вом действии лазерного излучения и происходит при непрерывном или периодическом перемещении источника теплоты, сформированного в пятно с высокой плотностью мощности, с помощью специальной оптической системы [8]. В зависимости от конструктивных особенностей излучателей возможны непрерывный или импульсно-периодический режим лазерной резки. В настоящее время для раскроя материалов большое распространение получили лазеры непрерывного действия.

Для повышения эффективности резки в зону обработки совместно с лазерным лучом подают струю газа, способствующую удалению продуктов из зоны разрушения, а в некоторых случаях и инициирующую химическую реакцию в месте воздействия излучения на металл (газолазерная резка). В первом случае используют инертные или нейтральные газы (аргон, азот), во втором — кислород, воздух.

Для газолазерной резки конструкционных сталей применяют в основном твердотельные лазеры мощностью до 0,5 кВт, позволяющие резать толщины до 3 мм, и CO_2–лазеры мощностью до 1–1,5 кВт, позволяющие разрезать прокат толщиной до 6 мм. В последние годы за рубежом применяют CO_2–лазеры мощностью 3 кВт, позволяющие осуществлять газолазерную резку металла толщиной до 25 мм.

Основные преимущества лазерной резки — высокая точность, малая ширина реза, минимальные деформации, возможность вырезки сложных контуров, а также резки твердых и хрупких материалов.

К недостаткам способа газолазерной резки следует отнести большие капитальные затраты на приобретение и установку оборудования, необходимость в высококвалифицированном персонале для обслуживания лазерных комплексов, невозможность осуществления резки ручным инструментом, ограниченные возможности резки проката средней толщины. Кроме того, лазерные установки могут быть рентабельными только при их загрузке на 90–95%, что трудно обеспечить в условиях мелких и средних производств.

По некоторым энергетическим характеристикам, например по величине термического КПД плавления, плазменно–дуговая резка не уступает лазерной и при этом охватывает более широкий диапазон толщин разрезаемого металлопроката [10]. В мировой практике часто используют как альтернативу газолазерной высокоточную микроплазменную резку [11].

Особенности плазменно–дуговой резки

Характеристика плазменной дуги и плазмообразующих сред

Струю плазмы получают путем обжатия столба дуги в канале сопла. Под воздействием стенок канала сопла и струи плазмообразующего газа столб дуги сжимается, его поперечное сечение уменьшается, а температура в центральной части столба дуги повышается до 10 000–50 000 К. В результате внутренний слой, соприкасающийся со столбом дуги, превращается в плазму, а наружный слой, омывающий стенки канала сопла, остается сравнительно холодным, образуя электрическую и тепловую изоляцию между потоком плазмы и каналом сопла. Этот охлажденный слой газа препятствует отклонению столба дуги от заданного направления и замыканию его на стенку канала сопла.

Напряжение сжатой дуги составляет 60–200 В, что в три–десять раз больше, чем в свободной дуге. Плотность тока сжатой дуги достигает 100 А/мм^2, т. е. на порядок выше, чем у свободной, а удельная мощность достигает 2·106 Вт/см^2. Плазменная среда оказывает значительное влияние на характеристики плазменной дуги. Условие выбора плазменной среды: она должна обеспечивать наибольшую удельную тепловую мощность при заданном расходе газа и затраченной электрической энергии, а также позволять сконцентрировать полученную энергию в тонкий плазменный шнур и сосредоточить ее на минимальном участке разрезаемого металла. Для плазменной резки применяют как однокомпонентные, так и многокомпонентные плазмообразующие среды [2, 6, 7].

Аргон как плазмообразующий газ обладает недостаточной способностью преобразовывать электрическую энергию в тепловую и передавать ее разрезаемому металлу. Он относится к числу дефицитных и дорогих газов. Для плазменной дуговой резки аргон применяют в смесях с другими газами (водород, азот).

Азотная плазма обеспечивает эффективное преобразование электроэнергии в тепловую и передачу последней разрезаемому металлу, что приводит к существенному увеличению скорости резки по сравнению с резкой аргоновой плазмой. В отличие от аргона азот можно применять при резке в качестве самостоятельного плазмообразующего газа.

Гелий не получил распространения в качестве плазмообразующей среды, так как является дорогим и дефицитным газом. В гелиевой плаз-

ме более высокая напряженность поля и удельные тепловые потоки в анодной области, что способствует увеличению скорости резки гелиевой плазмы по сравнению с аргоновой.

Кислород применяют самостоятельно и в смесях в качестве плазмообразующего газа. При этом горение железа в кислороде способствует увеличению общей тепловой мощности процесса плазменной резки, следовательно, и скорости резки. В кислороде напряженность поля дуги ниже, чем в азоте, поэтому он как газ–преобразователь электрической энергии в тепловую мене эффективен.

Анализ рассмотренных выше газов показывает, что ни один из них не может обеспечить самостоятельно весь комплекс положительных свойств идеальной плазмообразующей среды. Поэтому, чтобы обеспечить наиболее полно комплекс свойств плазмообразующей среды, используют смеси из различных газов (аргон+водород, воздух, азот+кислород и др.).

Наиболее широкое распространение для резки конструкционных материалов получил в качестве плазмообразующей среды воздух, содержащий 78% азота и 21% кислорода.

Основные конструкционные материалы одинаковой толщины по уменьшению скорости резки воздушной плазмой могут быть расположены в такой последовательности:

- алюминиевые сплавы;
- углеродистые и низколегированные стали;
- легированные и нержавеющие стали;
- чугун, латунь, медь.

Возможность широкого применения воздуха и кислорода в чистом виде (а также в смеси с другими газами) появилась после разработки катодов из циркония и гафния, на поверхности которых в процессе резки в кислородосодержащих средах образуется окисная пленка. Температура плавления этой пленки выше, чем основного металла. Она предохраняет катод от быстрого разрушения.

Изучение теплового баланса воздушной плазменной дуги с циркониевым катодом показало, что теплота дуги $P_д$, затрачиваемая на нагрев анода (разрезаемого металла) $P_а$, катода $P_к$, сопла $P_с$ и выделяемая в столбе $P_{ст}$, близка по значению к данным, получаемым при использовании сжатой аргоновой дуги [12].

При $I_д$=200...300 А, $U_д$=80 В, расходе воздуха 40 л/мин, диаметре сопла 3 мм мощность дуги $P_д$=16...20 кВт распределяется следующим образом: $P_а$=70...80%, $P_к$=8...12%, $P_с$=8...10%, $P_{ст}$=6...10%.

С увеличением расхода воздуха тепловая мощность $P_с$ быстро падает, а мощность $P_а$ незначительно возрастает. Эффективный КПД

нагрева плазменной дугой, обдуваемой воздушно-углеводородной смесью, составляет 55–72% [13].

Воду можно использовать в качестве плазмообразующей среды самостоятельно (водо–электрическая резка) в виде пара или как добавку к рабочему газу. Высокую напряженность поля столба дуги, высокую проникающую способность дуги, большую эффективность использования электрической мощности дуги достигают введением водорода. Качество водо-электрической резки малоуглеродистых сталей, особенно в диапазоне толщин до 20 мм, практически такое же, как при резке в кислородосодержащих смесях благодаря активной роли кислорода в смеси.

Использование воды в качестве плазмообразующей среды не получило широкого промышленного применения. При водо–электрической резке возникают сложности с возбуждением дуги. Кроме того, применяемые графитовые электроды быстро расходуются, и для вертикального перемещения графитового электрода в направлении сопла в процессе резки необходимо дополнительное устройство. Все это делает процесс недостаточно технологичным и надежным.

В последние годы широко применяют плазменную резку с «водяной защитой». При этом используют резку листов, уложенных над водной поверхностью с зазором, полупогруженных или погруженных в воду, с подачей небольшого количества воды в столб плазмы и др. [7, 14, 15]. В этих условиях вода улучшает санитарно-гигиенические характеристики процесса, обеспечивает повышение качества кромок вырезаемых деталей, способствует снижению тепловых деформаций деталей.

При резке плазменной дугой может возникнуть аварийный режим работы плазмотрона, так называемое двойное дугообразование [2]. Внешне двойное дугообразование проявляется в том, что при определенных условиях вместо одной дуги, горящей между катодом плазмотрона и разрезаемым листом, горят две дуги: между катодом и соплом, между соплом и разрезаемым листом *(рис. 3)*. В результате на сопле появляется анодная область первой дуги и катодная область второй дуги.

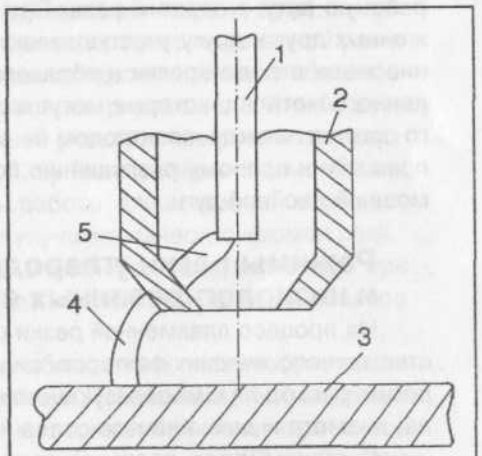


Рис. 3. Схема двойного дугообразования: 1 — электрод; 2 — сопло; 3 — разрезаемый лист; 4 — дуга сопло-лист; 5 — дуга электрод-сопло

Двойная дуга может быть кратковременной, когда защитный газовый слой быстро восстанавливается и вновь изолирует стенки от столба плазмы, и длительной, когда образовавшаяся двойная дуга горит устойчиво. Оба вида двойной дуги недопустимы. В первом случае происходит постепенное разрушение стенок сопла. Частицы расплавленного металла уносятся плазмой, а на поверхности сопла образуется небольшой кратер. Во втором случае за несколько секунд сопло оплавляется настолько, что дальнейшая эксплуатация его становится невозможной. При этом обычно повреждаются и другие детали плазмотрона — катод, изолирующие прокладки и др.

Чаще всего двойная дуга возникает при максимальных значениях тока в случае отклонения одного из параметров процесса от оптимального (например, при уменьшении расхода газа, приближении плазмотрона к листу, изменении скорости резки, незначительном искажении формы сопла и т. п.).

При резке воздушной плазмой причиной двойного дугообразования является повышенная влажность технического воздуха. Присутствие влаги в катодном пространстве (в полости сопла) вызывает возникновение серии мелких замыканий электрод-сопло-разрезаемый металл, появление мелких дуговых разрядов, которые происходят чаще всего в момент возбуждения дуги при выходе на рабочий режим резки. При наличии влажного воздуха не всегда удается возбудить рабочую дугу с первого раза. При этом на наиболее близко расположенных друг к другу участках электрода и сопла происходит выплавление меди в виде эрозии и образование отдельных наплывов расплавленного металла, которые могут вызвать уменьшение гарантированного зазора между электродом и соплом. В дальнейшем это может привести к полному разрушению последних вследствие возникновения мощной двойной дуги.

Режимы резки углеродистых и низколегированных сталей

На процесс плазменной резки оказывает влияние большое количество технологических факторов: сила тока и напряжение дуги, скорость резки, расход плазмообразующего газа, скорость его истечения из сопла, диаметр и длина канала сопла и др. [2, 3, 6, 7, 9].

В общем виде производительность процесса плазменной резки может быть представлена выражением

$$V_p = \frac{\eta_u \eta_т P}{\gamma \Delta S \hat{A}_p \delta}, \qquad (1)$$

где V_p — максимальная скорость резки, см/с; h_u — эффективный КПД плазменной дуги; $h_т$ — термический КПД плазменной дуги; P — тепловая мощность источника нагрева, Вт; γ — плотность разрезаемого металла, г/см3; B_p — средняя ширина полости реза, см; δ — толщина разрезаемого металла; ΔS — теплосодержание расплавленного металла, Дж/см^3.

Скорость плазменной резки прямо пропорциональна мощности дуги и обратно пропорциональна толщине и плотности разрезаемого металла. Кроме этого, скорость резки зависит от теплофизических характеристик разрезаемого материала: теплопроводности, теплоемкости, скрытой теплоты плавления.

Обычно значение силы тока режущей дуги при резке стали толщиной 6–30 мм выбирают в пределах 270±30 А исходя из условий нормальной стойкости электродов (около 2 ч горения дуги). Уменьшение силы тока снижает скорость резки, увеличение — заметно ускоряет износ электродов. Обе составляющие мощности режущей дуги (сила тока и напряжение) не равноценны по интенсивности влияния на скорость резки. Экспериментально установлено, что увеличение напряжения более эффективно влияет на скорость резки, чем увеличение силы тока [2].

Напряжение определяют расход газа, диаметр и длина канала сопла (степень обжатия режущей дуги).

Если в случае применения азота допустимо использование плазмотронов с аксиальной подачей газа (струйная стабилизация дуги), то при применении воздуха, и особенно кислорода, процесс плазменной резки указанными плазмотронами невозможен вследствие его нестабильности и неустойчивости. Для получения сконцентрированного столба дуги для воздушно- и кислородно-плазменной резки применяют плазмотроны с вихревой стабилизацией дуги [2, 7, 9]. Завихренный плазмообразующий газ обеспечивает надежность работы плазмотрона, повышает стабильность процесса резки, а также улучшает качество кромок реза.

Резку с использованием воздуха и кислорода осуществляют при давлении 0,3–0,5 МПа. Давление газа зависит от сечения каналов завихрителя плазмотрона.

Возбуждение дуги происходит в слабом потоке плазмообразующего газа при расходе последнего 3–5 л/мин. Повышение расхода сверх рекомендуемого приводит к обрыву малоамперной вспомогательной дуги, в результате чего не возбуждается и основная дуга. При слишком малом расходе газа плазменную дугу, горящую внутри резака, не удается выдуть наружу из сопла или она столь коротка, что ее длины не хватает для создания токопроводящего мостика между электродом и разрезаемым листом. В этом случае режущая дуга также не возникает.

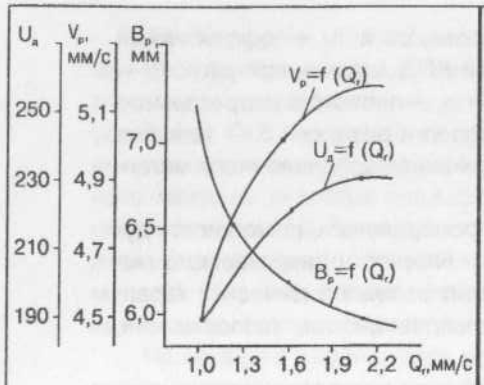


Рис. 4. Зависимость напряжения на дуге $U_д$, скорости резки $V_р$, средней ширины реза $B_р$ от расхода воздуха $Q_г$ (толщина углеродистой стали 65 мм, сила тока 350 А, диаметр сопла 3,5 мм, длина канала сопла 6,5 мм)

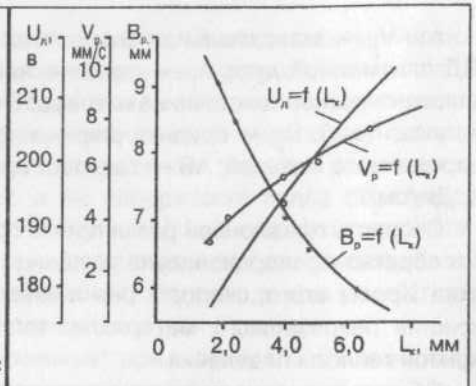


Рис. 5. Зависимость напряжения на дуге $U_д$, скорости резки $V_р$, средней ширины реза $B_р$ от длины канала сопла $L_к$ (диаметр канала сопла 3,5 мм, толщина стали 65 мм, сила тока 380 А, плазмообразующий газ-воздух).

После возбуждения дуги увеличение расхода плазмообразующей среды (60–90 л/мин) приводит к обжатию плазменного столба дуги, ширина реза уменьшается, скорость резки возрастает, при этом напряжение на дуге повышается *(рис. 4)*, что при крутопадающей характеристике источника тока равносильно увеличению мощности дуги [7].

Аналогичное влияние на процесс плазменной резки оказывает увеличение длины канала сопла *(рис. 5)*. При увеличении длины канала до 6,5 мм эффективность столба плазменной дуги возрастает, ширина реза по верхней и нижней плоскостям листа примерно одинаковая и составляет 6–6,5 мм [7]. Длина канала не должна превышать определенных пределов. Чрезмерное увеличение длины канала при заданном оптимальном его диаметре приводит к значительным потерям энергии на нагрев сопла и может вызвать образование двойной дуги. Для диаметра канала 3,5–3,6 мм оптимальная длина составляет 6–7 мм.

Ширину реза устанавливают с учетом суммарного воздействия ряда факторов: диаметра сопла, силы тока, скорости резки, состава и расхода плазмообразующего газа, расстояния от нижнего среза сопла до поверхности разрезаемого металла [4]. Большое влияние оказывает диаметр сопла, определяющий сечение столба режущей дуги. В первом приближении ширину реза по верхней кромке можно принимать равной двум диаметрам сопла.

Для обеспечения надежной работы при силе тока порядка 300 А и разрезаемой толщине 10–30 мм целесообразно использовать сопла

с диаметром канал 3 мм. Для стали толщиной 31–50 мм применяют сопла большего диаметра, а для резки толщин 3–10 мм используют сопла диаметром 1–2 мм.

Важным параметром процесса плазменной резки является пробивка металла в начальный момент. При резке стали толщиной 6–20 мм выдержка времени на пробивку составляет 2–2,5 с. Максимальная толщина стали, которую можно пробить без больших затруднений при ручной плазменной резке, составляет 40 мм. При резке на переносных и стационарных машинах максимальная толщина пробиваемого листа установлена равной 30 мм для всех металлов. При необходимости пробивки металла большей толщины в начале реза следует просверлить отверстие диаметром не менее 6 мм.

В табл. 2 приведены рекомендуемые режимы воздушно-плазменной резки малоуглеродистых и низколегированных сталей толщиной 6–30 мм. При этом сила тока составляет 270±30 А, расход воздуха 80–90 л/мин, расстояние от резака до поверхности разрезаемого металла 10–12 мм, ширина реза по нижней кромке 3–3,5 мм, а неперпендикулярность реза 0,5–1 мм.

Следует отметить, что машинную воздушно–плазменную резку в широком диапазоне толщин осуществляют при постоянной регулировке аппаратуры. Изменяется только скорость движения плазмотрона в зависимости от толщины металла. Напряжение на дуге используют для контроля за правильным протеканием процесса. Выход напряжения за заданные пределы свидетельствует об отклонении какого-нибудь исходного параметра, например, об изменении расхода воздуха, расстояния от резака до листа, т. е. сигнализирует о необходимости проверки отдельных составляющих процесса. Постоянство регулировки аппаратуры является большим преимуществом плазменной резки углеродистых сталей по сравнению с кислородной, так как эксплуатация оборудования существенно упрощается. Технология плазменной резки малоуглеродистых, низколегированных и легированных

Таблица 2. Режимы машинной воздушно–плазменной резки малоуглеродистых и низколегированных сталей

Параметр	Толщина разрезаемой стали, мм							
	6	8	10	12	14	16	20	30
Скорость резки, см/с	5–5,1	4–4,1	3,15–3,3	2,8–3,0	2,5–2,65	2,16–2,33	1,66–1,83	1,0–1,1
Напряжение на дуге, В	140–145	145–150	150–155	155–160	160–165	160–165	165–170	170–175

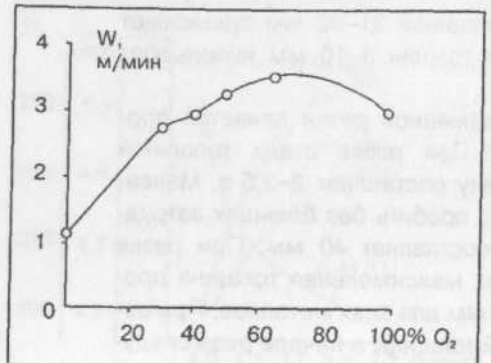


Рис. 6. Влияние концентрации кислорода на скорость резки стали

конструкционных сталей практически одинакова.

Доступность и экономичность сжатого воздуха как плазмообразующей среды способствовали интенсивному развитию плазменной резки. В то же время воздух, содержащий 78% азота и примерно 21% кислорода, не является идеальной плазмообразующей средой с точки зрения обеспечения максимальной скорости резки и качества реза. Рядом исследователей было установлено, что увеличение содержания кислорода в плазмообразующей азотно–кислородной смеси по отношению к воздуху дает возможность существенно (на 40–50%) повысить скорость резки и уменьшить ширину зоны термического влияния [2, 5, 16]. При этом было также обнаружено, что в отличие от хромоникелевых сталей, скорость резки которых возрастает с повышением концентрации кислорода до 100%, резка углеродистых сталей ускоряется только при повышении его концентрации до 60–70% *(рис. 6)*. Дальнейшее увеличение концентрации кислорода до 100% обеспечивает некоторый рост скорости резки по сравнению с воздушно–плазменной резкой. Однако достигнутая скорость резки ниже приведенного на рис. 6 максимума.

В 1980–1982 гг. впервые было осуществлено промышленное применение резки воздушной плазмой, обогащенной кислородом с помощью селективно-диффузионного устройства, которое показало, что производительность резки повышается на 20–30% с обогащением воздуха кислородом до 40%. Однако наличие ряда специфических требований к сжатому воздуху и несовершенство селективно-диффузионных устройств ограничивало интерес к применению богатых кислородом смесей. Ориентировочные режимы машинной резки углеродистой и низколегированной сталей в обогащенных кислородом плазмообразующих средах приведены в табл. 3.

В последнее десятилетие значительно вырос интерес к технологии плазменной резки с использованием водяной защиты. Как отмечалось выше, эта технология радикально улучшает санитарно–гигиенические условия, способствует снижению остаточных деформаций и др. Основные схемы воздушно-плазменной резки с водяной защитой приведены на *рис. 7*. Резку можно осуществлять с воздушным зазором между

Таблица 3. Режимы машинной резки углеродистой и низколегированной сталей в кислородсодержащих плазмообразующих средах

Расход рабочего газа, л/мин			Толщина металла, мм	Сила тока, А	Диаметр сопла, мм	Напряжение на дуге, В	Скорость резки, см/с	Средняя ширина реза, мм
Воздух	Кислород	Азот						
80			6	270–290		140–145	5,0–5,1	2,5–3,0
			10			145–150	3,7–4,2	2,5–3,0
	—	—	20		3	165–170	1,7–2,0	2,5–3,0
90			30	290–310		175–180	1,0–1,1	3,0–4,0
			40			190–195	0,5–0,66	4,0–6,0
—			6	260–280		120–130	6,0–6,4	2,5–3,0
—			10			125–135	4,0–4,5	2,5–3,0
	70–80	—	20	280–300	3	135–145	1,83–2,16	2,5–3,0
			30			150–160	1,0–1,25	3,0–3,5
			40			170–180	0,5–0,66	3,5–5,0
	60–75	20–25	10			70–75	4,16–4,5	4,0
—			20			75–80	1,66–1,83	5,0
	45–60	15–20	30	500	5	80–85	0,83–1,16	6,0
			40			85–95	0,58–0,66	7,0

разрезаемым листом и поверхностью воды (*рис. 7, а*), с касанием листа водной поверхности (*рис. 7, б*) , с погружением листа в воду (*рис. 7, в*), с дополнительной водяной завесой вокруг плазмотрона (*рис. 7, г*) и плазменной дуги (*рис. 7, д*), с погружением листа и плазмотрона в воду (*рис. 7, е*). При всех вариантах резки вредные выделения поглощаются водой. Наибольшее промышленное применение получили способы резки, показанные на рис. 7, *б, в*. Режимы обычной воздушно-плазменной резки и резки с водяной защитой малоуглеродистых и низколегированных сталей приведены в табл. 4.

Резка с водяной защитой отличается большей склонностью к образованию грата на кромках заготовок по сравнению с обычной воздушно-плазменной резкой (кроме схемы, приведенной на рис. 7, *а*). Для подавления

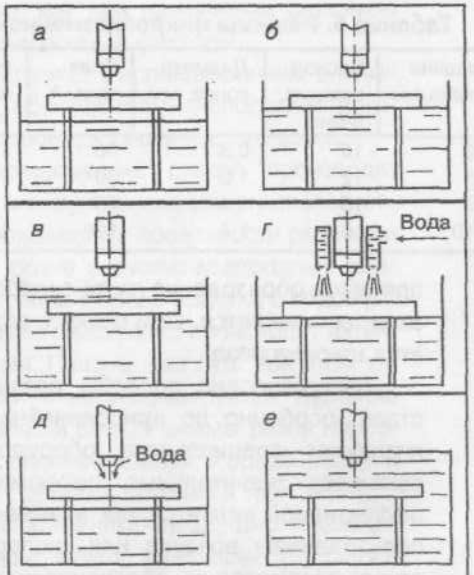


Рис. 7. Схемы плазменной резки с водяной защитой

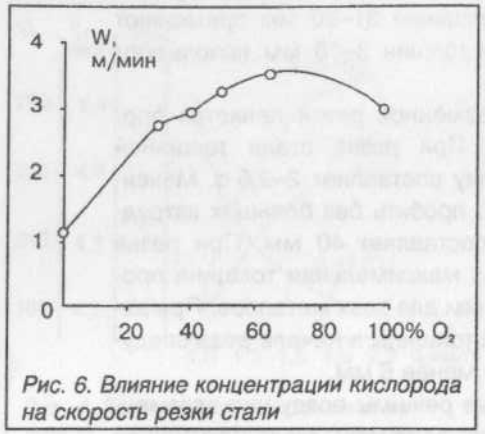


Рис. 6. Влияние концентрации кислорода на скорость резки стали

конструкционных сталей практически одинакова.

Доступность и экономичность сжатого воздуха как плазмообразующей среды способствовали интенсивному развитию плазменной резки. В то же время воздух, содержащий 78% азота и примерно 21% кислорода, не является идеальной плазмообразующей средой с точки зрения обеспечения максимальной скорости резки и качества реза. Рядом исследователей было установлено, что увеличение содержания кислорода в плазмообразующей азотно–кислородной смеси по отношению к воздуху дает возможность существенно (на 40–50%) повысить скорость резки и уменьшить ширину зоны термического влияния [2, 5, 16]. При этом было также обнаружено, что в отличие от хромоникелевых сталей, скорость резки которых возрастает с повышением концентрации кислорода до 100%, резка углеродистых сталей ускоряется только при повышении его концентрации до 60–70% *(рис. 6)*. Дальнейшее увеличение концентрации кислорода до 100% обеспечивает некоторый рост скорости резки по сравнению с воздушно–плазменной резкой. Однако достигнутая скорость резки ниже приведенного на рис. 6 максимума.

В 1980–1982 гг. впервые было осуществлено промышленное применение резки воздушной плазмой, обогащенной кислородом с помощью селективно-диффузионного устройства, которое показало, что производительность резки повышается на 20–30% с обогащением воздуха кислородом до 40%. Однако наличие ряда специфических требований к сжатому воздуху и несовершенство селективно-диффузионных устройств ограничивало интерес к применению богатых кислородом смесей. Ориентировочные режимы машинной резки углеродистой и низколегированной сталей в обогащенных кислородом плазмообразующих средах приведены в табл. 3.

В последнее десятилетие значительно вырос интерес к технологии плазменной резки с использованием водяной защиты. Как отмечалось выше, эта технология радикально улучшает санитарно–гигиенические условия, способствует снижению остаточных деформаций и др. Основные схемы воздушно-плазменной резки с водяной защитой приведены на *рис. 7*. Резку можно осуществлять с воздушным зазором между

Таблица 3. Режимы машинной резки углеродистой и низколегированной сталей в кислородсодержащих плазмообразующих средах

Расход рабочего газа, л/мин			Толщина металла, мм	Сила тока, А	Диаметр сопла, мм	Напряжение на дуге, В	Скорость резки, см/с	Средняя ширина реза, мм
Воздух	Кислород	Азот						
80			6	270–290		140–145	5,0–5,1	2,5–3,0
			10			145–150	3,7–4,2	2,5–3,0
	—	—	20		3	165–170	1,7–2,0	2,5–3,0
			30	290–310		175–180	1,0–1,1	3,0–4,0
90			40			190–195	0,5–0,66	4,0–6,0
—			6	260–280		120–130	6,0–6,4	2,5–3,0
—			10			125–135	4,0–4,5	2,5–3,0
	70–80	—	20	280–300	3	135–145	1,83–2,16	2,5–3,0
			30			150–160	1,0–1,25	3,0–3,5
			40			170–180	0,5–0,66	3,5–5,0
	60–75	20–25	10			70–75	4,16–4,5	4,0
			20			75–80	1,66–1,83	5,0
—			30	500	5	80–85	0,83–1,16	6,0
	45–60	15–20	40			85–95	0,58–0,66	7,0

разрезаемым листом и поверхностью воды (*рис. 7, а*), с касанием листа водной поверхности (*рис. 7, б*) , с погружением листа в воду (*рис. 7, в*), с дополнительной водяной завесой вокруг плазмотрона (*рис. 7, г*) и плазменной дуги (*рис. 7, д*), с погружением листа и плазмотрона в воду (*рис. 7, е*). При всех вариантах резки вредные выделения поглощаются водой. Наибольшее промышленное применение получили способы резки, показанные на рис. 7, *б, в*. Режимы обычной воздушно-плазменной резки и резки с водяной защитой малоуглеродистых и низколегированных сталей приведены в табл. 4.

Резка с водяной защитой отличается большей склонностью к образованию грата на кромках заготовок по сравнению с обычной воздушно-плазменной резкой (кроме схемы, приведенной на рис. 7, *а*). Для подавления

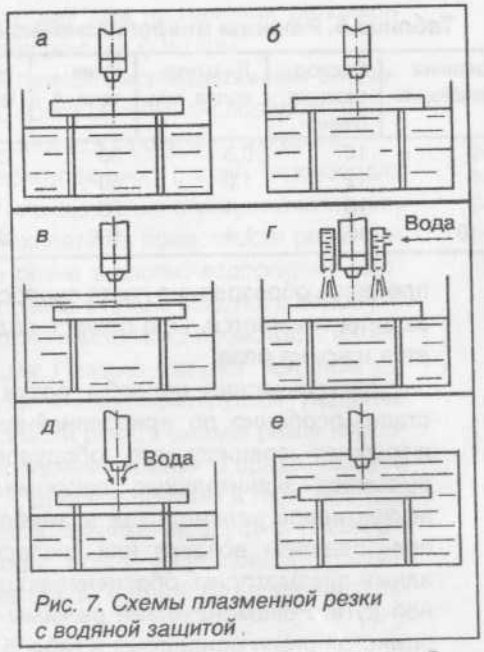


Рис. 7. Схемы плазменной резки с водяной защитой

Таблица 4. Режимы машинной воздушно-плазменной резки малоуглеродистых и низколегированных сталей

Толщина металла, мм	Напряжение на дуге, В	Сила тока, А	Скорость резки, см/с		
			обычной	над водой	над водой с водяной завесой
10	155–160	200	4,0	3,8	3,6
	165–170	300	6,8	6,5	6,1
	175–180	400	8,2	7,8	7,4
20	155–160	200	1,9	1,7	1,6
	165–170	300	3,4	3,1	2,9
	175–180	400	4,1	3,7	3,5
30	155–160	200	1,0	0,85	0,8
	165–170	300	2,0	1,7	1,6
	175–180	400	2,6	2,2	2,0
40	155–160	200	0,7	0,6	0,56
	165–170	300	1,2	1,0	0,95
	175–180	400	1,4	1,2	1,1
50	155–160	200	0,5	0,42	0,4
	165–170	300	0,7	0,6	0,56
	175–180	400	1,0	0,85	0,8

Таблица 5. Режимы микроплазменной резки малоуглеродистой стали

Толщина металла, мм	Расход воздуха, л/мин	Диаметр сопла, мм	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость резки, см/с	Ширина реза, мм
1–3	10	0,8	30	130	5,0–8,3	1,0–1,5
3–5	12	1,0	50	110	3,4–5,0	1,6–1,8
5–7	15	1,4	75	110	2,5–3,3	1,8–2,0
7–10	15	1,4	100	120	1,7–2,5	2,0–2,5

процесса образования грата скорость резки с использованием водяной защиты снижается. При резке с водяной защитой на 10–20% сокращается ширина реза.

Механические способы резки тонколистовой низкоуглеродистой стали, особенно по криволинейному контуру, достаточно трудоемки и требуют специального оборудования, а газокислородная резка вызывает значительные деформации. Для этих целей достаточно эффективной является так называемая микроплазменная резка с использованием воздуха или кислорода. При этом используют специальные плазмотроны, обеспечивающие устойчивое горение малоамперной дуги. Рекомендуемые режимы микроплазменной резки малоуглеродистой стали приведены в табл. 5.

Резку стали толщиной, указанной в табл. 5, можно выполнять на больших токах с более высокими скоростями, используя сопла диаметром 1,5–2 мм, но при этом ширина реза несколько возрастает.

Перспективным направлением совершенствования микроплазменной резки считается использование плазмотронов с диаметром канала 0,3 мм, имеющих вихревую и магнитную стабилизацию и использующих в качестве плазмообразующего газа чистый кислород [11].

Режимы резки нержавеющих сталей, цветных металлов и их сплавов

Как отмечалось выше, скорость резки и качество реза зависят прежде всего от мощности дуги и состава плазмообразующего газа. В то же время производительность и качество реза плазменной дугой во многом определяются плотностью, скрытой теплотой плавления, теплопроводностью и теплоемкостью разрезаемого материала. Последние две характеристики косвенно учитываются в формуле (1) полным тепловым КПД $\eta_{пр}$, представляющим произведение эффективного $\eta_и$ и термического $\eta_т$ КПД.

По некоторым данным, при воздушно–плазменной резке металла толщиной 6–40 мм полный тепловой КПД составляет при отработке углеродистой и низколегированной стали 0,207–0,272, нержавеющей стали — 0,122–0,168, алюминия и его сплавов — 0,084–0,142, меди и медных сплавов — 0,037–0,100. Поэтому при назначении режимов резки необходимо учитывать все перечисленные факторы.

Резку нержавеющих сталей осуществляют с использованием в качестве плазмообразующих газов воздуха, обогащенного кислородом, аргоно–водородных и азотно–водородных смесей, а также чистого азота.

Воздушно–плазменную резку нержавеющих сталей производят на режимах близких к режимам резки, низкоуглеродистых и низколегированных сталей [3, 7]. Наименьшую шероховатость поверхности реза коррозионно-стойкой стали достигают при резке в азотно-водородных смесях. Хорошие результаты обеспечивает резка в среде воздуха с водой [7]. В канале сопла под воздействием высоких температур происходит интенсивное испарение воды и ее диссоциация. Плазменная дуга при этом уплотняется, улучшается перенос энергии и интесифицируется удаление расплавленного металла и шлака из полости реза. Режимы резки коррозионно–стойких, жаростойких и плакированных сталей в среде воздуха с водой (по схеме, показанной на *рис. 7, д)* представлены в табл. 6.

Резы хромоникелевых сталей, выполненные воздушно–плазменной резкой, в том числе с добавкой воды, можно в большинстве случаев сваривать после зачистки металлической щеткой без дополнительной механической обработки.

Таблица 6. Режимы плазменной машинной резки коррозионно-стойких, жаростойких и плакированных сталей, осуществляемой в среде воздуха с водой

Толщина металла, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость резки, мм/с
4		160–165	50–59
6			42–50
8		165–170	34–42
10	270–290		29–34
12		170–175	25–29
14			24–25
16		175–180	22–24
18	270–290	180–185	20–22
20	290–310		17–20
24		185–190	13–15
30	290–310	190–195	9–10
40		195–200	5–7

Примечания: 1. Расход воздуха на зажигание дуги 0,25–0,33 л/с; на резку — 1,33–1,5 л/с. 2. Расход воды на резку 0,005–0,06 л/с. 3. Ширина реза по нижней кромке 2,5–3,5 мм. 4. При резке в среде воздуха ил азота скорость резки должна быть снижена на 15–20%.

В тех случаях, когда кромки реза будут работать в особо агрессивных средах или при повышенных температурах, интенсифицирующих коррозию, предпочтительно использовать в качестве плазмообразующего газа аргоно–водородные или азотно–водородные смеси, а также чистый азот. Если такой возможности нет, то кромки подвергают механической обработке.

Алюминий и его сплавы относятся к материалам, для которых применение плазменной резки наиболее эффективно, так как высокая скорость резки сочетается с хорошим качеством реза [2, 3, 7]. Они склонны к образованию тугоплавких окислов. Поэтому при резке необходимо обеспечить как можно более полное удаление окисленного металла из полости реза. Кроме того, алюминий в расплавленном состоянии активно поглощает водород. Важно, чтобы литой участок на кромке реза алюминия был минимальных размеров.

Наиболее высокую защиту расплавленного алюминия от окисления и наводораживания достигают при использовании в качестве плазмообразующего газа аргона. Преимуществом аргона является также способность поддерживать плазменную дугу при небольших напряжениях и малой силе токе. Аргоновую плазму обычно применяют при ручной резке листов из алюминиевых сплавов сравнительно небольшой толщины (до 12–20 мм). Недостаток аргоновой плазмы — относительно малая проплавляющая способность дуги и, как следствие, наименьшая по сравнению со всеми другими плазмообразующими газами скорость резки.

Таблица 7. Ориентировочные режимы плазменной резки алюминиевых сплавов

Толщина металла, мм	Диаметр сопла, мм	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Мощность, кВт	Расход газа, л/с		Скорость резки, мм/с
					аргона/азота	водорода	
15	3	250	140–160	40	0,2/0,4	0,14	17
30	5		180–200			0,3	10
50	5	450	160–180	50	0,4/0,5	0,3	7,5
80						0,4	7,0

Скорость резки можно существенно повысить за счет добавки водорода к аргону. Аргоно-водородные смеси, содержащие 35–50% водорода, обеспечивают минимальную шероховатость реза. По мере увеличения толщины разрезаемого металла рекомендуют увеличивать содержание водорода в смеси, доводя его при толщине 80–100 мм до 60–80%.

В оплавленном слое алюминиево–магниевых сплавов наблюдают равномерное по толщине реза выгорание магния. Внешний признак выгорания — интенсивное выделение белого дыма. При резке этих сплавов необходимо точное соблюдение режимов резки. Резы высокого качества получают при максимально важной скорости резки и содержании в аргоновой смеси 50% H_2. Для резки алюминиево–марганцевых сплавов и сплавов типа дуралюмина используют смеси с меньшим содержанием водорода, а также азотно–водородные смеси.

Ориентировочные режимы плазменной резки алюминиевых сплавов с применением аргона, азота и водорода приведены в табл. 7.

При воздушно–плазменной резке алюминиевых сплавов шероховатость поверхности реза весьма значительна. Так, при воздушно–плазменной резке алюминиевого сплава толщиной 30 мм она достигает Ra=150...180 мкм. При воздушно–плазменной резке сплава такой толщины с водяной защитой шероховатость существенно ниже (Ra=80...90 мкм). По сравнению с обычной воздушно-плазменной резкой налипание частиц на поверхность реза не наблюдается.

С уменьшением разрезаемой толщины алюминиевого сплава шероховатость реза снижается. Например, при резке алюминиевого сплава толщиной 8 мм она находится в пределах Ra=40...50 мкм.

Режимы плазменной машинной резки алюминиевых сплавов с использованием в качестве плазмообразующего газа воздуха с добавкой воды приведены в табл. 8. Для улучшения санитарно–гигиенических характеристик процесс рекомендуют вести с применением водяной защиты (*рис. 7, д*).

Медь и медные сплавы характеризуются высокой теплоемкостью и теплопроводностью, поэтому при их резке используют более мощные

Таблица 8. Режимы плазменной машинной резки алюминиевых сплавов в среде воздуха с водой

Толщина металла, мм	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость резки, мм/с
4	270–290	140–145	84–100
6			67–84
8	145–150	145–150	59–67
10			50–59
12	150–155	150–155	47–50
14			42–45
16	270–290	155–160	39–42
18			34–37
20	290–310	160–165	30–34
24		165–170	24–27
30	290–310	170–175	17–20
40		180–185	10–12

Примечания: 1. Расход воздуха на зажигание дуги 0,25–0,33 л/с; на резку — 1,33–1,5 л/с. 2. Расход воды на резку 0,005–0,06 л/с. 3. Ширина реза по нижней кромке 3,5–4,0 мм. 4. При резке в среде воздуха или азота скорость резки должна быть снижена на 25–30%.

Таблица 9. Ориентировочные режимы плазменной резки меди и латуни

Металл	Толщина металла, мм	Диаметр сопла, мм	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Мощность дуги, кВт	Расход газа, л/с				Скорость резки, мм/с
						аргона	азота	водорода	воздуха	
Медь	5	3	300	75	22	—	0,6	—	—	25
	15	4	300	92	25	—	0,53	—	—	11
	25		350	90	31	0,28	—	0,14	—	4
	40	7	700	120	84	0,1	—	1,1	2,8	10
	100			145	101		—			3
Латунь	6	3	260	70	18	—	1,17	—	—	29
	30	4	350	85	30	—	1,0	—	—	4
	90	5	500	140	70	—	0,56	0,28	—	3,4

дуги, чем при резке стали. В качестве плазмообразующего газа применяют воздух и азотно-водородные смеси с высоким содержанием водорода. Качество резов при этом примерно одинаково.

При воздушно-плазменной резке меди на поверхности реза образуется легкоудаляемый стекловидный грат. При резке латуни используют те же рабочие газы, что и при резке меди. По сравнению с медью скорость резки латуни может быть увеличена на 25–30% (табл. 9, 10).

Таблица 10. Режимы плазменной резки меди и сплавов на медной основе в среде воздуха с водой

Толщина металла, мм	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость резки, мм/с
4	270–290	140–145	118–126
6			50–59
8			44–50
10		145–150	34–42
12			30–37
14		150–155	27–30
16		155–160	24–27
18	290–310	160–165	20–24
20		165–170	17–20
24		170–175	13–17
30		180–185	10–12

Примечания: 1. Расход воздуха на зажигание дуги 0,25–0,33 л/с; на резку — 1,33–1,5 л/с. 2. Расход воды на резку 0,005–0,06 л/с. 3. Ширина реза по нижней кромке 2,5–3,0 мм. 4. При резке в среде воздуха или азота скорость резки должна быть снижена на 10–15%.

В целях улучшения санитарно-гигиенических характеристик процесс плазменной резки меди и ее сплавов предпочтительно вести с водяной защитой по схеме, показанной на *рис. 7, д.*

Титан и сплавы на его основе хорошо режет плазменная дуга. Наибольшую производительность достигают при использовании в качестве плазмообразующего газа воздуха и кислорода. При резке воздушной плазмой кромки реза на глубине 0,1–0,2 мм содержат по сравнению с основным металлом в 1,5 раза больше кислорода, в 7–10 раз — азота, в 4–8 раз — водорода. Поэтому кромки титановых заготовок после плазменной резки подлежат механической обработке.

Режимы резки толстолистового металла

При резке конструкционных сталей толщиной более 40 мм обычно используют кислородную резку, так как для таких толщин она является энергетически более выгодным процессом [10]. Кроме того, качество реза, выполненного плазменной дугой на этих толщинах, в ряде случаев уступает кислородной резке. Возникают также сложности с пробивкой листа плазменной дугой в произвольном месте его поверхности.

В настоящее время плазменную резку толстолистовых конструкционных сталей обычно применяют как разделительную, к которой не предъявляют высоких требований обеспечения необходимого

Таблица 11. Режимы плазменной резки в аргоно-водородной смеси

Материал	Толщина, мм	Диаметр сопла, мм	Сила тока дуги, А	Напряжение на дуге, В	Мощность дуги, кВт	Расход газа, м³/ч		Скорость резки, см/с
						аргона	водорода	
Сталь	24	5	700	130	91	0,63	3,5	2,66
	30	6	700	140	98	1,2	3,5	2,36
	36	6	700	150	105	1,2	3,5	2,02
	40	5	700	165	115,5	0,63	3,5	1,91
	70	6	700	150	105	1,7	3,5	0,72
	80	6	700	135	94,5	1,0	3,5	0,47
	120	6	800	160	128	1,5	4,0	0,29
Медь	20	4	600	120	72	1,5	3,0	2,50
	40	6	700	120	84	0,8	3,5	0,94
	50	6	700	125	87,5	0,8	3,5	0,55
	60	6	700	123	86,1	0,8	3,5	0,42
	80	6	700	135	94,5	1,0	3,5	0,23
	80	7	1100	142	156	1,0	5,0	0,66
	100	4	700	150	105	1,5	3,5	0,30
	120	6	700	160	102	0,8	3,5	0,10
Алюминий	40	6	700	125	86	1,0	3,5	2,77
	50	3	800	135	108	1,5	2,5	3,33
	70	4	800	140	72	1,5	2,5	1,94
	100	6	900	155	139,5	1,0	4,5	1,38

для детали качества реза. Тем не менее, с потребительской точки зрения задача использования плазменной дуги для резки толстолистового черного и цветного металлов является достаточно актуальной [34].

С увеличением толщины разрезаемого металла необходимо увеличивать мощность плазменной дуги и расход плазмообразующего газа. Мощность плазменной дуги увеличивают как за счет повышения силы тока, так и напряжения. При этом возрастает тепловая нагрузка на катод, и он может быстро выйти из строя. Существует несколько направлений, которые обеспечивают повышение мощности плазменной дуги:

1. Использование плазмотронов с вольфрамовыми электродами, в которых в качестве плазмообразующих газов применяют аргоно-водородные, азотно-водородные и аргоно-азотно-водородные смеси [2]. В этом случае устойчивую работу плазмотронов обеспечивает сила тока до 800 А и напряжение на дуге 120–160 В.

Режимы плазменной резки в аргоно-водородной смеси различных материалов толщиной от 20 до 120 мм приведены в табл. 11.

2. Использование обратной полярности: «плюс» подводят к электроду, а «минус» — к разрезаемому металлу [7]. При этом катодное пятно более глубоко проникает в полость реза. В случае применения двухатомных газов или их смесей, например азота или воздуха, область существования катодного пятна расширяется и смещается в нижнюю часть фронтальной поверхности реза, эффект усиливается с ростом напряжения на дуге.

Таблица 12. Режимы плазменной машинной резки металлов больших толщин

Металл	Толщина, мм	Сила тока, А	Расход воздуха на резку, л/с	Напряжение на дуге, В	Скорость резки, мм/с	Ширина реза, мм
Сталь конструкционная	30	360–400	1,7–2,0	190–195	25	4–5
		850–620		200–205	40	5–6
	40	360–400	2,16–2,5	190–200	14	5–6
	50	580–620		200–205	29	6–6,5
				200–210	9	6–7
				205–210	21	7–7,5
	60	360–400	1,7–2,0	205–215	6	7–7,5
	65	580–620	2,16–2,5	210–220	15	7,5–8,5
					9	
Сталь коррозионно-стойкая	30	350	1,7–1,8	180–190	24	4–5
		500	1,7–1,83	190–195	30	5–6
Латунь	30	350	1,7–1,83	180–190	19	5–6
	50			200–205	11	7,5–8
Алюминий	55			200–205	12	6–7

Для толщин металлов 30–60 мм рекомендуют использовать в качестве плазмообразующего газа воздух, силу тока дуги 360–400 А, размеры канала сопла 3,5±1 мм при длине 6–8 мм, расход воздуха 1,7–2,0 л/с. При указанных силе тока и расходе воздуха стандартный гафниевый электрод работоспособен в течение 1,5–2 ч, что соответствует 60 м реза при толщине металла 50 мм. Режимы резки приведены в табл. 12.

3. Использование расщепленной и вращающейся дуги. Принцип расщепления дуги предусматривает перераспределение токовой и тепловой нагрузок на большую поверхность за счет установки в катододержателе нескольких гафниевых или циркониевых вставок [7, 35]. Эти вставки включаются в работу по мере повышения тока примерно через каждые 200 А.

Вращающуюся дугу применяют в плазмотронах с медными полыми электродами [7]. Отличительной особенностью таких электродов

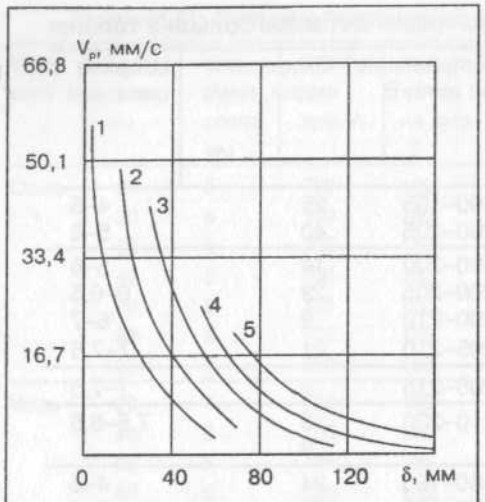


Рис. 8. Изменение скорости резки высоколегированной стали плазмотроном ПВ–47 в зависимости от толщины разрезаемого металла при силе тока: 1 — 200 А; 2 — 300 А; 3 — 400 А; 4 — 500 А; 5 — 600 А

является интенсивное перемещение опорного пятна дуги по сильно охлаждаемой внутренней поверхности под действием газового вихря, создаваемого тангенциальными отверстиями в завихрителе. При этом не происходит сильного локального нагрева и в сочетании с интенсивным наружным охлаждением обеспечивается длительный срок службы электродов (примерно 40 ч). На *рис. 8* показана скорость резки высоколегированной стали различной толщины при силе сварочного тока от 200 до 600 А.

Как отмечалось выше, пробивка толстого листа в начальной стадии процесса резки является довольно серьезной задачей. Обычно пробивку стальных листов толщиной свыше 30 мм при резке на стационарных машинах производят в процессе перемещения резака над поверхностью листа с одновременным его опусканием с высоты 20–25 мм до рабочей высоты 10–12 мм. При этом выплавляемая масса выбрасывается в сторону, противоположную движению резака.

Удовлетворительную пробивку можно осуществить при условии, что мощность дуги достаточна для надежного прорезания и металла данной толщины, система регулирования и исполнительные устройства обеспечивают плавное нарастание силы тока и подачи плазмообразующего газа, скорость перемещения плазмотрона в 1,5–2 раза меньше рабочей.

При резке листов свыше 70 мм проплавление металла затруднено, и в этом случае необходимо предварительно просверливать отверстие диаметром, не превышающим ширины реза (до 10–12 мм).

Качество реза

Качество реза, выполненного плазменно-дуговой резкой, характеризуется размерами образующегося грата, отклонениями перпендикулярности реза, шероховатостью, протяженностью зоны термического влияния и газонасыщенностью кромок.

При плазменной резке размеры грата, как правило, значительно меньше, чем при газокислородной резке сопоставимых толщин углеродистой стали. В то же время на размеры грата при плазменной резке оказывает влияние ряд технологических факторов: скорость резки, расход плазмообразующего газа, расстояние между плазмотроном и поверхностью разрезаемых листов и др. [7, 18, 19, 20].



рис. 9. Схема влияния скорости резки на образование грата

Для заданной силы тока существует диапазон скоростей, при которых грат минимален. Схематически это показано на *рис. 9* [18]. Грат образуется как при малых скоростях (МС), так и на повышенных скоростях (ПС) резки. На *рис. 9* заштрихована зона, в которой размеры грата минимальны. Грат, образующийся при пониженных скоростях резки, легко удаляется с кромок реза. Удаление грата, образующегося при повышенных скоростях, является более трудоемкой операцией. На практике сталкиваются с проблемой грата при работе на максимальных скоростях резки. На рис. 10 показано влияние скорости воздушно-плазменной резки стали ВСт3сп толщиной 6 и 10 мм на размеры грата (ширина a_1 и высота a_2) [20]. Эти данные подтверждают факт существенной зависимости размеров грата от скорости резки, причем с увеличением толщины металла скорость резки, при которой величина грата минимальна, уменьшается. Минимальный грат отмечается при расходе плазмообразующего воздуха 70–80 л/мин [20]. С уменьшением расхода величина грата возрастает, что можно объяснить ослаблением механического воздействия плазменного потока на нижнюю кромку листа.

Повышенное гратообразование наблюдают и при увеличении расстояния от плазмотрона до поверхности листа, особенно когда процесс резки осуществляют на скоростях, близких к предельно допустимым. Это происходит при резке листов, не подвергнутых предварительной правке, либо имеющих остаточные деформации, возникшие в процессе обработки. В таких случаях применение автоматических устройств, поддерживающих расстояние между плазмотроном и разрезаемым листом, является обязательным.

Использование в качестве плазмообразующего газа кислорода взамен воздуха способствует уменьшению размеров грата [7, 18]. Это подтверждают данные, приведенные в табл. 13.

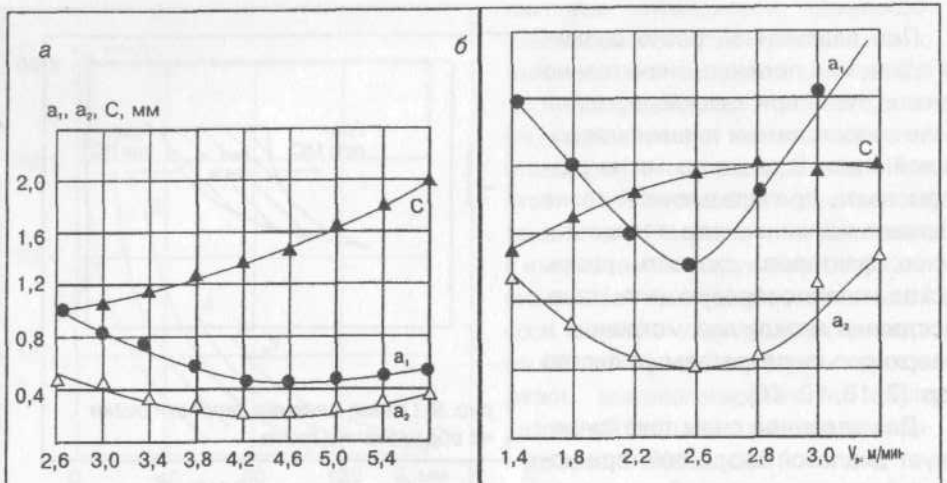


Рис. 10. Зависимость размеров грата a_1, a_2 и неперпендикулярности поверхности реза С от скорости резки металла толщиной 6 и 10 мм

Резка с водяной защитой отличается большей склонностью к образованию грата на кромках заготовок по сравнению с обычной воздушно-плазменной резкой [14, 15]. Для подавления процесса образования грата скорость резки при использовании водяной защиты снижается на 5–20% (см. *рис. 7, б, в*), а в отдельных случаях — до 40–50% (см. *рис. 7, г*).

При плазменной резке ширина реза у верхних кромок больше, чем у нижних. С увеличением степени сжатия плазмы и уменьшением диаметра сопла плазмотрона уменьшается разница между шириной реза по толщине металла и неперпендикулярностью кромок. Величина неперпендикулярности кромок при плазменной резке представляет собой половину разницы ширины реза в верхней и нижней плоскостях разрезаемого листа. Наибольшее отклонение поверхности реза от перпендикулярности регламентировано ГОСТ 14792–80 в зависимости от толщины разрезаемого металла (табл. 14).

Скорость плазменной резки при прочих равных условиях оказывает существенное влияние на ширину реза и неперпендикулярность кромок. На *рис. 10* показано, что с увеличением скорости резки неперпендикулярность возрастает [20].

При увеличении скорости резки до 9,6 см/с (толщина листа 6 мм) и 6,3 см/с (толщина листа 10 мм) величина неперпендикулярности поверхности реза составляет соответственно 2 и 1,6 мм, что находится в пределах третьего класса (см. табл. 14). С увеличением расстояния

Таблица 13. Режимы чистовой резки и качество реза при воздушно-плазменной и кислородно-плазменной резке углеродистой стали

Способ резки	Толщина металла, мм	Режимы резки				Параметры реза			
		Сила тока резки, А	Напряжение на дуге, В	Диаметр сопла, мм	Скорость резки, см/с	Ширина реза, мм		Неперпендикулярность, мм	Высота грата, мм
						Верхняя кромка	Нижняя кромка		
Воздушно-плазменная	3	60–65	110–115	1,2	3,33	1,8	1,5	0,15	1,1
					4,16	1,8	1,4	0,20	0,9
					5,00	1,6	1,1	0,30	0,3
					5,83	1,6	1,0	0,30	0,5
Воздушно-плазменная с погружением листа в воду	3	60–65	110–115	1,2	3,33	1,7	1,4	0,15	1,6
					4,16	1,7	1,4	0,15	0,8
					5,00	1,5	1,2	0,15	0,5
					5,83	1,3	1,0	0,15	0,9
Кислородно-плазменная	3	60–65	110–115	1,2	3,33	2,0	1,8	0,10	0,6
					4,16	1,8	1,5	0,15	0,5
					5,00	1,7	1,4	0,15	0,2
					5,83	1,6	1,3	0,15	0,2
					6,66	1,3	1,0	0,15	0,3
Кислородно-плазменная с погружением листа в воду	3	60–65	110–115	1,2	3,33	1,8	1,6	0,10	0,8
					4,16	1,4	1,2	0,10	0,5
					5,00	1,4	1,1	0,15	0,3
					5,83	1,3	1,0	0,15	0,6
Воздушно-плазменная	6	90–100	120–130	1,5	2,50	2,6	1,7	0,45	1,0
					3,33	2,5	1,5	0,50	0,2
					4,16	2,4	1,2	0,60	0,8
Воздушно-плазменная с погружением листа в воду	6	90–100	120–130	1,5	2,50	2,2	1,5	0,35	0,3
					3,33	2,1	1,3	0,40	0,5
					4,16	2,0	1,1	0,45	1,0
Кислородно-плазменная	6	90–100	120–130	1,5	2,50	2,8	2,5	0,15	0,6
					3,33	2,8	2,2	0,30	0,3
					4,16	2,6	1,6	0,50	0,2
					5,00	2,5	1,3	0,60	0,3
Кислородно-плазменная с погружением листа в воду	6	90–100	120–130	1,5	2,50	2,3	2,0	0,15	0,4
					3,33	2,2	1,8	0,20	0,3
					4,16	2,1	1,3	0,40	0,3
Воздушно-плазменная	10	270–280	135–140	3,0	2,50	5,2	2,2	1,5	1,0
					3,33	5,2	1,8	2,6	0,5
					4,16	5,1	1,1	2,0	0,4
					5,00	5,0	0,8	2,2	0,5
					5,83	4,9	0,7	2,1	1,2
Воздушно-плазменная с погружением листа в воду	10	270–280	135–140	3,0	2,50	4,6	2,0	1,3	1,2
					3,33	4,5	1,7	1,4	0,6
					4,16	4,5	1,1	1,7	0,5
					5,00	4,3	0,7	1,8	1,1
					5,83	4,3	0,7	1,8	1,2
Кислородно-плазменная	10	270–280	135–140	3,0	2,50	9,3	3,0	1,1	0,5
					3,33	9,2	2,6	1,3	0,4
					4,16	5,0	2,2	1,4	0,2
					5,00	5,0	1,8	1,6	0,2
					5,83	5,0	1,6	1,7	0,6
Кислородно-плазменная с погружением листа в воду	10	270–280	135–140	3,0	2,50	4,7	2,9	0,9	0,5
					3,33	4,6	2,8	0,9	0,4
					4,16	4,5	2,1	1,2	0,4
					5,00	4,5	2,1	1,2	0,5
					5,83	4,5	1,9	1,3	0,7

Таблица 14. Допускаемые отклонения, мм, перпендикулярности реза при машинной вырезке деталей по ГОСТ 14792–80

Класс	Способ резки	Толщина разрезаемого металла, мм			
		5–12	13–30	31–60	61–100
I	Кислородная	0,2	0,3	0,4	0,5
	Плазменно-дуговая	0,4	0,5	0,7	—
II	Кислородная	0,5	0,7	1,0	1,5
	Плазменно-дуговая	1,0	1,2	1,6	—
III	Кислородная	1,0	1,5	2,0	2,5
	Плазменно-дуговая	2,3	3,0	4,0	—

от среза сопла до плоскости листа неперпендикулярность также возрастает [19, 20]. Неперпендикулярность реза заметно ниже при кислородно-плазменной резке, в том числе с погружением листов в воду (см. табл. 13). Сравнение воздушно-плазменной резки листов толщиной 6–10 мм с кислородно-плазменной в варианте использования водяной защиты позволяет сделать вывод о том, что в последнем случае качество реза по параметру неперпендикулярности соответствует первому и второму классам по ГОСТ 14792–80.

Положительное влияние на качество реза оказывают добавки воды в небольших количествах к плазмообразующему газу [7]. При этом используют специальное сопло, внутренняя поверхность которого сопряжена с основным соплом (*рис. 11*).

Вода, поступающая внутрь канала сопла, частично испаряется, диссоциирует на водород и кислород, которые, смешиваясь с основным плазмообразующим газом, создают комбинированную высокоэффективную газовую среду. При этом проникающая способность дуги заметно увеличивается, а качество реза улучшается. Данные, приведенные в табл. 15, получены при резке углеродистой стали толщиной 7 мм.

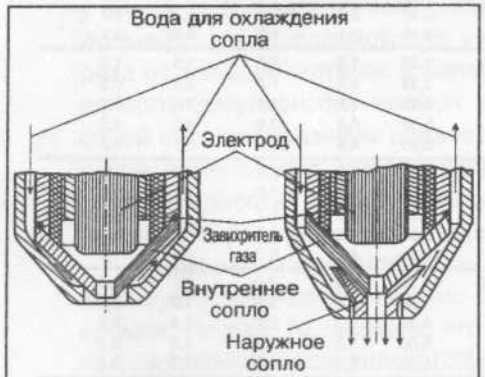


Рис. 11. Схема головки плазмотрона: а — для обычной плазменной резки; б — для плазменной резки с добавкой воды

На поверхности реза обычно образуются штрихи (бороздки), что является следствием непостоянства мгновенной скорости резки при средней определенной скорости резки.

При одной и той же амплитуде скорости и частоте глубина бороздок при плазменной резке значительно меньше, чем при кислородной.

Установлено, что при плазменной резке амплитуда скорости ниже 10 мм/с не оказывает заметного влияния на образование бороздок [7]. При амплитуде скоростей, которые приблизительно на порядок выше указанной характеристики кислородной резки, при плазменной резке появляются бороздки. В отличие от глубины бороздок неровность (волнистость) поверхности при плазменной резке значительно больше, чем при кислородной. Шероховатость поверхности реза (высота неровностей) после машинной термической резки металла регламентирует ГОСТ 14792–80 (табл. 16).

Для кромок, подлежащих сварке и механической обработке, а также для поверхности фасок допускается шероховатость не ниже третьего класса. Для свободных кромок (не подлежащих сварке) деталей большинства металлоконструкций устанавливается второй класс шероховатости. Измерения шероховатости поверхности реза R_z показали, что в диапазоне исследованных режимов и разрезаемых толщин (см. табл. 13) она изменяется незначительно и составляет 20–70 мкм, а для оптимальных режимов не выходит за пределы 50 мкм, что соответствует I классу (ГОСТ 14792–80). При кислородно-плазменной резке шероховатость ниже, чем при воздушно-плазменной.

Общим для плазменной резки в различных плазмообразующих средах является образование у кромки реза зоны термического влияния (ЗТВ) с участками оплавления и структурных изменений в твердом металле. Допускаемые значения протяженности зоны термического влияния для углеродистых сталей, отвечающие ГОСТ 14792–80, приведены в табл. 17.

В ЗТВ сталей с низким содержанием углерода изменения металла похожи на изменения, происходящие при кислородной резке с использованием горючих газов. Доля литого участка в низкоуглеродистых сталях составляет обычно 20–30% и более от общей протяженности ЗТВ. В углеродистых сталях следует участок крупного зерна, затем участки полной и неполной перекристаллизации и исходная структура металла.

Глубина ЗТВ и соответственно отдельных ее участков при резке стали выбранной марки и толщины изменяется в зависимости от условий резки. С увеличением расхода газа, а также с уменьшением силы тока зона уменьшается. Большую роль играет состав рабочей среды, стабилизирующий режущую дугу. При резке сталей воздушно- и кислородно-плазменной дугой ЗТВ обычно меньше, чем при резке неактивными газами. В табл. 18 приведены данные о величине литой зоны и общей ЗТВ в зависимости от режимов резки стали марки ВСт3сп

Таблица 15. Зависимость ширины реза и скоса кромок при плазменной резке от скорости резки, расхода газа и воды

Вариант	Плазмообразующая среда	Расход газа, л/с	Расход воды, л/с	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость резки, мм/с	Ширина реза, мм		Средняя величина скоса, мм	Наличие грата
							по верхней кромке	по нижней кромке		
I	Воздух+ вода	1,3	0,005–0,0057	280	160	16,7	6,0	4,0	1,0	Легкий грат
					155	33,0	5,2	2,6	1,3	Отдельные капли
					150	50,0	5,0	2,0	1,5	Грат средней величины
	Кислрод+ вода	1,50	0,003–0,0033	270	150	16,7	8,0	6,2	0,9	Следы грата
					145	33,0	6,1	4,0	1,05	» »
					140	50,0	6,1	3,0	1,55	» »
II	Водух+ вода	0,83	0,005–0,0057	280	145	36,7	5,5	2,5	1,5	Легкий грат
		1,33			150		5,3	2,5	1,4	Отдельные капли
		2,0			155		5,0	2,6	1,2	» »
	Кислрод+ вода	0,92	0,003–0,0033	270	135	36,7	6,1	2,6	1,75	Следы грата
		1,50			140		6,0	3,5	1,25	» »
		2,20			150		5,5	3,1	1,2	» »
III	Воздух+ вода	1,33	0,0017	280	150	36,7	5,2	2,5	1,35	Следы грата
			0,005		150		5,0		1.25	То же
			0,0083		155		5,0		1,25	Грат средней величины
	Кислрод+ вода	1,50	0,0017	270	145	36,7	6,1	3,1	1,5	Следы грата
			0,0033		148		6,0	3,0	1,5	» »
			0,0047		150		6,0	3,2	1,4	» »

Таблица 16. Допускаемые значения шероховатости поверхности реза, мм, по ГОСТ 14792–80

Класс	Способ резки	Толщина разрезаемого металла, мм			
		5–12	13–30	31–60	61–100
I	Кислородная	0,050	0,060	0,070	0,085
	Плазменно-дуговая	0,050	0,060	0,070	—
II	Кислородная	0,080	0,160	0,250	0,500
	Плазменно-дуговая	0,100	0,200	0,320	—
III	Кислородная	1,160	0,250	0,500	1,00
	Плазменно-дуговая	0,200	0,320	0,630	—

Таблица 17. Допускаемые значения протяженности зоны термического влияния, мм, для углеродистых сталей по ГОСТ 14792–80

Класс	Толщина разрезаемой углеродистой стали, мм		
	5–12	13–30	31–60
I	0,2	0,4	0,8
II	0,8	1,6	3,2
III	1,6	3,2	6,4

толщиной 9 мм и состава плазмообразующей среды (диаметр сопла 3 мм) [7].

Существенное влияние на размеры ЗТВ оказывает водяная защита [14, 21]. Ширина, тип структуры а также твердость ЗТВ при плазменной резке зависят от скорости охлаждения. При резке листов, касающихся водной поверхности (см. *рис. 7, б*), а также погруженных в воду (см. *рис. 7, в*) скорость охлаждения при прочих равных условиях заметно возрастает. При резке конструкционной углеродистой стали ВСт3сп с погружением в воду ширина зоны термического влияния примерно в 2 раза, а в случае резки с касанием поверхности воды в 1,5 раза меньше, чем при резке на воздухе. Независимо от среды, в которой осуществляют резку металла толщиной 10–20 мм, происходит образование мартенситно-бейнитных структур твердостью 330–400 $HV_{0,2}$. Нижние значения относятся к резке на воздухе, а верхние — с использованием водяной защиты.

Структуры ЗТВ при плазменной резке на воздухе и с водяной защитой стали ВСт3сп и низколегированной стали 09Г2С имеют незначительные отличия. При резке низколегированной стали повышенной прочности марки 18Г2А наблюдается значительное повышение твердости приповерхностных слоев до 850 $HV_{0,2}$. Ширина ЗТВ составляет 0,8 мм.

Таблица 18. Изменение ЗТВ в зависимости от состава плазмообразующей среды

Номер образца	Плазмообразу-	Режим резки					Размер литой зоны, мм	Глубина ЗТВ, мм
		Защитный газ	Расход плазмообразующего газа, л/мин	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость резки, м/мин		
1	Воздух	—	80–90	300	130	2,5	0,030	0,54
2		O_2					0,020	0,45
3	Воздух+вода	—			150		Нет светлой полосы	0,50
4		—	80	300	130	1,5	0,014	0,75
5		—				2,5	0,018	0,70
6	Кислород	—	150	300	140	2,7	Нет светлой полосы	0,3–0,45
7		—	75	200		2,2	0,014–0,018	0,45–0,50
8	Кислород+вода	—	80–90	290	150	2,5	Нет светлой полосы	0,40
9	CO_2	CO_2	80	290	120			0,60–0,90

Ощутима разница и в структуре ЗТВ при резке среднеуглеродистой стали 45. При резке этой стали на воздухе ширина полосы высокоуглеродистого мартенсита равна 0,03–0,04 мм, выявлен также участок крупноигольчатого мартенсита и область шириной 0,22–0,24 мм мелкоигольчатого мартенсита. В случае резки с водяной защитой ширина полосы высокоуглеродистого мартенсита значительно меньше и составляет 0,006–0,01 мм, крупноигольчатый мартенсит отсутствует, а область мелкоигольчатого мартенсита равна 0,26–0,28 мм. Твердость при этом достигает 1000 $HV_{0,2}$, а наличие закалочных структур может привести к образованию холодных трещин.

При воздушно-плазменной резке низкоуглеродистых и низколегированных сталей в твердых наазотированных и науглероженных зонах могут также возникать мелкие микротрещины. Под воздействием плазменной дуги может происходить выгорание включений серы либо их подплавление, что является причиной образования трещин по границам зерен. В процессе дальнейшей сварки листов с мелкими горячими трещинами под воздействием термодеформационного цикла возможно распространение трещин и образование ламинарных трещин.

Все эти обстоятельства должны быть учтены при разработке технологии резки конкретной марки стали.

Процессы плазменной резки, обусловленные выплавлением металла мощным электродуговым разрядом, вызывают насыщение кромок реза газами из атмосферы плазмы. При воздушно-плазменной резке насыщение кромок происходит в основном азотом и кислородом. Наибольшую опасность для сварных соединений, выполненных по кромкам плазменного реза, представляет азот. При плазменной резке в кромки детали азот может попадать из плазмообразующей среды (в случае применения азота, воздуха или газовых смесей, содержащих азот) либо из окружающей среды за счет инжекции в столб дуги атмосферного воздуха.

В зоне дугового разряда происходит диссоциация и ионизация азота. Атомарный азот в момент своего выделения может растворяться в жидком металле. Установлено, что введение кислорода или кислородосодержащих газов при постоянной концентрации азота в атмосфере дуги приводит к увеличению содержания азота в наплавленном металле [22]. Экспериментально установлено, что максимальное содержание азота в кромке воздушно-плазменного реза в 50 раз больше, чем в исходном металле, и почти в 10 раз превышает растворимость азота в стали Ст3 [23].

Максимально насыщаются газами литой участок зоны термического влияния. Поэтому снижение азота в кромках воздушно-плазменного реза достигают при условии уменьшения глубины литого участка за счет снижения скорости резки, повышения напряжения на дуге, изменения направления резки и др. [23].

Использование кислорода в качестве плазмообразующего газа позволяет уменьшить насыщение кромок азотом. Это происходит за счет уменьшения литого слоя на поверхности реза, образования шлаковой пленки на поверхности жидкого металла, которая уменьшает скорость поглощения азота [7].

Однако получить минимальное содержание азота (не превышающее предельной растворимости в сталях 09Г2 и ВСт3сп) при кислородно-плазменной резке удается только при условии использования дополнительной концентричной кислородной завесы для окружения дуги [24].

Применяя водяную защиту можно также существенно ограничить насыщение кромок азотом. Автор выполнил плазменно-дуговую резку стали ВСт3сп толщиной 10 мм ($I_р$=200 А, $U_д$=180 В, $V_р$=4 см/с) по трем вариантам: обычная воздушно-плазменная, воздушно-плазменная и кислородно–плазменая с погружением листов в воду.

Содержание азота и распределение его по поверхности реза и в глубину металла от нее определяли методом локального масс-спек-



Рис. 12. Распределение азота в глубину L кромки от поверхности реза при различных способах плазменной резки

трального анализа. Результаты исследования распределения азота показаны на *рис. 12*. При различных способах воздушно-плазменной резки содержание азота на поверхности реза примерно одинаково. В то же время на расстоянии 0,1 мм от поверхности реза содержание азота при воздушно-плазменной резке с водяной защитой (кривая *2*) снижается практически до уровня, имеющегося в основном металле (0,0064%). Аналогичное снижение содержания азота в случае обычной воздушно-плазменной резки (кривая *1*) наблюдают только на расстоянии 0,8 мм. Такой характер распределения азота можно объяснить уменьшением литого участка и ограничением возможности диффузии азота в глубь металла. При этом водород, получаемый путем разложения воды в столбе дуги, положительно влияет на десорбцию азота. Можно предположить, что благодаря высокой подвижности и проникающей способности водорода в процессе воздействия на металл плазменной дуги дефектные участки металла (дислокации, микронеровности, трещины и др.) на поверхности реза заполняют атомы водорода, препятствуя проникновению менее подвижных атомов азота.

В процессе кислородно-плазменной резки с водяной защитой практически исключается всасывание окружающего воздуха в зону дуги, и поэтому содержание азота на поверхности реза близко к его содержанию в основном металле (кривая *3*). Минимальное содержание кислорода на поверхности реза обеспечивается при использовании азота в качестве плазмообразующего газа, а максимальное — при использовании кислородной плазмы [7].

Точность вырезки деталей

Точность и качество механизированной кислородной и плазменной резки регламентированы ГОСТ 14792–80. Классы точности и предельные отклонения размеров вырезанных деталей и заготовок от номинальных значений должны соответствовать данным табл. 19. Предельные отклонения размеров вырезанных деталей и заготовок от прямолинейности устанавливают в половинном размере от норм, указанных в табл. 19.

Таблица 19. Допускаемые отклонения размеров деталей от номинальных, мм, по ГОСТ 14792–80

Класс точности	Способ резки	Толщина листа, мм	Размер детали или заготовки, мм			
			До 500	Св.500 до 1500	Св.1500 до 2500	Св. 2500 до 5000
1	Плазменная и кислородная	5–30, 31–60	± 1	±1,5	±2,0	±2,5
	Кислородная	61–100	±1,5	±2,0	±2,5	±3,0
2	Плазменная и кислородная	5–30	±2,0	±2,5	±3,0	±3,5
		31–60	±2,5	±3,0	±3,5	±4,0
	Кислородная	61–100	±3,0	±3,5	±4,0	±4,5
3	Плазменная и кислородная	5–30	±3,5	±3,5	±4,0	±4,5
		31–60	±4,0	±4,0	±4,5	±5,0
	Кислородная	61–100	±4,5	±4,5	±5,0	±5,5

Классы вырезаемой детали или заготовки должны быть указаны в технологической документации и в нормативной документации на машины для кислородной и плазменной резки металлов и обозначены четырехзначным числом. Это число указывает класс точности вырезаемой детали или заготовки и классы в зависимости от отклонения поверхности реза от норм перпендикулярности, шероховатости и протяженности ЗТВ. Если какой-либо показатель не определяют, то его обозначают нулем. Перед четырехзначным числом должно быть указано обозначение способа резки: К–кислородная, П–плазменно-дуговая.

Основными факторами, определяющими форму и размеры при термической резке, являются следующие: состояние исходного (разрезаемого) металла (чистота поверхности, химический состав, наличие расслоений, качество правки, размеры исходного листа); качество разметки, изготовления копир-чертежей и подготовки числовых программ; конструктивные особенности и состояние машины для термической резки (прямолинейность направляющих путей, погрешность изготовления зубчатых колес, опорных катков, люфты в передачах, статические и динамические ошибки в системе управления); конструкция раскроечного стола для термической резки, форма и размеры детали (толщина, габаритные размеры, отношение длины к ширине, наличие или отсутствие вырезов); технология вырезки деталей, определяющая термические деформации (способ и режим резки, использование водяной защиты, последовательность резки, наличие перемычек) [6, 7].

Как показывает практика, требования первого и второго классов точности обеспечиваются при использовании портальных машин с чис-

ловым программным управлением при условии принятия мер для поддержания точности их работы на уровне, указанном в паспорте машины. Точность по второму и третьему классам обеспечивается машинами с фотоэлектронным управлением при условии обеспечения требуемой точности изготовления копир-чертежей не менее ±1,0 мм. Значениями допусков третьего класса точности можно руководствоваться для деталей, вырезаемых переносными машинами и ручными резаками.

Роль технологических факторов при резке проявляется при воздействии на величину остаточных деформаций. При термической резке возникают следующие виды остаточных деформаций: продольная деформация удлинения или укорочение; изгиб в плоскости вырезаемой детали [6]. Наибольшее влияние на точность вырезки деталей оказывает изгиб деталей в плоскости и ее продольное укорочение. Изгиб детали особенно сильно проявляется при вырезке деталей большой длины, так как стрелка прогиба пропорциональна квадрату длины детали.

На *рис. 13* показана стрелка прогиба полос из стали ВСтЗсп шириной 150 мм и длиной 1000 мм различной толщины, вырезанных обычной воздушно-плазменной резкой и с частичным погружением листа в воду. В последнем случае деформации значительно меньше.

Снижение деформаций при резке с водяной защитой подтверждается также следующим опытом. Пластины из стали ВСтЗсп размером 14×100×500 мм вырезали плазменной дугой вдоль по центру на длину 250 мм (I_p=280 А, $U_д$=180 В, V_p=3,6 см/с). После этого замеряли расхождение кромок в начале реза. При обычной воздушно-плазменной резке кромки разошлись на 8,0–8,2 мм, а в случае резки с частичным погружением пластины в воду — на 4,0–4,5 мм. При всех способах термической резки увеличение скорости благоприятно влияет на снижение деформаций.

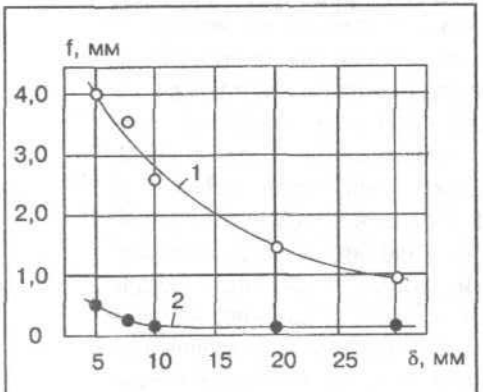


Рис. 13. Деформация f полос при воздушно-плазменной резке металла различной толщины δв обычных условиях 1 с погружением в воду 2

Для снижения деформаций при термической резке следует придерживаться следующих рекомендаций: резку каждой детали начинать с кромки, имеющей наибольшую длину реза и расположенной у края листа, а заканчивать по короткой кромке или кромке с припуском; первыми вырезать, начиная от края

листа, детали максимальных габаритов и требующие наиболее точного изготовления, а затем последующие ряды деталей в направлении противоположной кромки с сохранением принципа наибольшей жесткости для вырезаемой детали и исходного листа; при формировании карт раскроя (программы раскроя) стремиться размещать узкие и длинные детали вдоль продольной кромки листа, а короткие — в середине листа и у противоположной кромки, обеспечивая по возможности совмещение резов; отверстия в деталях выполнять до резки основного контура детали; при вырезке круглых деталей (фланцы, диски, наварыши) закреплять вырезаемые детали электромагнитными прижимами или заклинивать рез по мере выполнения резки для того, чтобы устранить смещение начала и конца ступеньки.

С целью уменьшения деформаций при резке деталей со сложным контуром, узких деталей большой протяженности, а также деталей, требующих высокой точности резки, желательно оставлять в листе непрорезанные участки (перемычки) с целью создания жесткого контура. Такие перемычки обычно оставляют при вырезке деталей из листов толщиной до 12–14 мм, с отношением длины к ширине 10:1 и более.

Длина перемычки примерно равна толщине разрезаемого листа, но не более 10 мм. При вырезке прямоугольных деталей расстояние между перемычками может быть принято равным 6–8 ширины вырезаемой детали, но не более 2500 мм. На каждой детали оставляют не менее двух перемычек.

При вырезке деталей с перемычками, которые выполняют роль закрепления, частично предупреждающего изгиб детали и ее продольное укорочение, остаточная стрелка прогиба вырезанной детали может быть определена по графику *(рис. 14)* [6]. Влияние толщины детали на ее прогиб в плоскости листа невелико, поэтому данные, показанные на *рис. 14* можно распространить на детали всех толщин.

Если деталь имеет сложную форму, то количество перемычек определяют приближенно по эквивалентному прямоугольнику, построенному на базе данной детали.

Перемычки разрезают после вырезки всех деталей. Удаление перемычек обычно производят вручную после снятия деталей с раскроечного стола машины.

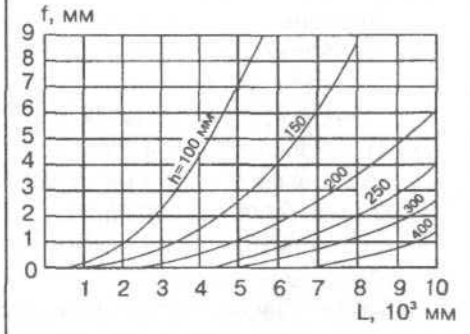


Рис. 14. График для определения стрелки прогиба f при воздушно-плазменной резке с перемычками из углеродистой стали шириной h и длиной L

Санитарно–гигиенические характеристики процесса

Плазменная резка металлов имеет ряд недостатков: выделение аэрозоля, высокочастотный шум в комбинации с ультразвуком, электромагнитное излучение оптического диапазона (ультрафиолетового, видимого и инфракрасного) и ионизация воздуха [6, 14, 25, 26, 27, 28, 29].

Особую опасность представляет аэрозоль, твердая составляющая которого состоит из соединений обрабатываемых металлов, а газовая — в основном из оксидов азота и озона (в зависимости от вида плазмообразующего газа).

Для удаления выделяющегося при резке аэрозоля плазменные установки снабжают мощными вентиляционными системами, которые, как правило, имеют большие габариты, высокую стоимость и не всегда удобны и эффективны в работе.

Применение водяной защиты позволяет радикально улучшить санитарно-гигиенические характеристики плазменной резки [7,14, 27, 28].

Содержание вредных веществ в воздухе в зоне дыхания резчика при воздушно-плазменной резке с водяной защитой в несколько раз ниже, чем при обычной и находится в пределах допустимых норм (табл. 20).

При резке с водяной защитой нет необходимости в использовании дополнительных вентиляционных систем.

Основным источником шума и ультразвука при плазменной резке является плазмотрон [26,28,29]. Установлено, что суммарные уровни шума и ультразвука на расстоянии 0,25 м от плазмотрона составляют 105–115 дБ•А, на расстоянии 1 м уменьшаются на 8–10, 2 м — на 13 и 3 м — на 15–16 дБ·А.

Уровень шума зависит от конструкции плазмотрона, давления плазмообразующего газа и других факторов, но практически всегда выходит за пределы допустимых норм (80 дБ).

Спектрограммы уровней звуковой мощности показывают, что шум имеет широкополосный характер с концентрацией основной энергии в области высокочастотных звуковых и низкочастотных ультразвуковых колебаний (4000–40 000 Гц), т. е. включает весь слышимый диапазон частот и переходит в ультразвуковую область.

Замеры показали, что суммарный уровень шума при обычной воздушно-плазменной резке превышает норму на 25–30 дБ•А, при резке листов, касающихся поверхности воды, — на 19–20 дБ•А, а при дополнительном использовании водяной завесы — на 10–12 дБ·А [14].

Только при резке с погружением плазмотрона и разрезаемого листа в воду на глубину 30–50 мм суммарный уровень шума находится в пределах допустимых норм — 80–82 дБ·А [28].

Таблица 20. Содержание вредных веществ в воздухе при воздушно-плазменной резке

Способ резки	Режим резки		Концентрация, мг/м^3		
	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	аэрозоля	оксида азота	озона
Обычная воздушно-плазменная резка	300	180	3,0–5,5	1,8–3,4	0,15–0,25
Воздушно-плазменная резка с водяной защитой	300	180	1,2–2,5	0,5–1,5	0,05–0,07

Примечание. Предельно–допустимая концентрация для аэрозоля, оксида азота и озона составляет соответственно 4; 2 и 0,1 мг/м^3

В спектре электромагнитных излучений плазменной дуги преобладают ультрафиолетовые (0,2–0,4 мкм) и инфракрасные (0,76–3,50 мкм) диапазоны. Наибольшую интенсивность ультрафиолетового излучения 7,5 Вт/м^2 отмечают при 0,22–0,29 мкм, что превышает допустимый уровень оптической облученности рабочего места в этом диапазоне частот на несколько порядков. Интенсивность инфракрасного излучения плазмы на расстоянии 0,5 м от среза сопла плазмотрона не превышает 1,4 кВт/м^2, однако тепловое излучение от нагретого металла составляет 3,5 кВт/м^2.

Ионизирующий эффект плазмы и ультрафиолетового излучения определяет высокие концентрации аэроионов: 1,1–108 эл. заряд./см^3 тяжелых положительно заряженных ионов и 6,0–108 отрицательных.

Использование водяной защиты, особенно технологии резки с погружением листов и плазмотрона в воду, позволяет практически полностью устранить вредное влияние электромагнитных излучений, ионизирующего эффекта и ультрафиолетового излучения плазмы на обслуживающий персонал.

Поскольку при резке с водяной защитой основные вредные вещества поглощаются водой, то представляет интерес оценка качества самой воды после такой обработки. В производственных условиях произвели отбор проб воды из раскроечного стола–ванны после двух месяцев интенсивной эксплуатации, где воду не меняли, а пополняли по мере испарения. Определяли следующие показатели воды: наличие

взвешенных веществ, концентрацию водородных ионов, общую жесткость, состав осадка.

Проба воды, взятая из раскроечного стола-ванны, после воздушно-плазменной резки малоуглеродистых сталей содержала хлопья, видимые взвешенные вещества, которые после отстоя в течение 30 мин осаждались на дно колбы. Осадок представлял собой обыкновенный шлам, в состав которого входили соли и оксиды железа (до 98%), кальция и марганца. Результаты проведенного анализа показали, что основные показатели пробы воды не отличаются от аналогичных характеристик, присущих технической воде, и соответствуют требованиям ГОСТ 4151–48. После механической фильтрации осадка вода пригодна к повторному использованию. Таким образом, наличие оборотной системы, оснащенной циркуляционным насосом и соответствующим фильтром, гарантирует экологическую чистоту процесса воздушно-плазменной резки с водяной защитой.

В тех случаях, когда использование по какой-то причине водяной защиты невозможно, должны быть выполнены требования по организации и оснащению рабочих мест для плазменной резки [29].

Средства технологического оснащения

Установки и рабочие места для плазменно–дуговой резки

Установка для плазменно-дуговой резки состоит из источника питания с аппаратурой управления процессом резки и плазмотрона, основными элементами которого являются электрод (катод) и сопло.

С точки зрения стабильности горения дуги и стабильности технологического процесса оптимальными внешними характеристиками источников питания плазмотронов являются крутопадающие или вертикальные [9]. Чем более пологой будет внешняя статическая характеристика, тем рез получается более узким книзу. Это объясняется тем, что углубление плазменной дуги в металл сопровождается увеличением напряжения и уменьшением силы тока, вследствие чего в нижних участках реза выделяется меньше теплоты.

Требуемые внешние статические характеристики могут быть обеспечены различными типами источников питания: выпрямителями, управляемыми дросселями насыщения, тиристорными выпрямителями с обратной связью по току, источниками питания на базе индуктивно–емкостных преобразователей, транзисторными источниками питания и др. [9].

Схемы управления установок автоматически осуществляют возбуждение дуги, плавное нарастание рабочего тока, снятие напряжения с плазмотрона при нарушениях его системы охлаждения, выключение установки при выходе из строя вентиляции.

Плазмотрон должен обеспечивать многократное надежное зажигание и стабильное горение плазменной дуги в диапазоне рабочих токов и напряжений. Элементы плазмотрона, наиболее подверженные действию теплоты (электрод, сопло), должны выдерживать длительную тепловую нагрузку при максимальной мощности плазмотрона. Электрическая изоляция между электродами и соплом должна быть рассчитана на максимальное напряжение, возникающее на дуговом промежутке при возбуждении дуги и ее обрыве. Элементы водяных и газовых коммуникаций плазмотрона (шланги, уплотнения, прокладки и пр.) должны выдерживать давление не ниже 1 МПа. Для обеспечения маневренности плазмотрона присоединяемые к нему шланги и электрические провода должны быть гибкими и прочными. Плазмотрон должен быть технологичным в изготовлении, ремонте и удобным в эксплуатации.

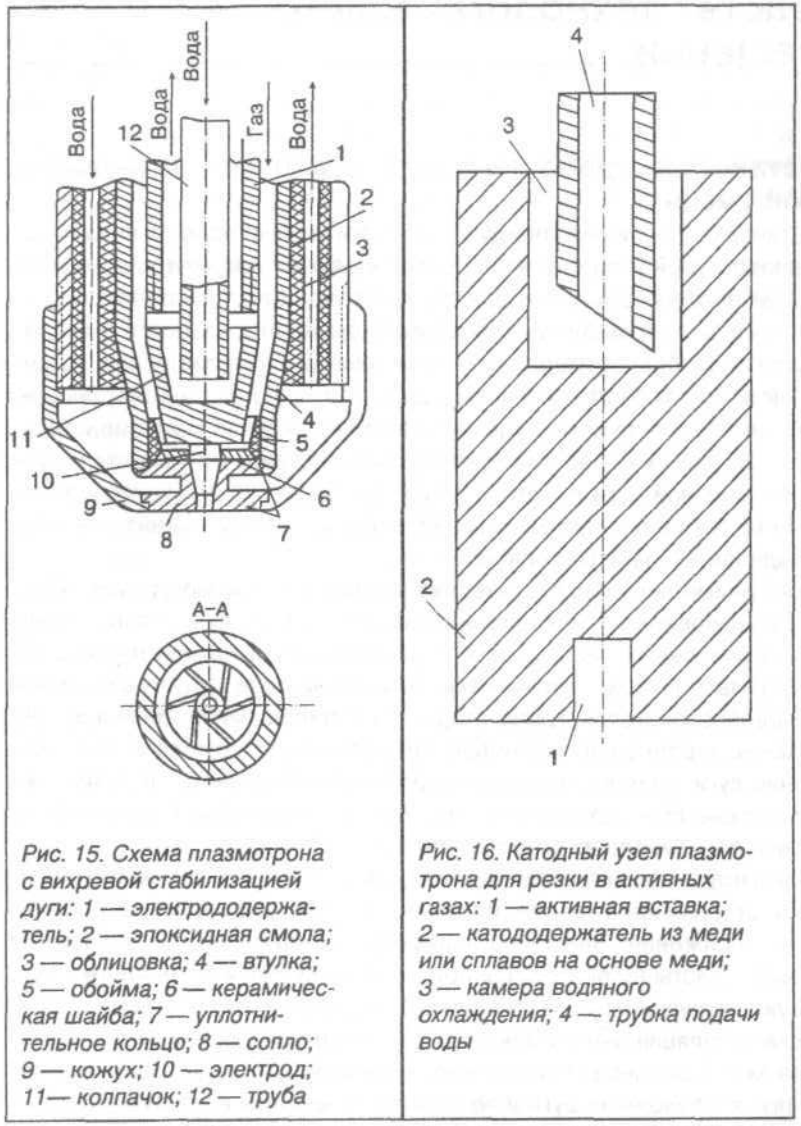


Рис. 15. Схема плазмотрона с вихревой стабилизацией дуги: 1 — электрододержатель; 2 — эпоксидная смола; 3 — облицовка; 4 — втулка; 5 — обойма; 6 — керамическая шайба; 7 — уплотнительное кольцо; 8 — сопло; 9 — кожух; 10 — электрод; 11— колпачок; 12 — труба

Рис. 16. Катодный узел плазмотрона для резки в активных газах: 1 — активная вставка; 2 — катододержатель из меди или сплавов на основе меди; 3 — камера водяного охлаждения; 4 — трубка подачи воды

Для плазменной резки в кислородосодержащих средах используют плазмотроны с вихревой стабилизацией дуги [7, 9]. Схема такого плазмотрона показана на *рис. 15* [6].

Катодный узел представляет собой катододержатель из меди или сплавов на основе меди с запрессованной заподлицо активной вставкой *(рис. 16)*.

В качестве активных вставок используют стержни диаметром 2 мм из циркония или гафния. Считается, что при относительно малых токах и низких плотностях тока применение катодов из циркония более предпочтительно в связи с более низкой стоимостью циркония [2].

Катоды из гафния имеют более высокую стойкость при повышенных токах и более высоких плотностях тока. На предельных для циркония токах (300–320 А) ресурс работы гафния при прочих равных условиях почти в два раза выше.

Следует, однако, подчеркнуть, что стойкость электродов при резке в производственных условиях колеблется в широких пределах — от 15 мин до 4 ч. Это связано с интенсивностью охлаждения. При плохой работе системы охлаждения электроды работают очень недолго. Но и при нормальном охлаждении некоторые электроды быстро выходят из строя. Этому в значительной степени способствует плохой натяг при запрессовке электрода. Устраняют указанный недостаток различными путями: соответствующей точностью механической обработки электрода и отверстия в колпачке, обработкой колпачка после запрессовки в него электрода (совместное сжатие) и др.

В последние годы разработан способ ударной сварки в вакууме, совмещающий процессы сварки и формовки электродов с термохимическими катодами из циркония и гафния [30]. При этом ресурс катодов стабилен и в 1,5–2,0 раза выше для всех испытанных образцов по сравнению с запрессованными электродами из циркония и гафния.

На срок службы электрода влияет также количество возбуждений дуги. Принято считать, что по величине износа каждое возбуждение дуги соответствует одной минуте ее горения.

По данным К. В. Васильева, увеличение содержания кислорода в плазме также сопровождается некоторым повышением интенсивности расхода катодов *(рис. 17)*.

В западных странах для резки в кислородосодержащих средах используют катоды повышенной стойкости системы LongLive [31]. Вариант таких катодов предусматривает закрепление гафниевого стержня во втулке из серебросо-

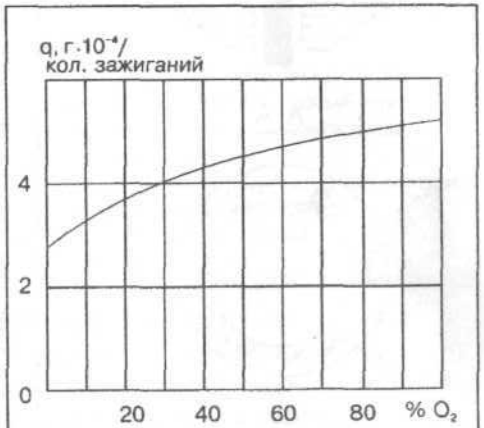


Рис. 17. Влияние содержания кислорода в азотосодержащих смесях на расход q термохимических катодов

держащего материала с высокой тепло- и электропроводностью и малым переходным сопротивлением. По сравнению с традиционными такие катоды имеют в 2–3 раза более высокую стойкость.

Сопло наряду с катодом является основным элементом плазмотрона. К главным характеристикам сопла относят диаметр отверстия, его высоту, геометрию теплопроводящей поверхности.

Теплофизический анализ работы различных материалов показал, что наилучшим материалом для сопла является медь. Иногда используют сопла с внутренним покрытием из вольфрама или других металлов.

Диаметр отверстия сопла для данной силы тока должен иметь такое минимальное значение, при котором обеспечивается надежная работа плазмотрона.

Оптимальные характеристики плазмотрона получают при длине канала формирующего сопла, равной его диаметру. При дальнейшем увеличении длины канала увеличивается вероятность двойного дугообразования.

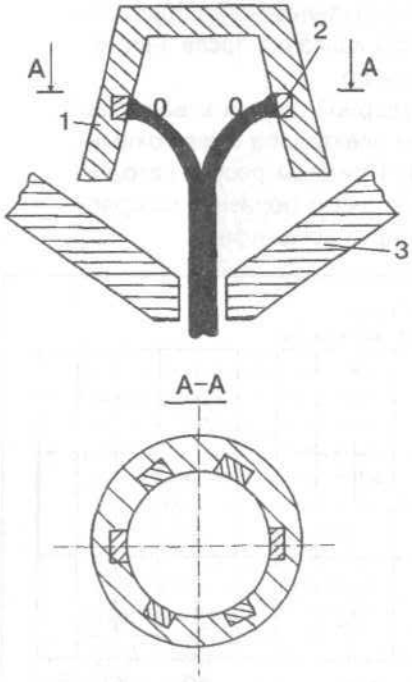


Рис. 18. Схема электрода с гафниевыми катодами по внутренней поверхности: 1 — корпус электрода; 2 — гафниевые катоды; 3 — сопло плазмотрона

Использование сопла в качестве промежуточного электрода для возбуждения дежурной дуги вызывает необходимость его изоляции от основного электрода (катода) плазмотрона.

В качестве изоляционных материалов применяют фторопласт Ф–4, капролон, эбонит, эпоксидную смолу холодного отвержения ЭД–5 с кремнийорганическим наполнителем, стеклонаполненные пресс-материалы, высокоглиноземистые керамические материалы и др.

В последние годы получают распространение плазмотроны, специально предназначенные для резки толстолистового металла. Так, в плазмотронах с расщеплением дуги используют электроды с несколькими термохимическими вставками *(рис. 18)*. На термохимических вставках фиксируют опорные пятна дуги, и при большой

суммарной силе тока вставка работает при относительно небольшой силе тока. Это обеспечивает увеличение стойкости электрода.

Плазмотрон РПТ–1, имеющий электрод с шестью гафниевыми вставками, допускает максимальную силу рабочего тока 1000 А и позволяет резать сталь толщиной до 150 мм, а медь — до 80 мм [7].

Плазмотрон П–23 с четырьмя термохимическими вставками работает на номинальной силе тока 500 А и позволяет резать металл толщиной 100 мм со скоростью 0,5 м/мин [35]. Отличительной особенностью плазмотрона с медным полым электродом является вращение дуги *(рис. 19)*.

Интенсивное перемещение опорного пятна дуги по сильно охлаждаемой внутренней поверхности электрода происходит под действием газового вихря, создаваемого тангенциальными отверстиями в завихрителе.

Плазмотрон ПВ–47 с медным полым катодом позволяет работать на силе тока 200–600 А при напряжении дуги 200–350 В и разрезать металлы и сплавы толщиной до 160 мм [7].

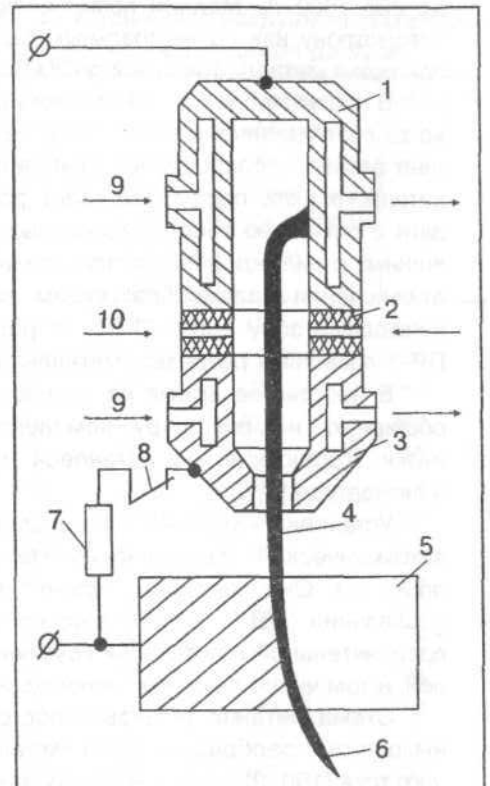


Рис.19. Схема плазмотрона с медным полым электродом: 1 — полый внутренний электрод; 2 — завихритель; 3 — сопловая часть; 4 — дуга; 5 — металл; 6 — струя плазмы; 7 — балластное сопротивление; 8 — контактор; 9 — подача охлаждающей воды; 10 — подача воздуха

В плазмотроне ПР–24 также используют медный полый электрод, разрядный канал которого выполнен ступенчатым с расширением в сторону выхода дуги [35]. Он имеет резьбовую нарезку и торцевое отверстие для подачи дополнительного газа, расход которого составляет 10% от расхода основного плазмообразующего газа. Подача дополнительного газа необходима для локализации катодной привязки дуги в области расширения канала. Посредством резьбовой нарезки расщепляют катодные пятна, предотвращая тем самым локальный нагрев и увеличивая ресурс работы электрода на токах

до 600–1000 А. Медный полый электрод позволяет надежно работать плазмотрону как на нейтральных, так и на кислородосодержащих газах при резке металла толщиной до 200 мм.

В плазмотроне ПР–1 мощность дуги повышают до 300 кВт не только за счет увеличения силы тока, но и напряжения, которое обеспечивает электроизолированная межэлектродная вставка [35]. Конструкция катодного узла предусматривает расщепление прикатодного участка дуги с помощью теплоэмиссионных вольфрамовых вставок, расположенных в цилиндрической полости медного катододержателя. Вставки от окисления плазмообразующим воздухом защищает поддуваемый в катодную зону аргон (2–3% от расхода рабочего газа). Плазмотрон ПР–1 позволяет разрезать металлы толщиной до 400 мм.

В настоящее время на рынках стран СНГ предлагают довольно обширную номенклатуру комплектных установок для плазменной резки. Характеристики установок предыдущих поколений освещены в литературе [6, 7, 9].

Установка «Киев–4М» предназначена для автоматической и полуавтоматической воздушно-плазменной резки металлов толщиной до 90 мм. Она состоит из источника питания, пульта дистанционного управления (ПДУ), водоохлаждаемых машинного и ручного резаков, соединительной и питающей коммуникаций, комплекта запасных деталей, в том числе сменных электродов.

Схема питания установки построена на трехфазном индуктивно-емкостном преобразователе и имеет три фиксированные ступени рабочего тока (100, 200 и 315 А) со ступенчатым автоматическим наращиванием до установленного значения. Резонансный режим работы обеспечивает стабилизацию установленного тока в рабочем диапазоне напряжения на дуге (130–200 В).

Современный рынок Украины широко представлен разнообразными установками для воздушно-плазменной резки [32, 33]. В табл. 21 приведены технические показатели отечественных и зарубежных установок с воздушным охлаждением плазменных резаков для воздушно-плазменной резки (ВПР) металлов толщиной до 30 мм.

Установки УВПР–0401, УВПР–0901 ОАО «Фирма СЭЛМА» оснащены датчиками температуры с индикацией на передней панели, обеспечивающими отключение при максимальном нагреве силовых узлов, датчиками давления воздуха, влагоотделителями, редукторами и манометрами, легкими и удобными плазмотронами с воздушным охлаждением фирмы «Бинцель».

Установки УВПР–0401, УВПР–0901, «Карат–60» фирмы «Енагро-Торец» (Константиновка), «Airjet–100» фирмы «Castolin» (Швейцария),

Таблица 21. Техническая характеристика установок с воздушным охлаждением плазменных резаков для ВПР металлов толщиной до 30 мм

Установка	Потребляемая мощность, кВт	Сила номинального тока, А	Период работы, ПВ%	Максимальная толщина резки стали и алюминия, мм	Расход воздуха при давлении 0,4–0,6 МПа, л/мин	Масса, кг
УПВР–0401	9	40	40	5	120	40
УПВР–0901	16	90	40	30	150	125
«Карат–60»	8	60	35	10	200	80
«Карат–100М»	32	100	100	25	210	200
Airjet–60	9	60	35	15	130	18
Airjet–100	16	100	35	30	180	28
LPE–50	10	50	35	15	130	90
LPE–100	30	100	60	30	180	185
«Дуплекс–1»	2–5	30	60	10	40	25
«Дуплекс–2»	3–10	90	60	25	50	110
PC60	—	60	35	18	—	16
PC100	—	100	35	35	—	26
Powermax 350	—	25	35	10	127	20
Powermax 600	—	40	50	16	170	21
Powermax 900	—	55	50	22	170	30
Powermax 1100	—	80	50	25	189	35
MAX 100	—	100	80	32	208	190

LPE–50 фирмы «ESAB» (Германия), PC60, PC100 фирмы «Линкольн» (США), Powermax 350 фирмы «Гипертерм» (Германия) обеспечивают резку максимальных толщин металла на форсированных режимах при малой продолжительности включения (ПВ=35...40% при цикле 10 мин). В установках «Дуплекс–1», «Дуплекс–2» НПМГ «Плазмотрон» (Киев), «Карат–100М» фирмы «Енагро-Торец» (Константиновка), MAX 100 фирмы «Гипертерм» (Германия) максимальная толщина резки обеспечивается при ПВ=60...100%. Установки «Дуплекс–1» и «Дуплекс–2» позволяют также производить сварку штучными электродами и неплавящимся вольфрамовым электродом на токе 30–160 А. Установки PC60, PC100, Powermax 350 оснащены инверторными источниками питания и имеют оптимальные характеристики по массе.

Техническая характеристика установок для плазменной резки металлов толщиной до 60 мм приведена в табл. 22.