

Л.С. Лившиц

**Металловедение для
сварщиков**

Сварка сталей

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 66.0
ББК 35
Л11

Л11 **Л.С. Лившиц**
Металловедение для сварщиков: Сварка сталей / Л.С. Лившиц – М.: Книга
по Требованию, 2024. – 258 с.

ISBN 978-5-458-28776-0

В книге даны основные положения металловедения, их значение для сварки металлов и свойств получаемых соединений. При рассмотрении некоторых прикладных вопросов металловедения сварки основное внимание уделено сталям, как материалам, наиболее широко применяемым в различных отраслях народного хозяйства. Книга рассчитана на инженерно-технических работников сварочного производства.

ISBN 978-5-458-28776-0

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основные промышленные способы сварки связаны с нагревом металлов в широком интервале температур и последующим охлаждением нагретых зон с разными скоростями. Такому тепловому воздействию на металл при сварке часто сопутствует влияние внешних усилий или сварочных напряжений. Эти факторы в зонах сварных соединений металлов определяют протекание сложных структурных и фазовых изменений, имеющих определяющее значение для различных свойств: прочности, пластичности, вязкости, жаропрочности, коррозионной стойкости и др. Структурные и фазовые превращения наряду с диффузионными процессами при сварке часто являются более сложными, чем при термической обработке металлов. В связи с этим металлосоединение, рассматривающее закономерности изменения состояния и свойств металлических сплавов разной природы и состава при различных условиях влияния внешних факторов — температуры, усилий, среды и др., — является одной из основ сварки.

Для способов сварки плавлением характерно получение сварного соединения, состоящего из трех основных частей: 1) металла шва, 2) металла зоны сплавления и 3) зоны теплового воздействия сварочного источника теплоты.

Металл шва образуется при кристаллизации из жидкого состояния расплавленного присадочного металла и оплавленного по кромкам свариваемого металла.

Сварной шов имеет строение литого металла с соответствующими кристаллизационными зонами. Кристаллическое строение металла шва зависит от условий плавления и кристаллизации расплавленного металла при сварочном цикле (гл. II), от химического состава и типа диаграммы состояния сплава в металле шва (гл. II), от диффузионных процессов в жидком и твердом состоянии (гл. III), от структурных и фазовых превращений при охлаждении в твердом состоянии (гл. VI), а также от напряжений и деформаций, возникающих при сварке (гл. IV).

Характер участка сплавления имеет большое значение для свойств и работоспособности сварных соединений, особенно при сварке разнородных металлов и различных по составу и структурному классу сталей. На состав и структурное состояние металла

в участке сплавления влияют условия проплавления свариваемой стали, фазовое и структурное состояние образующихся сплавов промежуточного состава и диффузионные процессы на границе раздела (гл. III, IV, VI, XI).

Строение и свойства зоны теплового влияния сталей зависят от природы свариваемого металла, наличия и характера полиморфных, фазовых и структурных превращений при нагреве и охлаждении (гл. V, VI, VII, VIII) и от термомеханического цикла сварки (гл. IV, VIII). В этих зонах помимо процессов фазовых и структурных превращений могут протекать процессы рекристаллизации и полигонизации (гл. IV).

При сварке давлением соединение металлов происходит в твердой фазе. В этом случае основными зонами сварного соединения являются контактная зона соединения и зоны теплового влияния на свариваемых сталях. При этом виде сварки увеличивается роль и значение упругой и пластической деформации, создаваемой внешним усилием сдавливания свариваемых металлов (гл. IV). Контактная зона сварного соединения формируется в сложных условиях, и для ее строения и свойств имеют значение установление металлической связи (гл. I), рекристаллизация и диффузия (гл. III и IV), характер образующихся при диффузии прослоек (гл. III, XI).

Особое значение все приведенные факторы имеют для сварных соединений легированных и высоколегированных сталей (гл. VIII—XII).

Отдельные вопросы металловедения сварки излагались ранее в работах С. В. Лашко и Н. Ф. Лашко, В. Н. Земзина, А. М. Макары, Б. А. Мовчана, Н. Н. Прохорова, М. Х. Шоршорова и др.

В настоящей книге сделана попытка общего систематизированного рассмотрения основных закономерностей металловедения в связи со значением их для технологии сварки, свариваемости, строения и свойств сварных соединений.

Глава I

ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ СВАРКИ

Многообразие свойств металлов, в и том числе различие поведения их при сварке, обусловлено во многом разницей в строении их атомов, тех элементарных комплексов, из которых построено каждое вещество. Различия в строении, энергетическом состоянии и свойствах атомов определяют разницу в характере образуемых ими элементарных агрегатов — кристаллических решеток металлов, в которых свойства оказываются уже более определенными. Колонии таких агрегатов — элементарных кристаллических ячеек образуют кристаллы и поликристаллы, являющиеся теми металлами, с которыми мы имеем дело при практическом их использовании и свойства которых нам знакомы. Эти поликристаллические металлы имеют различные массу, пластичность и прочность, по-разному ведут себя при нагревах и охлаждениях, при сварке. При этом в последнее время приобрела значение сварка не только частей одного и того же металла, но сварка металлов с различными по построению элементарными кристаллическими ячейками и атомами, отличающимися по строению и энергетическому состоянию. Для выяснения причин различия в свойствах металлов кратко рассмотрим основы их физического строения, в основном по тем характеристикам, которые могут иметь значение для сварки.

АТОМЫ И МЕЖАТОМНЫЕ СВЯЗИ

Элементарной комплексной основой элементов, и в том числе металлов, является атом, состоящий из электрически положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов, вращающихся на разном расстоянии от ядра. Сумма отрицательных зарядов всех электронов данного атома равна положительному заряду ядра. Таким образом, в целом атом электрически нейтрален, а числовая величина заряда ядра составляет Ze , где e — элементарный заряд электрона, Z — число электронов. Величина Z , определяющая кратность заряда ядра элементарным зарядом, — это атомный номер элемента и одна из характеристик свойств.

Одна из главных отличительных особенностей элементов — разница в заряде их ядра. Однако многообразие химических и

физических свойств элементов, и в том числе способность атомов к соединению друг с другом с образованием связи той или иной степени прочности, определяется разницей в электронном строении

Электроны в атомах находятся на разном расстоянии от ядра; это определяет их энергетический уровень и прочность связи с ядром. Естественно, что чем ближе находятся противоположно заряженные ядро и электроны, тем сильнее они притягиваются друг к другу. Кроме разного расстояния электронных оболочек от ядра, состояние электронов определяется теми орбитами, по которым они вращаются. Эти орбиты могут быть круговыми с ядром в центре и эллиптическими с разной степенью эллиптичности. Да и сама ориентировка орбит в пространстве может быть различной. Наряду с этим сам электрон вращается вокруг своей оси и направление этого вращения может быть у разных электронов противоположным.

На основе законов квантовой механики Н. Бор сформулировал основные принципы, характеризующие состояние электронов

Состояние электронов в атоме характеризуется четырьмя квантовыми числами. Главное квантовое число n характеризует энергетический уровень данной электронной оболочки по отношению к ядру. Число n может принимать целые значения от 1 до 7, что свидетельствует о возможности существования у разных элементов от одного до семи главных энергетических электронных уровней. Каждому главному квантовому числу отвечает соответствующий период в периодической системе элементов Менделеева, т. е. элементы первого периода имеют только одну основную электронную оболочку, элементы второго периода — две, третьего периода — три и т. д. до седьмого периода.

Второе азимутальное квантовое число l определяет степень эллиптичности орбиты — подуровня, ее эксцентricичность по отношению к ядру. Число l может принимать целые значения от 0 до $n - 1$. Число электронов, находящихся на каждом из подуровней, может быть различным

Третье квантовое число m_l характеризует пространственное положение той или иной орбиты. Это число часто называют магнитным, поскольку оно характеризует магнитный момент электрона по отношению к ядру. Для орбит с различным значением l величина третьего квантового числа может меняться от $-l$ до $+l$, принимая только значения целых чисел.

Четвертое — спиновое квантовое число характеризует собственное вращение электрона вокруг своей оси. Вращение может происходить либо в одну, либо в другую сторону, и спиновое число m_s (или просто σ) может принимать только два значения: $+\frac{1}{2}$ и $-\frac{1}{2}$.

Свойства атома, и в том числе энергетические показатели связи между электронами и ядром, а также связь между собой атомов одних и тех же элементов и атомов различных элементов (что важ-

но для соединения их сваркой) зависят от общего числа электронов в атоме, расположения их по электронным уровням, от степени заполнения (или, наоборот, от незаполненности) того или иного электронного уровня или подуровня, общего числа электронных уровней, от состояния последнего внешнего электронного уровня, от того, являются ли спины соседних электронов данного подуровня, и особенно электронов внешней оболочки, взаимно уравновешивающими или нет.

Число внешних электронов атома, т. е. электронов, находящихся на внешней оболочке (наивысшем энергетическом уровне) может быть от 1 до 8. Внешние электроны наименее прочно связаны с ядром, поэтому они легче всего отделяются или отдаляются от атома. Именно эти электроны в основном ответственны за создание межатомной связи, которая определяется стремлением атома к получению завершённой электронной оболочки. Поэтому по числу внешних электронов атома определяется его валентность и по степени достроенности внешней оболочки — его активность или способность вступать в соединение с другими атомами. Там, где внешняя оболочка полностью достроена (у гелия — это два электрона, у остальных элементов — не менее восьми электронов), атом вещества оказывается практически пассивным к образованию связей. К таким элементам относятся инертные газы. Валентность элемента (максимальная) в периодической системе определяется группой, в которой находится элемент, что соответствует числу электронов на внешнем уровне.

Соединение отдельных атомов между собой и образование атомных комплексов обуславливает создание молекул химических соединений, образование атомных агрегатов металлов и других веществ. Способность атомов одного и того же вещества или различных веществ соединиться друг с другом в прочный агрегат — образовывать неразъёмное соединение является важнейшим фактором при сварке металлов, и в особенности при сварке давлением в твёрдом состоянии. При сварке давлением свариваемые поверхности сжимаются до сближения на расстояние, на котором могут проявиться силы атомного взаимодействия между свариваемыми поверхностями. Установление атомной связи между этими поверхностями — необходимое условие получения сварного соединения.

В настоящее время между собой сваривают металлы одни и те же (сталь—сталь, медь—медь и т. д.) и различные (сталь—никель, медь—никель и др.). Сваривают и металлы с неметаллами — керамиками. Номенклатура материалов, свариваемых между собой, непрерывно расширяется.

Рассмотрение природы связи между атомами имеет первостепенное значение как для понимания условий образования различных соединений, и в том числе сварных, так и для разработки новых процессов и новых видов сварных соединений.

Атомы различных элементов отличаются между собой числом электронных оболочек — энергетических уровней, на которых

расположены электроны. При этом, если рассматривать какой-либо данный атом, то чем выше энергетический уровень (чем больше главное квантовое число) электронной оболочки, тем дальше электроны находятся от ядра, тем выше свободная энергия электронов, тем менее прочно они связаны с ядром.

Имеет значение не только увеличение расстояния этих электронов от ядра и уменьшение силы взаимодействия между электроном и ядром, но и экранирующее влияние промежуточных электронных оболочек. Поэтому электроны внешних оболочек в атоме слабее связаны с атомом, чем все остальные электроны. Они могут при соответствующих условиях отдаляться от атома, могут вообще его покидать, переходя, например, к другому атому, у которого внешняя оболочка имеет более низкий энергетический уровень и свободное место (недостроена). Таким образом, одним из факторов, определяющих соединение атомов, является энергетическое состояние электронов на внешней оболочке — валентных электронов: чем слабее они связаны с атомом, тем легче они переходят к образованию связи с другим атомом.

Прочность связи внешних электронов с атомом определяется помимо перечисленных и другими факторами. Большое значение имеет степень заполненности внешней оболочки. Максимальное число электронов на внешней оболочке — восемь. Пример с инертными газами, имеющими полностью застроенные внешние оболочки и не образующими соединений с атомами других веществ, свидетельствует о том, что чем полнее застроена внешняя оболочка, тем прочнее закреплены на ней электроны. Поэтому атомы с одним электроном на внешней оболочке легче всего его отдают.

На прочность закрепления внешнего электрона у своего атома также влияет компенсация или вернее образование замкнутых магнитных полей, создаваемых спинами электронов (вращением электронов вокруг своей оси). Если у атома имеются два внешних электрона с антипараллельными спинами (вращающимися в разные стороны), т. е. имеющих четвертое квантовое число у одного — $1/2$, у другого $+1/2$, то магнитные поля, создаваемые при вращении заряда электрона, образуют более замкнутое магнитное поле, способствующее удержанию каждого из электронов. Естественно, если на внешней орбите имеется только один электрон и нет электрона с антипараллельным спином, то этот электрон удерживается слабее, чем два электрона с противоположными спинами. Однако бывают и случаи, когда имеются пары электронов с параллельными спинами. Это обстоятельство не должно способствовать их удержанию.

Если рассматривать соединение двух различных атомов (сварку различных металлов), то наличие на внешних оболочках атомов с противоположными спинами должно обуславливать образование уравновешенных магнитных полей и улучшение свариваемости.

Сила, с которой удерживается электрон у своего атома (речь, конечно, идет о внешних электронах), определяется ионизацион-

ным потенциалом — напряжением, которое необходимо приложить, чтобы оторвать электрон и сделать атом положительно заряженным ионом. У атома может быть несколько ионизационных потенциалов в соответствии с тем, сколько у него электронов на внешней оболочке и какой по счету электрон отрывается.

Значения первых ионизационных потенциалов различных элементов (отрыв первого электрона с внешней орбиты) — важный показатель способности атомов к установлению межатомных связей — приведены в табл. 1. Из таблицы видна периодичность изменения данной характеристики. Наиболее высокие потенциалы ионизации имеют элементы с полностью заостренной внешней оболочкой (инертные газы). По мере уменьшения степени заполнения внешнего уровня потенциал, как правило, падает. Наинизшие потенциалы имеют элементы с наименее заостренными оболочками. По мере увеличения атомного номера элемента сказывается экранирующее влияние внутренних электронных уровней.

Вторые и последующие потенциалы ионизации (там, где они имеются), как правило, сохраняют ту же периодичность в изменении.

Ионизационные потенциалы в определенной степени, по-видимому, могут служить энергетическим показателем способности к соединению отдельных частей тех или иных металлов. При условии, что произошло сближение соединяемых частей на расстояния сил атомного взаимодействия и соединяемые поверхности чисты, для установления соответствующей атомной связи нужна какая-то энергия для активации атомов соединяемых частей. Чем ниже потенциал ионизации атома, тем легче его сделать активным для установления связи. С этой точки зрения среди интересующих технику металлов легче всего должен свариваться в твердом или пластичном состоянии между собой алюминий (ионизационный потенциал 5,98 эВ), несколько труднее — титан (6,82 эВ), затем — ниобий (6,88 эВ), молибден (7,1 эВ), свинец (7,42 эВ), серебро (7,57 эВ), никель (7,63 эВ), магний (7,64 эВ), медь (7,72 эВ), железо (7,8 эВ), вольфрам (7,98 эВ). Конечно, не только потенциал ионизации имеет значение для сварки давлением (в твердом состоянии). Важны и некоторые другие характеристики (в частности, возможность сближения при деформации), о чем речь будет идти дальше. Это определяет возможность отклонения от приведенного порядка.

Для прочности межатомной связи большое значение имеет ее тип, т. е. способ и принцип соединения атомов между собой.

Основой межатомной связи и, следовательно, образования неразъемных соединений является взаимодействие электронов, а движущей силой этого взаимодействия — стремление атомов к получению завершающих электронных оболочек и достижению наиболее устойчивого распределения электронов по уровням и подуровням. В результате различных взаимодействий между атомами может образовываться несколько типов наиболее устойчивых электронных

Таблица I
Потенциалы ионизации атомов

Атомный номер	Элемент	Число электронов на внешнем уровне	Потенциал ионизации, эВ	Атомный номер	Элемент	Число электронов на внешнем уровне	Потенциал ионизации, эВ
1	H	1	13,595	46	Pd	1	8,33
2	He	2	24,581	47	Ag	1	7,574
3	Li	1	5,39	48	Cd	2	8,991
4	Be	2	9,32	49	In	3	5,785
5	B	3	8,296	50	Sn	4	7,342
6	C	4	11,256	51	Sb	5	8,639
7	N	5	14,53	52	Te	6	9,01
8	O	6	13,614	53	I	7	10,454
9	F	7	17,418	54	Xe	8	12,127
10	Ne	8	21,559	55	Cs	1	3,893
11	Na	1	5,138	56	Ba	2	5,210
12	Mg	2	7,644	57	La	2	5,61
13	Al	3	5,984	58	Ce	2	6,91
14	Si	4	8,149	59	Pr	2	5,6±0,05
15	P	5	10,484	60	Nd	2	6,31
16	S	6	10,357	61	Pm	2	5,51±0,02
17	Cl	7	13,01	62	Sm	2	—
18	Ar	8	15,755	63	Eu	2	5,6
19	K	1	4,338	64	Gd	2	5,67
20	Ca	2	6,111	65	Tb	2	6,16
21	Sc	2	6,54	66	Dy	2	6,74
22	Ti	2	6,82	67	Ho	2	5,98±0,02
23	V	2	6,74	68	Er	2	6,82
24	Cr	1	6,764	69	Tu	2	—
25	Mn	2	7,432	70	Yb	2	6,08±0,03
26	Fe	2	7,87	71	Lu	2	6,14±0,06
27	Co	2	7,86	72	Hf	2	6,2
28	Ni	2	7,633	73	Ta	2	6,15
29	Cu	1	7,724	74	W	2	7
30	Zn	2	9,391	75	Re	2	7,88
31	Ga	3	6	76	Os	2	7,98
32	Ge	4	7,88	77	Ir	2	7,87
33	As	5	9,81	78	Pt	2	8,7
34	Se	6	9,75	79	Au	1	9
35	Br	7	11,84	80	Hg	1	9,22
36	Kr	8	13,996	81	Tl	2	10,43
37	Rb	1	4,176	82	Pb	3	—
38	Sr	2	5,692	83	Bi	4	6,106
39	Y	2	6,33	84	Po	5	7,415
40	Zr	2	6,84	85	At	6	7,287
41	Nb	1	6,88	86	Rn	7	8,43
42	Mo	1	7,1	87	Fr	8	9,2±0,4
43	Tc	2	7,28	88	Ra	1	10,746
44	Ru	1	7,364	89	Ac	2	3,98±0,1
45	Rh	1	7,46	90	Th	2	5,277
				91	Pa	2	6,86±0,6
				92	U	2	6,95±0,06
							—
							4±1
							6,08±0,08

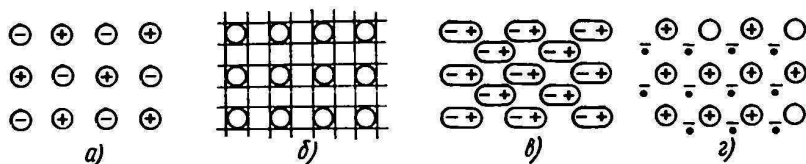


Рис. 2 Различные виды связи между атомами:

а — ионная; б — ковалентная, в — полярная, г — металлическая

кает между различно заряженными атомами. Примером такого ионного соединения может быть поваренная соль. В ней атом натрия отдает электрон и становится положительным ионом, а атом хлора приобретает электрон и становится отрицательным ионом.

Другим видом связи атомов в твердых телах является ковалентная или гомеополярная, иногда ее называют атомной связью (рис 2, б). Для этого типа связи характерно объединение электронов двух соседних атомов (по-видимому, объединяться должны электроны с антипараллельными — противоположными спинами). Такое объединение электронов создает для них общую орбиту с двумя ядрами внутри и может носить непрерывный характер за счет того, что разные электроны внешней оболочки спариваются с соответствующими электронами разных атомов. В результате образуется твердая частица размером, зависящим от количества данного вещества. Такую связь могут образовывать не только различные по своей природе атомы, как это было в случае ионной связи, но и атомы одного и того же элемента. Характерным примером вещества с такими связями может быть алмаз, в котором каждый атом углерода ковалентно связан с четырьмя другими. Этот тип связи весьма прочен. Вещества с такой связью имеют поэтому высокую температуру плавления и твердость.

Молекулярная связь (связь Ван-дер-Ваальса) характерна для атомов с относительно легко деформируемыми электронными оболочками и для объединившихся в молекулы атомов, также способных к деформации внешних объединенных оболочек.

Взаимовлияние магнитных полей большого числа атомов или молекул приводит к тому, что в некоторых из них возникает заметно выраженная поляризация — облако отрицательно заряженных электронов смещается в одну сторону, а положительно заряженные ядра — в другую. Образующиеся таким образом диполи способствуют поляризации соседних атомов или молекул, в результате чего вся дипольная система ориентируется таким образом, что друг с другом контактируют противоположные заряды, между которыми действуют силы притяжения, определяющие связь (рис. 2, в) Эта связь менее прочна, чем рассмотренные выше, и вещества с молекулярной связью имеют более низкие температуры плавления и сублимации.