

УДК 621.791.72

Т.В. ОльшанскаяПермский национальный исследовательский
политехнический университет**ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СВАРНЫХ ШВОВ
ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ
НА ПРИМЕРЕ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ С БРОНЗОЙ**

Рассмотрены теоретические аспекты кристаллизации сварных швов из разнородных материалов. Приведена сравнительная характеристика физико-химических свойств железа и меди. Описываются основные процессы, влияющие на свариваемость разнородного сварного соединения сталей с медью и ее сплавами. Предложен механизм влияния физических особенностей электронно-лучевой сварки на процессы кристаллизации сварного шва из разнородных материалов на примере сталь – бронза.

Ключевые слова: физико-химических свойства металлов, кристаллизация, сварочная ванна, разнородные соединения, электронно-лучевая сварка, гидродинамические процессы, сварной шов.

T.V. Olshanskaya

Perm National Research Polytechnic University

**FEATURES OF CRYSTALLIZATION
OF WELDED SEAMS FROM DIVERSE MATERIALS
AT ELECTRON BEAM WELDING ON THE EXAMPLE
OF HIGHLY CHROMIC STEEL WITH BRONZE**

Theoretical aspects of crystallisation of welded seams from diverse materials are considered. The comparative characteristic of physical and chemical properties of iron and copper is resulted. The basic processes influencing on weldability diverse welded connection of steels with copper and its alloys are described. The mechanism of influence of physical features of electron beam welding on processes of crystallisation of a welded seam of diverse materials on an example a steel – bronze is offered.

Keywords: physical and chemical properties of metals, crystallisation, a welding bath, diverse connections, electron beam welding, hydrodynamic processes, a welded seam.

За последние годы номенклатура сочетания разнородных металлов, используемых в сварных конструкциях, резко возросла и продолжает расширяться. Соединения из различных классов сталей с медью и ее сплавами достаточно широко используются во многих отраслях. Для изготовления ответственных изделий, узлов и конструкций, работающих в агрессивных средах при повышенных или пониженных температурах, чаще всего используют высокохромистые стали (аустенитные, аустенито-ферритные, мартенситные) и хромистые бронзы. К таким соединениям предъявляются весьма высокие требования в отношении работоспособности, хотя, как правило, они обладают химической, структурной и механической неоднородностями, которые могут возникать в различных зонах сварного соединения. Свариваемые материалы обладают различными физико-химическими свойствами, механические и эксплуатационные характеристики сварного шва будут определяться свойствами «нового материала», образовавшегося в результате прошедших при сварке процессов, и основная цель при сварке разнородных материалов заключается в направленном регулировании этих процессов [1, 2].

Рассматривая процессы, происходящие при сварке разнородных металлов и сплавов (плавление, образование сварочной ванны и ее кристаллизация), необходимо учитывать следующие различия в физико-химических свойствах:

- разные температуры плавления – при большом их различии в момент достижения одним из металлов жидкого состояния другой будет находиться еще в твердом;

- различия в коэффициентах линейного расширения, что обуславливает возникновение значительных термических напряжений. Для уменьшения напряжений требуется предварительный подогрев материала с меньшим коэффициентом линейного расширения;

- различие теплопроводности и теплоемкости соединяемых металлов приводит к асимметрии температурных полей и изменению условий кристаллизации металла шва, обуславливает характер смачиваемости более тугоплавкого металла. Для компенсации тепловых потерь необходимо подогревать материал с большей теплопроводностью;

- резкое различие в электромагнитных свойствах соединяемых металлов может привести к неудовлетворительному формированию шва;

- отличия в природе оксидов, их химической стойкости, температурах плавления, способности к растворению в основном металле, защитных свойствах, а также неодинаковая способность растворять газы [2, 1].

Решающее влияние на свариваемость разнородных металлов оказывает металлургическая совместимость, которая определяется взаимной растворимостью металлов в жидком состоянии и свойствами жидких расплавов: вязкостью, плотностью, смачиваемостью. Химическая неоднородность образующейся сварочной ванны зависит от характера движения жидкости и возникающих в ней конвективных потоков, поэтому разность свойств расплавов будет иметь большое значение. Кроме этого, на свариваемость разнородных металлов оказывает влияние их растворимость в твердом состоянии. О характере взаимодействия между двумя материалами можно судить по соответствующим диаграммам состояния. Однако эти диаграммы построены для равновесных условий и отвечают стабильному состоянию, тогда как процесс сварки метастабилен. Таким образом, диаграммы состояния позволяют представить только первую приближенную схему процесса кристаллизации.

У меди и железа наблюдается некоторая близость кристаллофизических свойств: тип кристаллической решетки при повышенных температурах, параметры, атомные радиусы, количество электронов в наружном слое атома (таблица), поэтому медь с железом образует твердые растворы с ограниченной растворимостью (рис. 1). В системе железо – медь существуют три области первичной кристаллизации фаз – δ , γ и ϵ , и три превращения (два перитектических и одно эвтектическое), протекающих при 1480, 1094 и 850 °С. Растворимость железа в меди при 1025, 900, 800 и 700 °С составляет 2,5; 1,5; 0,9 и 0,5 мас. % соответственно. При нормальной температуре сплавы железа с медью представляют собой твердые растворы железа в меди (ϵ -фаза, содержание Fe < 0,2 %), меди в α -железе (< 0,3 % Cu) и смеси этих растворов ($\alpha + \epsilon$) [3]. При сварке металлов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии возможность образования качественного соединения зависит от степени развития внутрикристаллической ликвации в процессе первичной кристаллизации металла шва и от характера последующих фазовых и структурных превращений в твердом состоянии. Растворимость железа в медных сплавах понижается, поэтому избыточное железо начнет выделяться в виде включений, обогащаясь легирующими элементами и медью [2].

Сварка плавлением сталей с медными сплавами осложнена целым рядом факторов, среди которых: существенное различие в теплофизических свойствах; более низкая вязкость и поверхностное натяже-

ние расплава меди (см. таблицу); склонность меди к пористости; высокое сродство меди к кислороду, обуславливающее формирование эвтектики $\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$, охрупчивающей металл.

Основные физико-химические свойства металлов и расплавов

Показатели	Медь	Железо
Группа в периодической системе	I	VII
Атомный номер	29	26
Количество электронов в наружном слое атомов	1	2
Тип кристаллической решетки	ГЦК	α – ОЦК, γ – ГЦК
Параметр кристаллической решетки, нм	0,361	α – 0,286, γ – 0,365
Атомный радиус, нм	0,128	0,141
Температура плавления, К	1356	1808
кипения, К	2840	3023
Коэффициент линейного расширения на 1 °С	$16,6 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	385	74
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	358	460
Удельное электросопротивление, Ом·м	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$12 \cdot 10^{-8}$
Плотность в твердом состоянии, г/см ³	8,93	7,87
в жидком состоянии, г/см ³	8,00	7,00
Динамическая вязкость расплава, Н·с/м ³	$3,6 \cdot 10^3$ при 1375 К	$7 \cdot 10^3$ при 1823 К
Поверхностное натяжение расплава, Н/м·10 ⁻³	1103 при 1454 К	1500 при 1793 К

Основной проблемой свариваемости стали с медными сплавами является межкристаллитное проникновение меди в сталь. Этот дефект представляет собой трещины в виде клиньев, заполненных медью, часто охватывающих группу зерен. Наличие этого дефекта существенно снижает механические свойства стали, и особенно ее пластичность. Наиболее часто межкристаллитное проникновение меди наблюдается при сварке с аустенитной сталью (рис. 2). Наличие ферритной фазы в стали уменьшает проникание в нее меди, а содержание феррита более 30 % в аустенитно-ферритной стали – полностью устраняет [2].

Исследования показали взаимосвязь межкристаллитного проникновения меди в сталь и появления в стали горячих трещин. При этом избежать появления указанных дефектов при сварке для многих марок сталей без применения специальных технологических приемов не уда-

ется. В то же время технологические приемы, обеспечивающие отсутствие горячих трещин в стали, способствуют и предотвращению межкристаллитного проникновения меди в сталь [4].

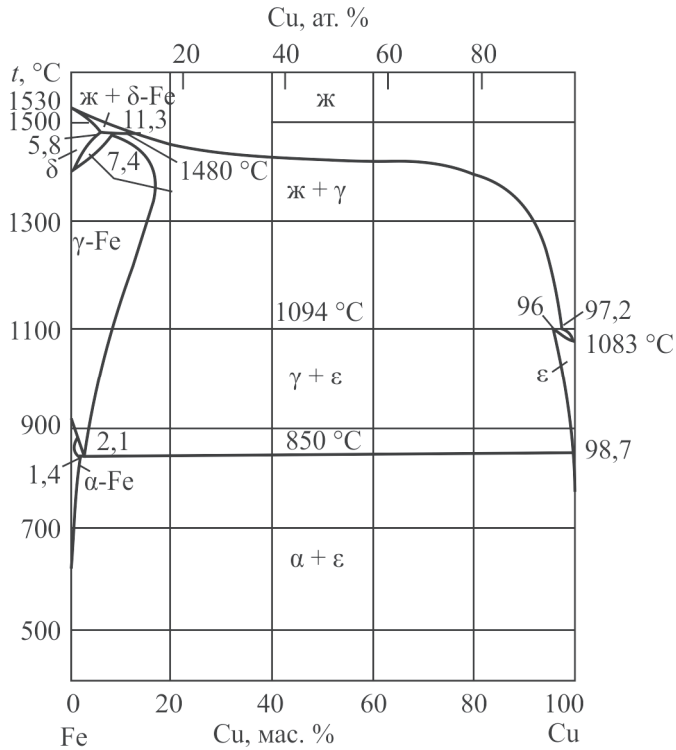


Рис. 1. Диаграмма состояния Fe–Cu [3]



Рис. 2. Межкристаллитное проникновение меди в сталь [5]

Применение электронно-лучевой сварки (ЭЛС) для получения сварных соединений сталей с медными сплавами позволяет решить многие проблемы, например уменьшения пористости меди, подавления образования в ней эвтектики Cu + Cu₂O. Это обусловлено тем, что сварка происходит в высоком вакууме. В том числе благодаря высоко-

концентрированному вводу тепловой мощности и возможности точного позиционирования электронного пучка, сварные швы получаются с высокими значениями отношения глубины к его ширине, обеспечиваются минимальные размеры зоны термического влияния и высокие механические характеристики сварных соединений.

Однако при ЭЛС стали с бронзой остается нерешенным ряд проблем, связанных с формированием структуры сварного шва, появлением дефектов в зоне сплавления и корневой зоне шва. Исследования, проведенные в работах [5, 6], показали, что при ЭЛС высокохромистой стали с бронзой с ведением электронного пучка по стыку свариваемых деталей в сварном шве формируется сложная разнородная структура, как по глубине, так и по ширине шва. Это приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик сварного соединения в результате неоднородности его механических свойств и понижения стойкости при работе в агрессивных средах (рис. 3 и 4).



Рис. 3. Сварное соединение: аустенитная сталь AISI 304L с медью, толщина 30 мм [5]



Рис. 4. Сварное соединение: мартенситная сталь 09X16H4Б с бронзой БрХ-08, толщина 7,5 мм



Кроме этого, с увеличением толщины свариваемого металла наблюдается существенная асимметрия сварного шва в сторону детали из бронзы, и становится невозможным получение полного проплавления металла [6, 7]. Это связано с разным коэффициентом теплопроводности

сти и разными электромагнитными свойствами свариваемых материалов. Для получения полного проплавления, предотвращения процессов перемешивания стали с бронзой и уменьшения ширины зон диффузионных процессов ЭЛС осуществляют со смещением электронного пучка от стыка либо в сторону стали, либо в сторону бронзы [6–8]. Такой технологический прием позволяет достичь расплавления одного металла при незначительном расплавлении другого, при этом сварное соединение получается посредством сварки-пайки. Однако данный прием требует четкого позиционирования электронного пучка, так как незначительные отклонения могут привести либо к несплавлению, либо к перемешиванию стали с бронзой и появлению дефектов в сварном шве [6, 7, 9]. Удовлетворительные результаты получаются для разнородных соединений небольшой толщины [8].

Формирование разнородной сложной структуры металла шва при ЭЛС стали с бронзой по стыку может быть объяснено следующим образом. Как отмечалось выше, неоднородность сварных швов разнородных материалов зависит от конвективных потоков в сварочной ванне. Конвекция жидкости обуславливается разными температурами жидкости в различных зонах ванны и рядом других причин. Например, при дуговых способах сварки под действием давления сварочной дуги и сил электрического происхождения возникает турбулентное движение жидкости в центральной части, а вблизи границы сплавления в металле шва образуется слой, в котором практически не происходит перемешивание жидкого металла [2].

При ЭЛС в режиме глубокого проплавления происходят более сложные физические процессы, в результате которых плавление металла электронным пучком происходит по передней стенке канала проплавления. Вследствие периодического перемещения электронного пучка по передней стенке канала происходит периодическое образование жидкой фазы металла [10], что приводит к сложному протеканию гидродинамических процессов по глубине в образующейся сварочной ванне. В работе [11] была предложена схема движения расплава в сварочной ванне при ЭЛС. В верхней части канала, где угол его раскрытия наибольший, происходит преимущественно горизонтальный перенос металла по боковым стенкам с фронта проплавления в хвостовую часть сварочной ванны, где движение жидкости носит турбулентный

характер. В средней и нижней части канала, где угол раскрытия канала значительно уменьшается по глубине, значительно усиливается перенос металла вдоль оси пучка. Перенос металла с фронта оплавления происходит дискретно, отдельными порциями в соответствии с условиями автоколебательных процессов к каналу. Перенос металла по передней и боковым стенкам канала происходит под действием реакции отдачи металлического пара. На задней стенке канала имеются и восходящие потоки металла, вовлекаемые в совместное движение истекающим из канала паром [11].

Таким образом, с учетом больших скоростей охлаждения, малого времени существования сварочной ванны и разности свойств расплавов (вязкости, смачиваемости, поверхностного натяжения) не будет происходить интенсивного перемешивания собственно двух свариваемых материалов. В сварочной ванне будет происходить только перемешивание слоев расплавов свариваемых металлов с некоторым их обогащением друг другом. При этом в верхней, расширенной части шва вследствие турбулентного движения жидкости слои расплавов будут более крупные, также будут наблюдаться капельные включения, разные по размеру. В средней и нижней частях сварочной ванны будет происходить измельчение слоев расплава, уменьшение количества капельных включений и их размеров и обогащение другим металлом. На рис. 5 представлена микроструктура сварного соединения из мартенситной стали 09Х16Н4Б и бронзы БрХ-08, толщина 7,5 мм. Подобное перемешивание наблюдают многие исследователи (рис. 6).

Вследствие существенного отличия температур кристаллизации процесс кристаллизации сварочной ванны начинается со стороны стали. В самой сварочной ванне в первую очередь будут затвердевать те участки жидкости, где химический состав расплава близок к составу стали. В последнюю очередь будут затвердевать участки жидкости, близкие по химическому составу к бронзе, заполняя межзеренные и междендритные участки и прослойки. В результате более высокой теплопроводности бронзы в процессе кристаллизации тепловой поток из зоны нагрева будет направлен преимущественно в ее сторону, и соответственно, время пребывания сварочной ванны в жидком состоянии со стороны бронзы будет увеличиваться. Все это приводит к формированию неоднородной структуры металла шва как по глубине, так и по ширине.

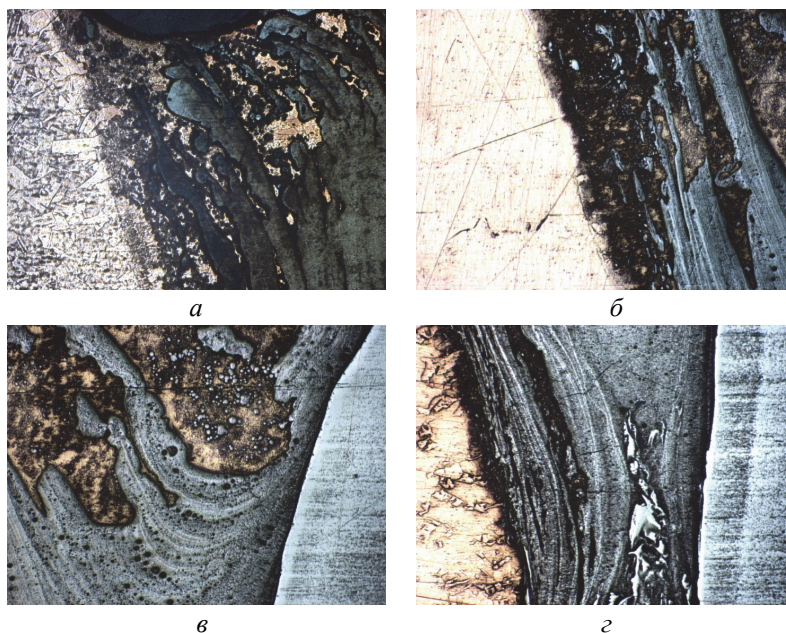


Рис. 5. Микроструктура сварного соединения из мартенситной стали 09Х16Н4Б и бронзы БрХ-08, $\times 250$: *a* – верхняя часть шва со стороны бронзы; *б, в* – средняя часть шва; *г* – нижняя часть шва



Рис. 6. Верхняя часть шва сталь – бронза [8]

Повлиять на подобный механизм кристаллизации, варьируя такие параметры ЭЛС, как ток электронного пучка и скорость сварки, практически невозможно. Это позволяет получить лишь изменение степени перемешивания и дисперсности структур, при этом процесс кристаллизации во всех случаях сопровождается формированием неравномерной структуры металла шва с характерными слоями гидродинамического перемешивания на основе либо стали, либо бронзы с капельными включениями стали. Подобным механизмом образования сварного соединения, а также неравномерностью тепловых полей по глубине

и ширине, можно объяснить появление несплавлений или перемешивания стали с бронзой при сварке большой толщины со смещением электронного пучка относительно стыка.

Следовательно, при ЭЛС сталей с бронзами в режиме глубокого проплавления независимо от режима сварки и толщины свариваемых изделий будет наблюдаться неоднородность структуры металла шва по глубине и ширине, а соответственно, и неоднородность механических и эксплуатационных свойств. Для уменьшения степени неоднородности структуры металла шва необходимо, чтобы жидкая сварочная ванна имела однородный, гомогенный состав. В этом случае кристаллизация будет происходить с внутрикристаллической ликвацией меди, т.е. в первую очередь во всем объеме сварочной ванны будет происходить кристаллизация стали, а бронза будет заполнять междендритное пространство, с формированием затвердевшей однородной смеси двух систем – стали и бронзы.

Условиями получения однородной сварочной ванны являются ее интенсивное перемешивание и увеличение времени пребывания ее в жидком состоянии. При этом также необходимо снижение градиента температур между сталью и бронзой для обеспечения одинаковой скорости отвода тепла в оба металла. Подобное воздействие на сварочную ванну возможно при использовании таких технологических приемов, как осцилляция электронного пучка, сопутствующий подогрев бронзы, использование разделения электронного пучка на несколько тепловых источников.

Список литературы

1. Рабкин Д.М., Рябов В.Р., Гуревич С.М. Сварка разнородных материалов. – Киев: Техника, 1975. – 208 с.
2. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 239 с.
3. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – Т. 1. – 992 с.
4. Волченко В.Н. Сварка и свариваемые материалы: в 3 т. Т. I. Свариваемость материалов / под ред. Э.Л. Макарова. – М.: Металлургия, 1991. – 528 с.
5. An investigation of fusion zone microstructures in electronbeam welding of copper – stainless steel / I. Magnabosco, P. Ferro, F. Bonollo,

L. Arnberg // *Materials Science and Engineering*. – 2006. – А 424. – Р. 163–173.

6. Electron beam welding of bronzes to 316 L(N) steel / L.A. Goncharov, E.V. Terentyev, A.U. Marchenkov, M.A. Portnov // *Electrotechnica & Electronica*. – 2012. – Vol. 47. – № 5–6. – Р. 123–127.

7. Karcher C., Ziolkowski M., Brauer H. Seebach Effect during Electron Beam Welding // *Elektrotechnica & Electronica*. – 2009. – № 5–6. – Р. 76–81.

8. Влияние тепловых и диффузионных процессов на формирование структуры металла шва при лазерной сварке разнородных материалов / Г.А. Туричин, О.Г. Климова, К.Д. Бабкин, Я.Б. Певзнер // *МиТОМ*. – 2013. – № 10. – С. 58–64.

9. Особенности структуры металла сварных швов при электронно-лучевой сварке разнородных материалов / О.Г. Климова, Г.А. Туричин, В.А. Лопота, А.И. Шамшурин, И.А. Сизова // *Науч.-техн. ведомости СПбГТУ*. – 2013. – № 2. – С. 125–132.

10. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

11. Башенко В.В., Децик Н.Н., Децик В.Н. О движении расплава в сварочной ванне при ЭЛС // *Труды науч.-техн. конф. по ЭЛС*. – М., 1993. – С. 88–90.

Получено 17.07.2014

Ольшанская Татьяна Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: tvob66@rambler.ru

Olshanskaya Tatiana Vasilevna – Ph.D. in Technical Sciences, Assistant Professor, Department “Welding Production and Technology of Structural Materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: tvob66@rambler.ru