**Тепловые процессы при дуговой сварке**

**Сварочная дуга как источник нагрева**

Сварочная дуга является мощным концентрированным источником теплоты. Электрическая энергия, потребляемая дугой, в основном превращается в тепловую энергию. Выделение тепловой энергии происходит в анодном и катодном активных пятнах и дуговом промежутке. При нагреве детали наибольшей интенсивности тепловой поток дуги достигает в центральной зоне активного пятна (рис. 1). По мере удаления от центра пятна интенсивность теплового потока убывает. Распределение теплоты вдоль дугового промежутка происходит в соответствии с падением напряжения в его областях.

*Рис. 1. Удельный тепловой поток при нагреве дугой: а - при сварке покрытым электродом, б - при сварке под слоем флюса.*

**Полная тепловая мощность дуги** Q (Дж/с) зависит от силы сварочного тока Iсв (А) и напряжения дуги Uд (В): Q = Iсв Uд. Однако не вся теплота дуги затрагивается на расплавление металла, т.е. на собственно сварку. Значительная часть ее расходуется на теплоотдачу в окружающую среду, расплавление электродного покрытия или флюса, разбрызгивание и т.п. Характер распределения полной тепловой мощности по отдельным статьям расхода определяют термином «тепловой баланс дуги». На рис. 2 показаны схемы тепловых балансов дуги при ручной сварке покрытыми электродами и сварке под флюсом. Часть общей тепловой мощности дуги, расходуемой непосредственно на нагрев и расплавление основного и присадочного металлов, называют эффективной тепловой мощностью дуги q (Дж/с). Она всегда меньше полной тепловой мощности дуга. Эффективная тепловая мощность сварочной дуги представляет собой количество теплоты, введенное дугой в свариваемую деталь в единицу времени. Она определяется уравнением q = Iсв Uд h, h - где коэффициент полезного действия дуги, представляющий собой отношение эффективной тепловой мощности к полной тепловой мощности дуги. Эффективная тепловая мощность зависит от способа сварки, материала электрода, состава покрытия или флюса и ряда других факторов.

*Рис. 2. Тепловой баланс при сварке: а - покрытыми электродами, б - подслоем флюса*

Данные значений для различных способов сварки приведены на табл. 1. Данные рис. 2 и табл. 1 показывают, что теплота дуги наиболее рационально используется при автоматической сварке под флюсом.

1. Значения h для различных способов сварки

|  |  |
| --- | --- |
| Способ сварки | Значение h |
| В защитном газе вольфрамовым электродом | 0,6 |
| Покрытым электродом | 0,75 |
| Под флюсом | 0,8 - 0,9 |

**Плавление металла электрода и его перенос в дуге при сварке**

Нагрев и плавление электрода осуществляются за счет энергии, выделяемой в активном пятне, расположенном на его торце, и теплоты, выделяющейся по закону Ленца - Джоуля, при протекании сварочного тока по вылету электрода. Вылетом называют свободный участок электрода от места контакта с токопроводом до его торца. В начальный момент ручной дуговой сварки вылет электрода составляет 400 мм и изменяется по мере плавления электрода, при автоматической сварке он равен 12 - 60 мм. Расплавляясь в процессе сварки, жидкий металл с торца электрода переходит в сварочную ванну в виде капель разного размера. За 1 с может переноситься от 1 - 2 до 150 капель и более в зависимости от их размера. Независимо от основного положения сварки капли жидкого металла всегда перемещаются вдоль оси электрода по направлению к сварочной ванне. Это объясняется действием на каплю разных сил в дуге. В первую очередь к ним относятся гравитационная сила, электромагнитная сила, возникающая при прохождении по электроду сварочного тока, сила поверхностного натяжения, давление образующихся внутри капли газов, которые отрывают ее от электрода и дробят на более мелкие капли.

Гравитационная сила проявляется в стремлении капли перемещаться по вертикали сверху вниз.

Сила поверхностного натяжения обеспечивает капле сферическую форму. Электромагнитные силы играют важнейшую роль в отрыве и направленном переносе капель к сварочной ванне при сварке швов в любом пространственном положении. Электрический ток, проходя по электроду, создает вокруг него магнитное поле, оказывающее сжимающее действие. Сжатие расплавленной части электрода приводит к образованию шейки у места перехода к твердому металлу (рис. 3). По мере уменьшения ее сечения и возрастания плотности тока жидкий металл формируется и отделяется в виде сферической капли.

*Рис. 3. Схема сжимающего действия электромагнитных сил на жидкую каплю электродного металла*

При этом капля за счет действия электромагнитной силы приобретает направленность движения к сварочной ванне. Сила внутреннего давления газов также участвует в переносе капли. Расплавленный металл на электроде сильно перегрет. Образующиеся в нем газы способствуют отрыву его от торца электрода и могут раздробить на более мелкие капли.

При дуговой сварке плавящимся электродом различают три типа переноса электродного металла: крупнокапельный, мелкокапельный, или струйный, и перенос с образованием коротких замыканий дуги.

Характер переноса капель с электрода в сварочную ванну зависит от силы сварочного тока и напряжения дуги.

Установлено, что с увеличением силы тока размер капель уменьшается, а число их, образующихся в единицу времени, возрастает. С увеличением напряжения дуги, наоборот, размер капель увеличивается, а число их уменьшается. Так, при сварке голой проволокой на малых токах (плотностях) жидкий металл переходит в сварочную ванну в виде крупных капель с кратковременными замыканиями дугового промежутка, а при сварке покрытыми электродами и под флюсом на обычных плотностях тока - в виде мелких капель без замыкания дугового промежутка. При сварке в защитных газах и под флюсом тонкой проволокой на повышенных плотностях тока наблюдается мелкокапельный (струйный) перенос металла. В этом случае очень мелкие капли образуют сплошную коническую струю жидкого металла, переходящего в шов также без коротких замыканий, что уменьшает разбрызгивание металла и улучшает формирование швов.

**Производительность процесса дуговой сварки**

Производительность процесса дуговой сварки оценивают по количеству проплавленного в единицу времени основного металла Gпр и количеству наплавленного металла Gн, определяемого как избыток массы конструкции после сварки по сравнению с массой до сварки.

При сварке неплавящимся электродом соединений встык или с отбортовкой без присадочной проволоки важно обеспечить производительность проплавления, а при сварке плавящимся электродом - производительность проплавления и наплавки. При сварке плавящимся электродом производительность оценивают по количеству наплавленного электродного металла, определяемого по формуле Gн = aн\*Iсв\*tо, где Iсв - сила тока, A; tо - основное время сварки (время чистого горения дуги), ч; aн- коэффициент наплавки, г (А\*ч).

**Коэффициент наплавки** выражается отношением массы металла, наплавленного за единицу времени горения дуги, к единице силы сварочного тока. Обычно его представляют количеством наплавленного в течение 1 ч электродного металла (г), приходящимся на 1 А сварочного тока. При сварке покрытыми электродами коэффициент наплавки составляет 6 - 12, под флюсом – 10 - 16, в углекислом газе - 12 - 20, при электрошлаковой - 18 - 22 г/(А\*ч).

Производительность наплавки (Gн связана с производительностью расплавления электродной проволоки: Gн = aр\*Iсв\*tо, где aр - коэффициент расплавления электродной проволоки, г/(А\*ч).

**Коэффициент расплавления** выражают отношением массы электрода, расплавленного за единицу времени горения дуги, к единице силы сварочного тока. Обычно его представляют количеством расплавленного металла электрода в течение 1 ч, приходящимся на 1 А сварочного тока. Скорость расплавления электродного металла в значительной степени определяет производительность и эффективность процесса сварки, а коэффициент расплавления зависит от ряда факторов, определяющих условия сварки: рода и силы тока, полярности, напряжения дуга, состава и толщины покрытия электрода или флюса. Коэффициент расплавления при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов заметно изменяется с изменением полярности тока и состава газа. При увеличении сварочного тока, как правило, коэффициент расплавления возрастает. Особенно это заметно при больших плотностях тока, применяемых при механизированной и автоматической сварке. В большинстве случаев при сварке коэффициент ан меньше коэффициента ар на величину потерь электродного металла, возникающих за счет угара и разбрызгивания. Эта часть металла, не участвующая в образовании шва, характеризуется коэффициентом потерь а, который выражают в процентах:

Коэффициент потерь зависит от способа сварки, типа электрода и параметров режима. На потери значительное влияние оказывает характер капельного переноса электродного металла в дуге при сварке. Так, при сварке покрытыми электродами он составляет 5 - 10%, под флюсом – 1 - 5, .в защитных газах – 1 - 5%. В тех случаях, когда в составе электродных покрытий или наполнителе порошковой проволоки содержится значительное количество металлических составляющих, коэффициент а может иметь положительную величину, т.е. aн будет больше aр.

**Общие сведения о нагреве металла при сварке**

Нагревание металла в сварном соединении при дуговой сварке определяется эффективной тепловой мощностью дуги и распределением выделяемой теплоты на поверхности и в объеме детали. Наибольшей интенсивности тепловой поток сварочной дуги достигает в центральной зоне активного пятна, где вследствие электронной и ионной бомбардировки происходит непосредственное выделение теплоты в поверхностных слоях металла. В пограничных с активным пятном областях металл нагревается в основном за счет лучистого обмена со столбом дуги и конвективного обмена с горячими газами дуги. По мере удаления от центра пятна интенсивность теплового потока убывает (см. рис. 1). Из приведенных данных видно, что тепловой поток дуги при сварке под флюсом является более сосредоточенным, чем при ручной дуговой сварке. Знание о распространении теплоты при сварке имеет важное значение для изучения процессов, связанных с нагревом металла при всех видах сварки.

Распространение теплоты в основном металле происходит за счет теплопроводности. В начальный момент сварки поступление теплоты в металл от дуги превышает его теплоотвод от места нагрева. При этом температура металла в точках, находящихся на определенном расстоянии от дуги, непрерывно повышается. Такое состояние металла в сварном соединении рассматривается как неустановившийся тепловой режим. По прошествии некоторого времени наступает равновесие между количеством теплоты, поступающей от источника нагрева, и теплоты, отводимой в изделие. При этом температура металла в точках, находящихся на определенных расстояниях от дуги, остается неизменной. Тепловое состояние металла достигает определенной стабильности и характеризуется как установившийся тепловой режим.

Схематическое изображение теплового состояния металла в сварном соединении обычно производят с помощью системы изотерм - линий, соединяющих точки с одинаковой температурой. Семейство таких изотерм для определенных условий сварки рассматривается как температурное поле в нагреваемом металле. В свою очередь, по отношению к нагреваемому металлу источники теплоты делятся на неподвижные и подвижные, перемещающиеся с определенной скоростью. Для сварочных условий наиболее характерным является применение подвижных источников нагрева.

**Нагрев основного металла подвижным источником**

В качестве подвижного источника теплоты принимается источник определенной тепловой мощности, перемещающийся прямолинейно и равномерно, т.е. с постоянной скоростью. При неподвижном источнике нагрева (рис. 4) тепловое поле в металле характеризуется системой концентрических изотерм с общим центром. При подвижном источнике нагрева изотермы приобретают вытянутую форму и перемещаются в направлении его движения.

Процесс распространения теплоты в металле зависит от ряда факторов: эффективной тепловой мощности дуги, характера ее перемещения, размера и формы свариваемого изделия, теплофизических свойств материала. Изменение этих факторов определенным образом влияет на нагрев изделия, что можно оценить по изменению формы изотерм температурного поля (рис. 5). Так, с увеличением мощности дуги области металла, нагретые до определенных температур, увеличиваются (рис. 5, а). Увеличение скорости перемещения дуги приводит к уменьшению таких областей, а соответствующие изотермы сужаются в направлении, перпендикулярном оси шва, и сгущаются впереди дуги (рис. 5, б).

*Рис. 4. Характер изотерм при разных условиях нагрева: а - неподвижный источник, б - подвижный источник.*

*Рис. 5. Характер тепловых полей при разных мощностях дуги:а - сварочный ток 200А. б- сварочный ток 400А*

Из основных теплофизических свойств металла наиболее сильное влияние на характер распределения температур оказывает теплопроводность. На рис. 6. показаны температурные поля в пластинах из металлов с разными теплофизическими свойствами, построенные при одинаковых режимах сварки. Области, нагретые выше определенной температуры, в хромоникелевой стали имеют большие размеры, чем в низкоуглеродистой, что объясняется меньшей теплопроводностью хромоникелевой стали. В связи с высокой теплопроводностью алюминия и меди происходит значительное уменьшение площади областей, нагретых до одинаковых температур, по сравнению со сталями. А сами изотермы укорачиваются; по очертаниям приближаясь к форме окружности, и смещаются в область впереди источника нагрева.

*Рис. 6. Характер тепловых полей при сварке разных металлов: а - низкоуглеродистая сталь, б - аустенитная высоколегированная сталь, в - алюминий, г - медь*

 В зависимости от формы и размеров изделия в настоящее время разработаны методики и расчетные схемы процесса-нагрева металла при сварке, позволяющие расчетным путем определять температуру в точках теплового поля сварного соединения в зависимости от свойств свариваемого металла и условий его сварки.

**Формирование сварочной ванны**

Образование сварочной ванны является важнейшим этапом получения соединения при сварке плавлением. От формы и размеров сварочной ванны зависят форма и размеры сварных швов. Последние во многом определяют эксплуатационные характеристики получаемых соединений.

Форму и размеры сварочной ванны определяют границами изотермической поверхности объемного теплового поля, соответствующие температуре плавления металла Тпл. Однако такой подход является несколько идеализированным, поскольку формирование объема расплавленного металла учитывает лишь эффект распространения теплоты в глубь металла за счет теплопроводности. В реальных условиях сварки сварочная ванна формируется под действием целого ряда сил, действующих в ней, в первую очередь силы тяжести жидкого металла, поверхностного натяжения его и давления самого источника нагрева. Дуга, обеспечивающая местный нагрев и расплавление кромок соединяемых элементов, оказывает на расплавленный металл давление, за счет которого он вытесняется из передней части ванны, т. е. из области с наибольшей интенсивностью нагрева в ее хвостовую часть. Это ведет к уменьшению толщины жидкой прослойки под дугой и создает условия для углубления ванны. В результате изменяются очертания зоны расплавления (рис. 7). Давление на расплавленный металл определяется разностью его уровней h в ванне. Изменение условий сварки, в свою очередь, существенно отражается на формировании сварочной ванны, соотношении ее геометрических размеров. Так, увеличение эффективной тепловой мощности, сосредоточенности источника, увеличение давления дуги ведут к увеличению глубины проплавления и уменьшению ширины. При этом ванна удлиняется.

*Рис. 7. Параметры формы сварочной ванны*

Важным фактором, влияющим на геометрические параметры ванны, является пространственное расположение выполняемых швов. При сварке изделий в наклонном положении на подъем (перемещение ванны снизу вверх) глубина проплавления возрастает, при сварке на спуск (перемещение ванны сверху вниз) - снижается (рис. 8, б). В первом случае жидкий металл перетекает в хвостовую часть ванны, уменьшая толщину жидкой прослойки под дугой, во втором случае, наоборот, он затекает в головную часть ванны и толщина прослойки увеличивается.

*Рис. 8. Формирование сварочной ванны при разных положениях сварки: а - вертикальном, б - наклонном, в - потолочном, г - горизонтальном.*



При сварке в вертикальном положении (рис. 8, а) процесс можно вести сверху вниз (на спуск) и снизу вверх (на подъем). В обоих случаях сила тяжести направлена вниз. При сварке на подъем сварочная ванна удерживается только силой поверхностного натяжения. При этом глубина проплавления резко возрастает. Для удержания расплава приходится ограничивать тепловую мощность дуги и размеры ванны. При сварке на спуск удержанию жидкого металла способствует давление дуги, а глубина проплавления уменьшается.

При сварке в потолочном положении (рис. 8, в) сварочная ванна удерживается силами поверхностного натяжения и давлением источника нагрева. Для удержания ванны в потолочном положении также необходимы меры по ограничению ее объема. Особенно неблагоприятные условия формирования ванны создаются при выполнении горизонтальных швов (рис. 8, г). Расплавленный металл натекает на нижнюю кромку. Это приводит к образованию несимметричной выпуклой формы шва, а также подрезов. Требование к сокращению размеров сварочной ванны в этом случае особенно жесткое.

Важным фактором, влияющим на работоспособность сварных соединений и также связанным с образованием сварочной ванны, является формирование проплавления корня шва. На рис. 9 показаны силы, действующие на ванну. Ванна удерживается на весу силой поверхностного натяжения Рп.

*Рис. 9. Схема формирования противления сварного шва: r1, - радиус кривизны в поперечном сечении шва, r2 - то же, в продольном сечении*

Поверхностное натяжение уравновешивает давление Pд, оказываемое на ванну дугой, и металлостатическое давление Pм = h v, определяющееся разницей уровней h и плотностью расплавленного металла v.

Условие равновесия ванны в положении на весу можно записать так: Pд + Pм = С (1/ r1 + 1/ r2) где С- поверхностное натяжение расплавленного металла.

Из этой формулы следует, что удержание ванны облегчается при уменьшении радиуса кривизны проплава, определяющегося его размерами в поперечном r1 и продольном r2 сечениях. С увеличением ширины и протяженности ванны возрастают радиусы кривизны поверхности жидкого металла в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В момент достижения одним из радиусов величины, большей критической, металлостатическое давление расплавленного металла и сила давления дуги превысят силу поверхностного натяжения, удерживающую сварочную ванну. Произойдет разрыв поверхностного слоя в корне шва, и жидкий металл вытечет из ванны, образуя прожог. Особенно часто это наблюдается при сварке металла малой толщины, когда сварочная ванна по ширине значительно превышает толщину свариваемого металла. Наиболее распространенной мерой предупреждения прожогов и обеспечения формирования проплава требуемой формы является правильный выбор сварочных режимов и применение сварочных подкладок.

**Параметры режима дуговой сварки и их влияние на форму и размеры сварочной ванны**

К основным параметрам дуговой сварки относятся сила сварочного тока Iсв, напряжение дуги Uд, скорость сварки Vсв. Помимо того, условия сварки зависят от ряда дополнительных факторов: диаметра электрода, рода и полярности тока, положения электрода по отношению к ванне и др.

Сила сварочного тока в наибольшей степени определяет тепловую мощность дуги. При постоянном диаметре электрода с увеличением силы тока возрастает концентрация тепловой энергии в пятне нагрева, повышается температура газовой среды столба дуги, стабилизируется положение активных пятен на электродах. С увеличением силы тока дуги возрастают длина сварочной ванны, ее ширина и особенно глубина проплавления. В определенных пределах изменения силы тока глубина проплавления сварочной ванны может быть оценена зависимостью, близкой к линейной:

Н = k\*Iсв, где к - коэффициент, зависящий от рода тока, полярности, диаметра электрода, степени сжатия дуги и др.

С увеличением напряжения дуги также возрастает тепловая мощность, а следовательно, и размеры ванны. Наиболее интенсивно увеличиваются ширина и длина ванны. При постоянной силе тока повышение напряжения дуги незначительно сказывается на глубине проплавления. Путем медленного уменьшения длины дуги и соответственно напряжения ее можно подойти к процессу сварки погруженной дугой.

Изменение скорости сварки при постоянной тепловой мощности дуги заметно сказывается на размерах сварочной ванны и шва. С повышением скорости уменьшаются глубина проплавления и ширина ванны, а длина несколько увеличивается.

Важным параметром дуговой сварки является погонная энергия, представляющая отношение эффективной тепловой мощности дуги к скорости ее перемещения (скорости сварки). Этот параметр является обобщающим по отношению к основным параметрам сварочного режима и может быть представлен формулой:

Погонная энергия характеризует тепловложение в сварное соединение и представляет количество тепловой энергии, вводимое на единицу длины однопроходного шва. Этот параметр очень важен для оценки воздействия термического цикла сварки на основной и наплавленный металл шва. При постоянной погонной энергии повышение скорости сварки вызывает увеличение термического КПД процесса, что связано с возрастанием глубины проплавления и уменьшением ширины сварочной ванны.

Дополнительными параметрами, определяющими условия сварки и особенности горения дуги, являются диаметр электрода, род тока и др. Например, при постоянной силе тока диаметр электрода определяет плотность энергии в пятне нагрева и Подвижность дуги. При неизменном значении погонной энергии Можно изменять диаметр электрода, род тока и полярность, использовать колебания электрода или наклон его к поверхности изделия и др. Эти особенности процесса, в свою очередь, сказываются на формировании ванны и конечных размеров швов.