

## Раздел 6. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ.

### 6.5. Кристаллизация металла шва.

**Кристаллизация сварочной ванны.** Металл сварочной ванны при кристаллизации находится одновременно под воздействием теплоты сварочной дуги и холодного нерасплавленного металла детали. Дуга вводит теплоту, окружающий металл отводит теплоту.

При переходе металла из жидкого состояния в твердое образуются кристаллы. Такой процесс называют кристаллизацией. Кристаллизация сварного шва идет непрерывно в течение сварочного процесса – расплавления основного и присадочного металлов.

Сварной шов имеет структуру литого металла. В процессе сварки расплавляются кромки основного металла и электродная проволока, непрерывно подаваемая в сварочную ванну (рис. 6.2). Сварочная ванна может быть условно разделена на две части: переднюю (головную) 1 и хвостовую 2. В передней части происходит плавление, а в хвостовой – кристаллизация и формирование сварного шва. Различают первичную и вторичную кристаллизацию.

*Первичной кристаллизацией* называется переход металла из жидкого состояния в твердое, в результате чего образуются кристаллы.

Вначале каждый кристаллик, образовавшийся в жидком металле, растет свободно и имеет правильную геометрическую форму. Одновременно развиваются и другие кристаллы. Когда они, увеличиваясь, начинают соприкасаться друг с другом, их правильная форма нарушается, они приобретают округленную форму в виде зерна. Такие кристаллы принято называть зернами.

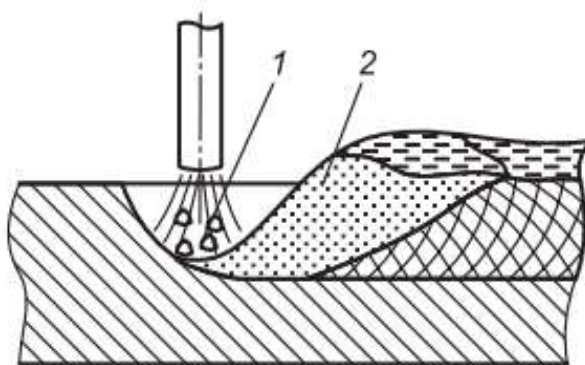
В зависимости от того как протекал процесс кристаллизации, зерна могут быть крупными, видимыми невооруженным глазом, и мелкими, которые можно рассмотреть только с помощью микроскопа.

Кристаллическое строение металла или сплава называют *структурой*. Строение металлов, видимое невооруженным глазом или в лупу, называют *макроструктурой*, строение же металлов, которое можно увидеть только с помощью микроскопа, называют *микроструктурой*.

Кристаллизация сварных швов отличается от кристаллизации слитков высокими скоростями, поскольку после интенсивного нагрева сварочной ванны происходит быстрый отвод теплоты в свариваемое изделие.

Процесс кристаллизации происходит в отдельных тонких слоях. После образования первого кристаллизационного слоя наблюдается некоторая задержка охлаждения металла из-за выделения скрытой теплоты его

кристаллизации. В дальнейшем начинает кристаллизоваться второй слой и т.д. до полного затвердевания сварочной ванны. Толщина кристаллизационных слоев лежит в пределах от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров и зависит от объема сварочной ванны и условий теплоотвода. Столбчатые кристаллы каждого последующего слоя являются продолжением кристаллов предыдущего слоя. Таким образом, образующиеся кристаллы как бы перерастают из слоя в слой.



**Рис. 6.2. Строение сварочной ванны**

Для первичной кристаллизации жидкого металла необходимо образование центров кристаллизации (зародышей) и их непрерывный рост. В начале кристаллизации центрами ее являются оплавленные зерна основного металла, находящиеся на дне сварочной ванны. В процессе кристаллизации, кроме центров в виде растущих кристаллов, могут появиться и новые центры кристаллизации – как самопроизвольно возникающие из жидкости, так и в виде отдельных тугоплавких частиц, обломков зерен и т.п. При многослойной сварке центрами кристаллизации являются поверхности кристаллов предыдущего слоя. Рост кристаллов происходит в результате присоединения к их поверхности отдельных частиц (атомов) из окружающего расплава. Каждый кристалл, растущий от отдельного зерна на границе сплавления, представляет собой группу совместно растущих элементарных столбчатых кристаллов, сросшихся одним концом с общим основанием, т.е. с оплавленным зерном основного металла. В зависимости от формы и расположения кристаллов затвердевшего металла различают зернистую, а также столбчатую и дендритную (древовидную) структуры.

При зернистой структуре зерна не имеют определенной ориентировки, а по форме напоминают многогранники. Такая структура обычно характерна для основного металла, а также для металла сварного шва, выполненного покрытыми электродами, при его быстром охлаждении. В случае столбчатой и дендритной структур зерна вытянуты в одном направлении. Причем в столбчатой структуре они имеют компактную форму, а в дендритной – ветвистую, елочную. Дендриты обычно располагаются в столбчатых зернах,

являясь их основой. Такие структуры шов имеет при медленном охлаждении, т.е. при сварке под флюсом и электрошлаковой сварке.

Направление роста кристаллов связано с интенсивностью отвода теплоты от ванны жидкого металла. Кристаллы растут перпендикулярно к границе сплавления в направлении, противоположном направлению отвода теплоты. Кристаллизация шва с глубоким проваром без теплоотвода снизу формирует дендриты, растущие навстречу друг другу, в результате чего по оси шва в стыке кристаллов из-за плохого срастания концов дендритов образуется полость слабины, где могут возникнуть шлаковые и газовые включения. При кристаллизации же широкого шва с теплоотводом снизу дендриты изгибаются вверх, оттесняя в его верхнюю часть неметаллические включения и обеспечивая свободный выход шлаков и газов на поверхность.

Большой объем сварочной ванны и малая скорость охлаждения обеспечивают увеличение размеров кристаллов, что снижает механические свойства шва. Образованием столбчатых кристаллов заканчивается процесс первичной кристаллизации сварочной ванны.

При сварке сталей на железной основе кристаллы имеют аустенитную структуру, представляющую собой твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе. С дальнейшим понижением температуры происходят аллотропические превращения, которые проявляются в переходе  $\gamma$ -железа, имеющего гранцентрированную кубическую решетку, в  $\alpha$ -железо, имеющее объемно-центрированную кубическую решетку. Это сопровождается изменением строения металла за счет появления новых образований в пределах первичных столбчатых кристаллов. Кристаллы, имеющие структуру аустенита, распадаются, образуя механическую смесь почти чистого  $\alpha$ -железа (феррита) и карбида железа  $Fe_3C$  (цементита). Такое явление называется вторичной кристаллизацией или перекристаллизацией.

**Особенности кристаллизации сварочной ванны.** Рассмотрим отличительные особенности кристаллизации сварочной ванны при ручной дуговой сварке.

-Источник теплоты при сварке перемещается вдоль соединяемых кромок, а вместе с ним движется сварочная ванна. Столб дуги, расположенный в головной части ванны, оказывает давление на поверхность расплавленного металла за счет ударов заряженных частиц, давления газов и магнитного дутья дуги. Давление приводит к вытеснению жидкости металла из-под основания дуги и погружению столба дуги в толщу основного металла. Жидкий металл, вытесненный из-под дуги, по мере ее передвижения отбрасывается в хвостовую часть сварочной ванны. При удалении дуги отвод теплоты начинает преобладать над притоком и начинается затвердевание – кристаллизация сварочной ванны. В процессе затвердевания по границе

расплавления образуются общие кристаллы, что и обеспечивает монолитность соединения.

-Сварочная ванна имеет малый объем (1–3 см<sup>3</sup>), который зависит от основных параметров режима сварки. Это вызывает интенсивный отвод теплоты в прилегающий холодный металл, что обуславливает высокую скорость кристаллизации металла ванны.

-Расплавленный металл сварочной ванны сильно перегревается и интенсивно перемешивается. Температура сварочной ванны при сварке сталей достигает 1800– 2200 °С. Кристаллизация сварочной ванны начинается в основном от готовых центров кристаллизации – частично оплавленных зерен основного металла. Металл шва имеет столбчатое строение, так как состоит из вытянутых (столбчатых) кристаллов, растущих при кристаллизации в направлении, противоположном теплоотводу.

**Формирование свойств металла шва.** Свойства металла определяются его составом и структурой. Структура литого металла, как правило, хуже структуры деформированного свариваемого основного металла. Наиболее эффективным средством улучшения свойств металла сварного шва является придание ему соответствующего химического состава.

Регулирование химического состава металла шва достигается с помощью сварочных материалов (обмазок электродов, сварочной проволоки и др.).

Металл сварного шва представляет собой сплав свариваемого (основного) и присадочного металлов.

На соотношение между основным и присадочным металлами в сварном шве влияют способ сварки, объем наплавленного металла, скорость сварки и др. Так, например, при ручной дуговой сварке количество основного металла в металле сварного шва составляет 30–40%, а электродного металла 60–70%.

**Модифицирование металла шва.** С целью улучшения механических свойств металла шва производят его *модифицирование* – введение в сварочную ванну малых добавок веществ, которые способствуют измельчению зерен металла шва, практически без изменения его химического состава. Такие добавки называют *модификаторами*. В качестве модификаторов для стали используются титан, алюминий, ванадий, цирконий и др.

Процесс модифицирования заключается либо в образовании в металле шва большого количества мелких, рассеянных (дисперсных) включений, являющихся дополнительными центрами кристаллизации, либо в обволакивании растущих в жидкости кристаллов поверхностно активными пленками, создающими барьер между кристаллом и жидкостью и

препятствующими росту кристалла. В обоих случаях в результате кристаллизации появляется мелкозернистая структура.

**Зональная и дендритная ликвация в металле шва.** *Ликвацией* называют неравномерное распределение составляющих сплава, приводящее к неоднородности его химического состава. Ликвация обусловлена наличием в металле шва легирующих элементов и примесей (серы, фосфора, углерода и др.), не растворимых в нем или обладающих ограниченной растворимостью при температуре затвердевания.

*Зональная макроскопическая ликвация в металле шва* характеризуется различным химическим составом периферийной и центральной его частей. Обусловлено это тем, что металл периферийных зон шва, затвердевающий в первую очередь, содержит минимальное количество ликвирующих примесей. Содержание же примесей в оставшемся жидком расплаве возрастает. По мере роста кристаллов расплав обогащается примесями, имеющими низкую температуру затвердевания. Они оттесняются к середине шва, поэтому центральная его часть оказывается наиболее загрязненной примесями; здесь возникает так называемая зона слабины шва. Ее можно обнаружить в однопроходных швах большого сечения.

*Дендритная (внутрикристаллическая) микроскопическая ликвация* характеризуется неоднородностью химического состава отдельных составляющих кристаллов. Это обусловлено тем, что при затвердевании металла шва первые кристаллы, образующие оси, а затем ветви дендритов содержат меньше примесей, чем исходный жидкий расплав. По мере роста осей и ветвей дендрита расплав обогащается примесями, и образовавшийся кристалл оказывается неоднородным по химическому составу: центральные части дендрита состоят из наиболее чистого твердого раствора, а междендритные пространства и особенно пограничные зоны его наиболее загрязнены.

Увеличение скорости охлаждения металла шва вызывает сокращение длительности пребывания металла сварочной ванны в двухфазном состоянии и сглаживание разницы между составом твердой и жидкой фаз, в результате чего дендритная ликвация менее заметна.

Процессы ликвации зависят также от температуры начала и конца кристаллизации. Чем больше этот температурный интервал, тем интенсивнее процессы ликвации. Так, для малоуглеродистой стали температурный интервал кристаллизации составляет всего 20–30 °С, поэтому значительного развития ликвация не получает. С повышением содержания углерода в стали температурный интервал кристаллизации резко возрастает, что способствует интенсивной ликвации металла. Это наряду с другими трудностями усложняет сварку сталей с повышенным содержанием углерода.

Ранее были рассмотрены процессы дендритной ликвации в сплавах при первичной кристаллизации. Однако сплавы на основе железа претерпевают аллотропические превращения в твердом состоянии и переходят из  $\gamma$ -в  $\alpha$ -железо. Это сопровождается изменением строения шва за счет появления новых образований в пределах первичных столбчатых кристаллов.

Изменение формы зерен при аллотропических превращениях, происходящих в твердом металле, наблюдается при вторичной кристаллизации. Процессы вторичной кристаллизации металла шва зависят от его химического состава, скорости охлаждения и ряда других факторов и будут рассмотрены ниже при изложении особенностей сварки различных металлов и сплавов.