

# **ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВА И ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ**

д.ф.т.н., доцент Б.Д. Юсупов, старший преподаватель З.Ш. Саъдуллаев  
Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического  
университета имени Ислама Каримова

## **FORMATION OF THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF THE WELD METAL AND SURFACE ZONE DURING FUNCTION WELDING**

PhD, Associate Professor B.D. Yusupov, senior lecturer Z.Sh. Sadullaev  
Almalyk branch of Tashkent State Technical University named after Islam  
Karimov

**Аннотация.** Целью данной статьи является обзор основных принципов, определяющих развитие микроструктуры в сварных швах и зоны термического влияния при сварке плавлением. Так как склонность к растрескиванию сварных конструкций является функцией микроструктуры, окружающей среды и приложенного напряжения, важно понимать основные принципы, которые определяют формирование микроструктуры во время сварки. В данной статье основное внимание будет уделено швам при сварке плавлением.

Существует ряд металлургических процессов, которые контролируют микроструктуру и свойства сварных швов. Плавление и кристаллизация являются важными процессами, поскольку являются ключевыми для достижения приемлемых соединений во всех процессах сварки плавлением. С кристаллизацией связаны процессы сегрегации и диффузии, приводящие к локальным изменениям состава, которые влияют как на свариваемость, так и на эксплуатационные характеристики.

**Ключевые слова:** металлургия, реакция, плавления, сплав, зона плавления.

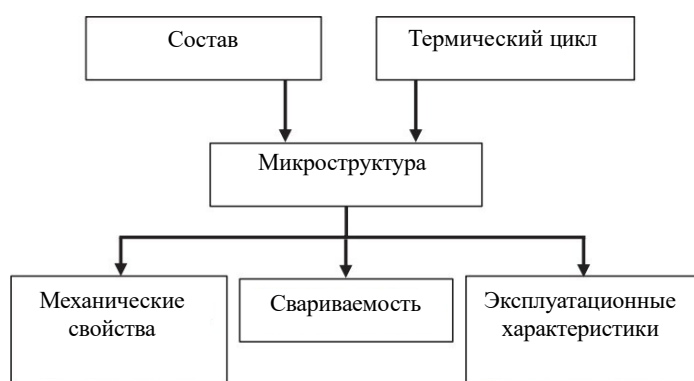
**Annotation.** The purpose of this article is to review the basic principles governing the development of microstructure in welds and the heat-affected

zone in fusion welding. Since the cracking susceptibility of welded structures is a function of microstructure, environment, and applied stress, it is important to understand the fundamental principles that govern microstructure formation during welding. This article will focus on fusion welding welds. Associated with crystallization are processes of segregation and diffusion, leading to local changes in composition that affect both weldability and performance characteristics.

There are a number of metallurgical processes that control the microstructure and properties of welds. Melting and crystallization are important processes as they are key to achieving acceptable joints in all fusion welding processes.

**Key words:** metallurgy, reaction, melting, alloy, melting zone.

Многие металлургические процессы происходят в твердом состоянии, включая фазовые превращения, реакции выделения, рекристаллизацию, рост зерна и т.д. Степень этих реакций может значительно изменить микроструктуру и свойства сварного шва (металл сварного шва и зона термического влияния (ЗТВ)) относительно основного металла. Многие из этих реакций или сложные комбинации реакций могут привести к охрупчиванию или растрескиванию сварных швов.



**Рисунок 1.** Блок-схема развития и производительности микроструктуры шва.

Это охрупчивание может происходить из-за ликвации, наличия

жидких пленок в твердой матрице или в твердом состоянии из-за потери пластичности.

Тепловое расширение во время нагрева и сжатие во время охлаждения могут привести к сложным картинам напряжений внутри и вокруг сварных швов. Эти напряжения могут впоследствии влиять на микроструктуру и свойства сварного шва и способствовать растрескиванию в областях, где деформация растяжения, возникающая в результате этих напряжений, превышает пластичность материала.

Природа микроструктуры сварного шва для данного материала определяется комбинацией термического цикла сварного шва и состава материала. В общем, скорости нагрева и охлаждения, связанные со сваркой, довольно высоки ( $10-1000^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ) и обычно не позволяют прогнозировать микроструктуру на основе равновесных термодинамических принципов. Все металлургические процессы, которые влияют на микроструктуру сварного шва, зависят от температуры и скорости нагрева/охлаждения, и, таким образом, термический цикл сварки играет ключевую роль в развитии микроструктуры и, в конечном счете, свариваемости материала, как схематически показано на рисунке.

## **ОБЛАСТИ ШВА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ**

Исследование сварного соединения выявляет отчетливые микроструктурные области. Зона плавления связана с плавлением. ЗТВ, хотя и не расплавленная, подвержена влиянию тепла в процессе соединения. За ЗТВ находится основной металл, не подвергшийся тепловому воздействию. Зона плавления и ЗТВ могут дополнительно подразделяться, как описано в данной статье.

Зона плавления описана как таковая, потому что это область, где происходит плавление и кристаллизация для формирования соединения

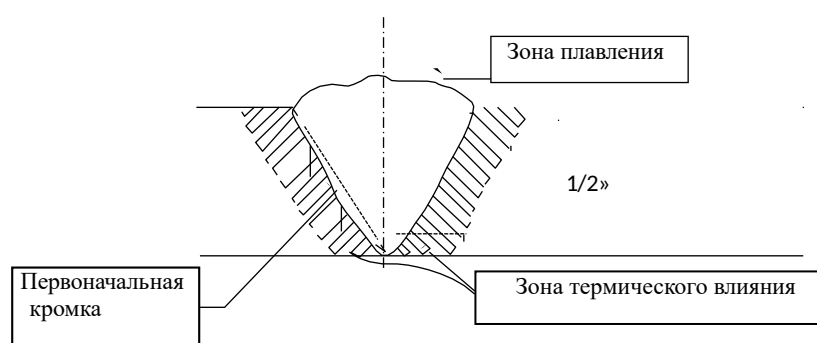
или сварочного шва. Поскольку все металлы обладают кристаллической структурой, а многие из них имеют кубические кристаллические решетки, существуют общие явления кристаллизации, общие для всех металлов. Во многих материалах режим кристаллизации очень чувствителен к составу. Например, добавление небольших количеств углерода и азота к некоторым сталям может изменить их режим кристаллизации с ферритовой (ОЦК) на аустенитную (ГЦК). Небольшое добавление серы в стали может способствовать кристаллизационному растрескиванию в зоне плавления. Алюминиевые сплавы, которые в других отношениях подвержены трещинам, могут быть сварены с присадочным материалом, содержащим более 6% кремния, чтобы избежать растрескивания.

Микроструктура и свойства ЗТВ контролируются исключительно тепловыми условиями, возникающими во время сварки и послесварочной термообработки (ПСТО). Алюминиевые сплавы обычно упрочняются осаждением или упрочняются для повышения прочности; сварка может полностью устранить эти эффекты усиления в ЗТВ. Сталь претерпевает фазовое превращение, которое может привести к ЗТВ, имеющей радикально отличную микроструктуру и свойства, чем основной металл или зона плавления.

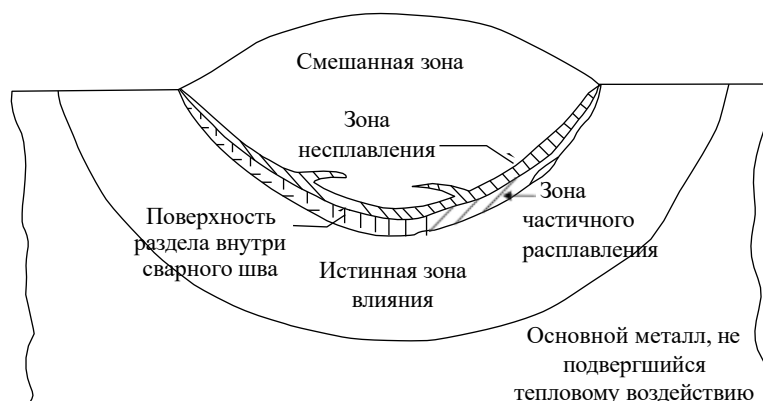
Понимание областей сварного шва сильно изменилось с 1960-х годов. До этого времени шов при сварке плавлением, как считалось, состоял только из двух областей: зоны плавления и окружающей ЗТВ, как показано на рис. 2 из лекции Е.Ф. Нипса 1959 года [3]. Значительные исследования, проведенные У. Ф. Сэвиджем и его учениками в РПИ в 1960-х и 1970-х годах, показали, что существовали и другие отдельные области шва при сварке плавлением [4, 5].

В 1976 году Сэвидж и соавт. [4] предложил несколько изменений в терминологии, используемой для описания областей микроструктуры шва при сварке плавлением, как показано на рисунке 2.3. Считалось, что зона плавления состоит из двух областей. Смешанная зона представляла собой

часть зоны плавления, где основной и присадочный металлы были смешаны в «смешанную» структуру. Окружая эту область вдоль границы плавления, они определили область, называемую зоной несплавления (ЗНС). ЗНС состоит из расплавленного и повторно затвердевшего основного металла, который не смешивается с присадочным металлом. В некоторых системах сплавов ЗНС может обладать микроструктурами и свойствами, сильно отличающимися от таковых в смешанной зоне, особенно при использовании неоднородных присадочных металлов.



**Рисунок 2.** Раннее схематическое изображение областей шва при сварке плавлением.



### **Рисунок 3.** Области шва при сварке плавлением (см. [4]).

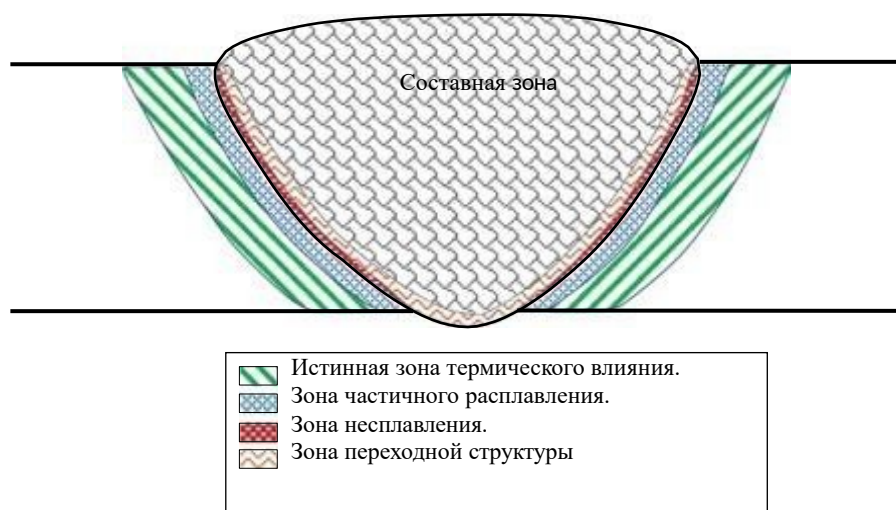
ЗТВ была разделена на две области: зону частичного расплавления (ЗЧР) и «истинную» зону термического влияния (И-ЗТВ). ЗЧР существует во всех швах при сварке плавлением, выполненных в сплавах, поскольку переход от 100% жидкости к 100% твердому состоянию должен происходить по границе плавления. Кроме того, были идентифицированы другие механизмы, которые привели к локальному оплавлению (или ликвации) в узкой области, окружающей зону плавления. Они включают в себя плавление по границе зерен из-за сегрегации и явления, описанного как «составная ликвация», которое возникает в результате локального оплавления, связанного с составляющей частицей. Обозначение И-ЗТВ использовалось для дифференциации той области ЗТВ, в которой все металлургические реакции происходят в твердом состоянии, то есть не происходит плавления или ликвации.

С 1976 года мало что изменилось в отношении терминологии для описания областей шва при сварке плавлением, хотя были проведены значительные исследования различных систем сплавов, чтобы убедиться, что эти области действительно существуют в этих системах материалов. В эту оригинальную терминологию были внесены дополнительные уточнения. Например, И-ЗТВ в сталях подразделяется на различные подразделы, такие как крупнозернистые ЗТВ (КзЗТВ), мелкозернистые ЗТВ (МзЗТВ) и межкритические ЗТВ (мКЗТВ).

Единственным потенциальным дополнением к терминологии на рисунке 2.3 является переходная область в зоне плавления. В неоднородных сварных швах, где присадочный металл отличается по составу от основного металла, это будет представлять собой переход состава из смешанной зоны в ЗНС. В некоторых системах сплавов эта зона переходной структуры (ЗПС) может иметь микроструктуру, заметно отличающуюся от окружающих областей. Например, в сварных швах

между нержавеющей стали и низколегированными сталями в переходной области может образовываться мартенситная структура, которая отсутствует в других местах сварного шва.

Новая схема областей шва при сварке плавлением представлена на рисунке 2.4 для неоднородного сварного шва. Он аналогичен иллюстрации на рисунке 2.3, но содержит состав ЗПС, которая может присутствовать в некоторых системах. В следующих разделах будут достаточно подробно рассмотрены различные определенные ранее области и описаны механизмы, участвующие в их формировании.



**Рисунок 4.** Современная схема, показывающая области шва при сварке плавлением.

## ЗОНА ПЛАВЛЕНИЯ

Зона плавления представляет собой ту область шва при сварке плавлением, где происходит полное плавление и повторная кристаллизация в процессе сварки. Микроструктура в зоне плавления зависит от состава и условий кристаллизации. Небольшие различия в составе часто приводят к большим изменениям в микроструктуре и свойствах. В некоторых системах изменение скорости кристаллизации и охлаждения также может изменить микроструктуру, иногда резко.

Зона плавления обычно очень отличается от окружающей ЗТВ и

основного металла, когда образцы готовятся металлографически. Это связано как с макроскопическими, так и с микроскопическими флуктуациями состава в результате процесса кристаллизации.

В сварных швах, где присадочный металл имеет отличный от основного металла состав, теоретически существуют три области. Крупнейшей из них является составная зона (СЗ), состоящая из присадочного металла, равномерно разбавленного основным металлом. Рядом с границей плавления могут существовать две дополнительные области. Зона несплавления (ЗНС) состоит из расплавленного и повторно затвердевшего основного металла, где произошло незначительное смешивание с присадочным металлом. Между ЗНС и СЗ должна существовать зона переходной структуры (ЗПС), где присутствует градиент состава от основного металла до СЗ.

Были определены три типа зон плавления: автогенные, однородные и неоднородные. Классификации зависят от того, используется ли присадочный металл, и на составе присадочного металла по отношению к основному материалу. Все три типа зон плавления часто встречаются.

К автогенным сварным швам относятся те, в которые не добавляется присадочный металл, а зона плавления образуется в результате плавления и повторной кристаллизации основного металла. Они распространены в ситуациях, когда толщина сечения минимальна и проникновение может быть легко достигнуто выбранным процессом. В тонких сечениях автогенная сварка часто может применяться на высоких скоростях, и обычно требуется минимальное количество подготовки соединения, то есть могут использоваться стыковые соединения. Процессы сварки, которые адаптированы или могут быть адаптированы к автогенной сварке, включают дуговую сварку вольфрамовым электродом в защитном газе (ДСВЭЗГ), электронно-лучевую сварку (ЭЛС), сварку лазерным лучом (СЛЛ), плазменную дуговую сварку (ПДС) и контактную сварку. Зона плавления по существу имеет тот же



состав, что и основной металл, за исключением возможных потерь из-за испарения или захвата газов из защитной среды. Не все материалы могут быть соединены автогенной сваркой из-за проблем свариваемости.

Однородные сварные швы предусматривают использование присадочного металла, который точно соответствует составу основного металла. Этот тип зоны плавления используется, когда для применения требуется, чтобы присадочный и основной металлы имели сходные свойства. Такие свойства, как реакция на термообработку или коррозионная стойкость, являются примерами подобных свойств. Некоторые распространенные примеры включают использование основного металла типа 316l (конструкционная криогенная аустенитная сталь.), соединенного с присадочным материалом 316l для соответствия коррозионных свойств, и использование присадочного металла E10016-d2 на хромомолибденовой высоколегированной стали AiSi 4130, которую обычно подвергают полной ПСТО для обеспечения однородной прочности.

Неоднородные сварные швы представляют собой швы при сварке плавлением, выполненные из присадочных металлов, состав которых отличается от состава основного металла. Во многих ситуациях подходящих присадочных металлов может не существовать, или желаемые свойства сварного шва могут быть недостижимы с подходящим составом. Следует также признать, что многие составы основного металла могут по определению иметь плохую свариваемость и что для достижения приемлемых свойств или эксплуатационных характеристик необходимы неоднородные присадочные металлы. Некоторые соображения, требующие использования присадочного металла неоднородного состава, включают прочность, образование дефекта сварного шва (например, пористость), стойкость к растрескиванию при свариваемости/кристаллизационному растрескиванию, реакцию на термообработку, коррозионную стойкость, стоимость присадочного

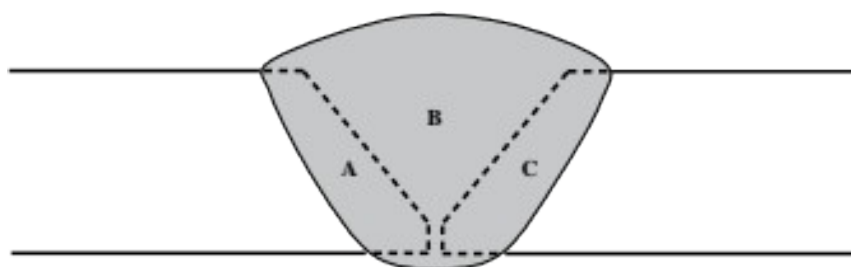
металла и эксплуатационные характеристики расходных материалов.

При использовании присадочного металла с составом, отличным от состава основного металла, необходимо тщательно учитывать эффекты разбавления, иначе желаемый результат может оказаться не таким, как ожидалось. Типичные примеры неоднородных сварных швов включают использование присадочного металла типа 308/ на основном металле типа 304/ для свариваемости и коррозионной стойкости, а также использование присадочного металла алюминия 4043 с основным металлом алюминия 6061 для сопротивляемости кристаллизационному растрескиванию.

Как отмечалось ранее, использование неоднородных сварных швов часто требует пристального внимания к эффектам разбавления. Разбавление можно определить, как изменение состава присадочного металла вследствие его смешивания с основным металлом в процессе плавления. Во многих случаях разбавление нежелательно и должно тщательно контролироваться. Изменение состава металла сварного шва путем разбавления может свести на нет или уменьшить желаемые свойства наплавленного металла, которые были бы достигнуты присадочным металлом в его неразбавленном состоянии. Один случай, когда разбавление особенно нежелательно, относится к операциям наплавки, при которых присадочные металлы значительно отличаются от основного материала и выбраны для получения очень специфических свойств, таких как износостойкость, коррозионная стойкость или ударные свойства. Например, если нержавеющая сталь используется в качестве плакировки на углеродистых сталях для коррозионной стойкости, значительное разбавление (~ 40%) может снизить содержание хрома до уровня, при котором плакирующий слой больше не является коррозионностойким.

Разбавление выражается через разбавление присадочного металла основным металлом и схематически показано на рисунке 2.5.

Математически разбавление - это отношение количества расплавленного основного металла к общему количеству расплавленного металла. Например, сварной шов с 10% разбавлением будет содержать 10% основного металла и 90% присадочного. Для большинства сварочных процессов разбавление обычно регулируется на уровне ниже 50%. Поперечные сечения сварных швов, как показано на рисунке 2.5, могут использоваться для оценки разбавления исходя из исходной геометрии соединения, или фактический состав металла сварного шва может быть определен путем анализа, а разбавление рассчитано, если известны составы основного и присадочного металлов.



$$\text{Разбавление (\%)} = \frac{A+C}{A+B+C} \times 100$$

**Рисунок 5.** Схематическая иллюстрация определения разбавления в неоднородном сварном шве.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ASM Handbook. 9th ed. Volume 9, Materials Park, OH: ASM International; 1985. p. 279-296.
2. Walker P, Tarn WH, editors. CRC Handbook of Metal Etchants. Boca Raton, FL: CRC Press; 1991. p. 1188-1199.
3. Vander Voort GF. Metallography of Superalloys. Lake Bluff, IL: Buehler Ltd.; October 2003.
4. ASM Handbook. Volume 12: Fractography. 9th ed. Materials Park, OH: ASM International; 1987. p 74-76.