в режущей струе вызывают «выбивание» шлаков из зоны резки, окислитель лучше поступает к металлу, и скорость резки возрастает в 1,15 – 1,2 раза.
- г) *резка с вращением струи режущего кислорода*. Этот способ разработан в 1980-х годах в НПО «Кислородмаш» (А.с. 580406, 929967, 937889). В процессе резки загрязняется в основном передняя часть струи режущего кислорода, в то время как боковые и тыльная части остаются более чистыми. Поэтому возникла идея поворота струи режущего кислорода на 180° за время прохождения от верхней до нижней кромки разрезаемого металла. Эксперименты показали, что при резке металла толщиной до 10 мм существенного прироста скорости нет, так как кислород не успевает загрязняться. При резке металла толщиной от 20 до 100 мм скорость резки возрастает в 1,2 – 1,4 раза. Рез получается узкий с вертикальными стенками, без грата, верхняя кромка не оплавляется.
- д) *резка по способу «смыв – процесс»*. Известно, что резке металла на поверхности реза образуются бороздки, играющие роль концентраторов напряжения и влияющие на усталостную прочность металла, особенно при знакопеременных нагрузках. Поэтому, ВНИИавтогенмашем было предложено располагать резак под углом $\alpha = 25^\circ$ к поверхности листа, а резку выполнять тремя струями режущего кислорода. Одна из струй, идущая впереди, производит резку, а две другие, расположенные позади нее, перемещаясь по еще не остывшему металлу, зачищают кромку, смывая образующиеся бороздки. Этот способ сохраняет высокие механические свойства металла на кромке реза, скорость прямолинейной резки может быть увеличена при этом в 1,5 – 2,5 раза по сравнению с обычным способом.

1.2.2. Плазменная резка

Плазма представляет собой четвертое состояние вещества после твердого, жидкого и газообразного. Это ионизированный газ, содержащий электроны, ионы и нейтральные молекулы. Гигантскими сгустками плазмы являются Солнце и звезды. Внешняя поверхность земной атмосферы покрыта плазменной оболочкой – ионосферой. В земных природных условиях плазма наблюдается при темных, тлеющих и дуговых (типа молнии) разрядах в газах. В практической деятельности человека плазма используется в светотехнике

(неоновых лампах, лампах дневного света, электродуговых устройствах), а также при сварке, плазменной резке, плазменной наплавке и в других технологических процессах.

Различают два рода плазмы: изотермическую, возникающую при нагреве газа до температуры достаточно высокой, чтобы протекала термическая ионизация газа, и газоразрядную, образующуюся при электрических разрядах в газах.

При резке используют термическую плазму с температурами $(5-10) \cdot 10^3 K$.

Плазменная резка – это термическая резка сжатой электрической дугой. Высокотемпературный поток плазмы с огромной скоростью (от 500 до 1500 м/с) вырывается из отверстия сопла в форме цилиндрической колонны небольшого сечения, воздействует на разрезаемый материал, плавит и удаляет расплавленную массу, оставляя ровный и гладкий разрез. Различают следующие разновидности плазменной резки: ручную и механизированную; дугой прямого или косвенной действия; током прямой или обратной полярности; плазмотроном с водяным или воздушным охлаждением; однокамерным или многокамерным плазмотроном.

Плазменная дуга (в отличие от открытой дуги) является результатом сочетания электрической дуги и специальных мер, направленных на интенсификацию ее воздействия на обрабатываемый материал. Производится обжатие столба дуги струей газа с целью уменьшения площади его поперечного сечения, что приводит к резкому повышению температуры дуги. Или в плазму превращается газ, подаваемый для обжатия дуги. В связи с этим плазменная дуга формируется в специальном устройстве – *плазмотроне*, состоящем из двух основных элементов: электрода и формирующего сопла, через канал которого пропускается столб электрической дуги вместе с плазмообразующим газом, подаваемым под определенным давлением. При этом в установившейся дуге различают несколько характерных однородных участков разряда (рис. 1.5). На поверхности электрода расположена катодная область. Между катодной областью и верхним срезом цилиндрической части отверстия сопла расположен участок, называемый закрытым столбом. Этот участок находится в относительно спокойном потоке холодного газа. Между входным и выходным срезами внутри сопла расположен участок столба, который подвергается сжатию холодными стенками канала сопла. Между нижним срезом сопла и верхней плоскостью разрезаемого листа находится открытый столб дуги, стабилизированный соосными потоками собственной плазмы и оболочкой более холодного газа. В полости реза (между верхней плоскостью разрезаемого листа и анодной областью) расположены рабочий участок дуги, а также плазменная струя и факел плазмы.

Под воздействием стенок канала сопла и струи плазмообразующего газа столб дуги сжимается, его поперечное сечение уменьшается, вследствие чего температура плазмы в центральной части столба дуги повышается. В результате внутренний слой газа, соприкасающийся со столбом дуги, превращается в плазму, а наружный слой, омывающий стенки канала сопла, остается сравнительно холодным, образуя изоляцию (электрическую и тепловую) между потоком плазмы и каналом сопла [102].

Учебное издание

*Павеле Лариса Арвидовна
Протопопов Александр Анатольевич*

ПОЛУЧЕНИЕ ЗАГОТОВОК АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКОЙ

Учебник

ISBN 978-5-9729-0366-5



Подписано в печать 16.04.2019
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».

Издательство «Инфра-Инженерия»
160011, г. Вологда, ул. Козленская, д. 63
Тел.: 8 (800) 250-66-01
E-mail: booking@infra-e.ru
<https://infra-e.ru>

Издательство приглашает
к сотрудничеству авторов
научно-технической литературы