

621.79

Ф 59

ПРОЦЕССЫ  
СВАРКИ  
ДАВЛЕНИЕМ



М. Л. Финкельштейн

**ДИФФУЗИОННАЯ  
СВАРКА  
В ЖИДКИХ СРЕДАХ**

УДК 621.791.4:539.378.3

Рецензенты: кандидаты технических наук Ю. Б. Малевский  
и А. И. Шестаков

УДК 621.791.4:539.378.3

**Диффузионная сварка в жидких средах.** Финкельштейн М. Л. М., «Металлургия», 1978. 64 с. (Серия «Новые процессы сварки давлением»).

Рассмотрены научные аспекты, технологические особенности и практические возможности диффузионной сварки в жидких средах, разработанной автором.

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния окружающей жидкой среды, окисных пленок и других веществ на контактных поверхностях, исходной структуры свариваемых материалов на процесс образования сварного соединения и его свойства. Приведено описание оборудования и технологии диффузионной сварки в жидких средах различных материалов.

Книга предназначена для инженерно-технических работников металлургической, машиностроительной, приборостроительной и других отраслей промышленности. Она также может быть полезна студентам и аспирантам соответствующих вузов. Ил. 26. Табл. 6. Библиография: 33 назв.

ИБ № 884

**Мартын Львович  
Финкельштейн**

Редактор издательства А. В. Савенков

Художественный редактор Г. А. Жегин

**ДИФФУЗИОННАЯ  
СВАРКА  
В ЖИДКИХ СРЕДАХ**

Технический редактор Н. А. Сперанская

Корректоры Л. Ф. Дурасова, Т. А. Рюмина

Сдано в набор 03.04.78.

Подписано в печать 04.08.78

T-15634

Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>.

Бумага типографская № 1.

Гарнитура литературная.

Печать высокая.

Усл. печ. л. 3,36

Уч.-изд. л. 3,54

Тираж 4400 экз.

Заказ 285

Цена 25 коп.

Изд. № 3355

Издательство «Металлургия», 119034, Москва, Г-34,  
2-й Обыденский пер., д. 14

Подольский филиал ПО «Периодика» Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли  
г. Подольск, ул. Кирова, 25

© Издательство «Металлургия», 1978

Ф 31206—190  
040(01)—78 107—78

## ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

*Сварное соединение при разнообразных способах сварки давлением образуется в результате сложных физико-химических процессов, происходящих на контактных поверхностях и в приконтактных объемах соединяемых материалов.*

*Для получения качественного соединения при различных способах сварки давлением в зависимости от природы соединяемых материалов, характера их взаимодействия между собой и с окружающей средой, интенсивности силового воздействия и температуры при сварке и других факторов необходимо ограничивать одни процессы и интенсифицировать другие.*

*Объяснение природы образования соединения между материалами в твердой фазе возможно лишь с позиций основных положений теории пластической деформации, термодинамики химической кинетики, металловедения и других смежных наук. Очевидна также необходимость целенаправленного управления процессами, происходящими в зоне соединения при сварке, и прежде всего структурными превращениями.*

*В настоящее время сварка давлением широко используется в промышленности и часто является наиболее ответственной технологической операцией в производственном цикле. Поэтому разработка научных основ соединения материалов при разнообразных способах сварки давлением непосредственно связана с повышением эффективности производства и качества различных изделий — основной задачей десятой пятилетки.*

*Издательство надеется, что выпуск серии книг «Новые процессы сварки давлением» будет способствовать дальнейшей разработке теоретических представлений о процессах соединения материалов в твердой фазе и эффективному внедрению в промышленность разнообразных способов сварки давлением.*

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $t_{пл.с}$  — температура плавления солей;  
 $t_{ср}$  — температура жидкой среды (расплава солей);  
 $F_1$  — контактная площадь свариваемой детали;  
 $F_2$  — площадь контакта окружающей среды с зоной соединения;  
 $d$  — диаметр свариваемых деталей;  
 $R$  — высота микронеровностей;  
 $z$  — зазор между микронеровностями;  
 $Ш_{св.п}$  — шероховатость свариваемых поверхностей;  
 $D_1$  — коэффициент диффузии газа в металле;  
 $D_2$  — коэффициент диффузии газа в окружающей жидкой среде;  
 $C_0$  — концентрация (плотность) газа в зазоре;  
 $t_0$  — температура предварительного окисления;  
 $h_0$  — толщина окисной пленки;  
 $\tau_0$  — длительность предварительного окисления;  
 $t_{св}$  — температура сварки;  
 $p$  — давление сварки;  
 $\tau_{св}$  — длительность сварки;  
 $\sigma_B^{O.M}$  — временное сопротивление основного материала при растяжении;  
 $\sigma_B$  — временное сопротивление сварного соединения при растяжении;  
 $\alpha_{заг}$  — угол загиба (при испытании соединений).

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с решениями XXV съезда КПСС прогресс технологии имеет первостепенное значение для повышения технического уровня и эффективности промышленного производства. Повышение качества выпускаемой продукции возможно лишь при условии совершенствования существующих и разработки новых технологических процессов с наискорейшим внедрением их в промышленность.

Расширение возможностей и области рационального применения сварочной техники и технологии в значительной степени определяется созданием новых способов сварки.

Диффузионную сварку — один из новых технологических процессов сварки давлением — широко применяют в промышленности [1].

Наряду с очевидными достоинствами (возможность качественного соединения как металлических, так и неметаллических материалов, получение изделий разнообразной формы с малой степенью пластической деформации) диффузионная сварка в вакууме имеет и недостатки, ограничивающие ее применение, особенно в условиях серийного производства.

Главным недостатком диффузионной сварки в вакууме является низкая производительность процесса из-за больших затрат времени на получение вакуума и охлаждение деталей в вакуумной камере. Вакуумирование рабочего пространства сварочной камеры — довольно сложная технологическая операция, сопряженная со значительными затратами времени, а также с применением сравнительно дорогостоящего вакуумного оборудования.

Решение проблемы повышения производительности диффузионной сварки, очевидно, состоит в создании технологического процесса без использования герметически закрытых камер.

Настоящая книга знакомит читателей с особенностями технологии и возможностями диффузионной сварки (ДС) в жидких средах — созданного в СССР\* перспективного способа соединения металлов, сплавов и неметаллических материалов в твердой фазе.

\* Финкельштейн М. Л. Авт. свид. № 236223. — «Открытия. Изобрет. Пром. образцы. Товарные знаки», 1977, № 7, с. 208.

Возможность соединения деталей сложной конфигурации, относительно невысокая температура сварки, небольшая остаточная пластическая деформация, простота выполнения технологии, низкая стоимость оборудования, возможность автоматизации процесса, а также высокое качество сварных соединений — бесспорные достоинства данного способа сварки.

В книге рассмотрены условия образования соединения при ДС в жидких средах. Главное внимание уделено влиянию на процесс образования сварного соединения и его качество химического состава окружающей среды, вещества в зоне соединения, а также наличия окисных пленок и исходного структурного состояния соединяемых материалов. Показано, что совокупность этих факторов определяет условия образования соединения при ДС в жидких средах.

Диффузионная сварка в жидких средах не является универсальным способом, однако применение этого способа в ряде случаев дает возможность более эффективно решать задачи, выдвигаемые современным промышленным производством.

## 1. СУЩНОСТЬ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

### Схема процесса

Диффузионная сварка в жидких средах (рис. 1) — разновидность сварки давлением. Окружающая жидкая среда может быть химически активной или нейтральной по отношению к соединяемым материалам, иметь разную температуру плавления и испарения. В зависимости от этих свойств жидкая среда при сварке может служить источником нагрева свариваемых деталей, препятствовать проникновению воздуха в зону соединения, взаимодействовать с поверхностями соединяемых материалов и изменять их химический состав, а следовательно, и физико-механические свойства. Поэтому технологические схемы осуществления ДС в жидких средах могут быть различными. Наиболее исследованной схемой является следующая. Соединяемые детали после соответствующей механической обработки контактных поверхностей (чистовое точение, фрезерование или шлифовка) плотно прижимают одну к другой и погружают в ванну с жидкой средой, нагретой до температуры сварки. После определенной выдержки, необходимой для получения требуемой прочности, детали извлекают из ванны и охлаждают на воздухе. Качественные зависимости температуры и давления от длительности процесса при сварке по данной схеме представлены на рис. 2.

В качестве жидкой среды, нагревающей соединяемые детали, можно использовать расплавленные соли, окислы, щелочи, а также расплавы металлов и спла-

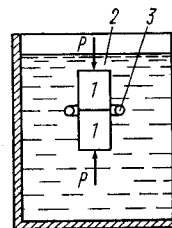


Рис. 1. Общая схема диффузионной сварки в жидкой среде:  
1 — соединяемые детали; 2 — жидкая среда; 3 — индуктор

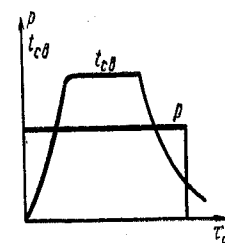


Рис. 2. Характер изменения температуры  $t_{св}$  и давления  $p$  при сварке

вов, температура плавления которых ниже, а температура испарения выше температуры сварки.

Перспективным является и такой вариант технологического процесса, в котором жидкая среда, предварительно нагретая до температуры сварки, одновременно служит для насыщения поверхностей соединяемых материалов углеродом, азотом, бором или одновременно углеродом и азотом<sup>1</sup>. Диффузионную сварку в расплавленных солях можно совмещать с нанесением на соединяемые детали различных металлов. Например, при совмещении сварки с алитированием процесс ведется в ванне с расплавом галогенов, над которым находится слой расплавленного алюминия. По извлечении сваренных деталей из ванны через слой расплавленного алюминия на их поверхности образуется тонкое покрытие; смесь расплавленных солей является источником нагрева и одновременно флюсом, способствующим образованию прочного алюминиевого покрытия.

Таким образом, ДС в жидких средах можно совместить с химико-термической обработкой с целью упрочнения поверхности соединяемых деталей и улучшения эксплуатационных свойств сварного изделия.

Окружающая жидкая среда не обязательно должна выполнять роль источника нагрева. Опробована технологическая схема процесса ДС (рис. 1), когда соединяемые детали нагреваются проходящим током или токами высокой частоты, как при стыковой сварке давлением. В этом случае целесообразно применение жидких сред, температура испарения которых ниже температуры сварки. Осуществление ДС в воде обеспечивает более высокое качество сварного соединения, чем при ДС на воздухе или в расплаве солей.

Определенный интерес представляет возможность ДС в жидких органических средах: керосине, бензине, ацетоне или в их смеси с водой, а также в смеси спиртов (метилового и этилового) и водного раствора аммиака<sup>2</sup>. При ДС в жидких органических средах можно совместить операцию сварки с цементацией и цианированием, так как возникающая паровая рубаш-

ка весьма активна и может насыщать нагретую зону соединения углеродом и азотом.

Использование жидких сред для нагрева различных деталей под прессовую сварку было известно раньше. В частности, известен способ электролитической сварки, в котором нагрев деталей, являющихся катодами, осуществляется постоянным током напряжением 200—300 В в электролите (водных растворах солей).

Тейлор<sup>1</sup> предложил проводить прессовую сварку в инертной жидкости (расплавленных солях): детали с зазором между соединяемыми поверхностями погружают в расплав, нагретый до температуры сварки. Струей расплава с соединяемых поверхностей удаляют окисные пленки, после чего осуществляют сварку.

Перечисленные способы нагрева и очистки соединяемых поверхностей можно использовать и при диффузионной сварке.

## Жидкие среды и их характеристика

Жидкие среды широко применяют при нагреве под закалку, отпуске, цементации, цианировании, а также при пайке, снятии окисной пленки, эмалировании.

К жидким средам предъявляют следующие требования: высокая жидкотекучесть, хорошая теплопроводность, малая летучесть, стойкость при нагреве и прохождении электрического тока, инертность по отношению к нагреваемому материалу, нетоксичность [2]. Кроме того, в твердом состоянии эти среды должны обладать малой гигроскопичностью и не разлагаться при длительном хранении на открытом воздухе.

Состав используемых для нагрева деталей жидких сред весьма разнообразен: различные соли, окислы металлов и щелочи. В качестве добавок к ним используют ферросплавы, уголь, графит, карбид кремния и др.

Широкое распространение для нагрева изделий получили хлористые соли бария, натрия и калия, которые в наибольшей степени удовлетворяют указанным требованиям. Используют также достаточно стойкие фтористые соли магния, кальция, бария, натрия и калия (чаще всего в виде добавок к хлористым солям с целью повышения их жидкотекучести и предохранения стальных деталей от обезуглероживания).

Для лучшей очистки поверхностей, уменьшения температуры плавления и коррозионного воздействия расплава из хлористых солей на материалы используют углекислые соли натрия и калия, которые также вводят в виде добавок. Применение этих солей ввиду их обезуглероживающего действия требует специальной защиты поверхности стальных деталей.

<sup>1</sup> Пат. (США), № 2726438, 1955.

<sup>1</sup> Финкельштейн М. Л. Авт. свид. № 244865. — «Открытия. Изобрет. Пром. образцы. Товарные знаки», 1977, № 27, с. 197.

<sup>2</sup> Финкельштейн М. Л. Авт. свид. № 259619. — «Открытия. Изобрет. Пром. образцы. Товарные знаки», 1977, № 7, с. 206.

Борнокислые соли — сильные окислители — используют для раскисления соляных ванн. Окисляя низшие окислы до высших, они переводят их в шлак и тем самым предотвращают обезуглероживание и уменьшают окисление поверхности деталей при их нагреве в расплавленных солях. Наиболее широко применяют буру. Эффективность ее проявляется в достаточно большом температурном диапазоне (780—1300° С).

В соляные ванны иногда вводят окислы алюминия, кремния и титана, которые также являются раскислителями и препятствуют интенсивному окислению и обезуглероживанию. Эти окислы образуют с окислами бария, натрия, калия и железа, содержащимися в расплаве, сложные и тяжелые соединения, которые выпадают в осадок.

Для предохранения расплава от внешнего окисления часто добавляют восстановители: ферросилиций, карбид кремния, графит, уголь. Щелочи натрия и калия используют сравнительно редко из-за их высокой летучести в расплавленном состоянии и активного воздействия на ткани и кожу.

Смесь окислов (битое стекло) применяют при нагреве деталей до 1350—1400° С.

Для нагрева цветных металлов и сплавов в расплавах обычно используют азотнатриевые и азотнокалиевые соли или их смеси, а также хлористые и фтористые соли. Сравнительно низкая температура плавления калиевой и натриевой селитры и высокая жидкотекучесть позволяют использовать их для нагрева алюминиевых сплавов под закалку, отжиг и отпуск.

Никель и его сплавы нагревают обычно в смеси хлористых и фтористых солей.

Расплавы солей и окислов применяют для нагрева до 150—1350° С. Состав соли выбирают для каждого отдельного случая в зависимости от требуемой температуры процесса. Обычно применяют смеси солей и щелочей эвтектического состава.

Некоторые составы расплавов, которые могут быть использованы при диффузионной сварке черных и цветных металлов, приведены в табл. 1.

Нагрев в жидких средах имеет ряд преимуществ, определивших широкое применение ванн с жидкими теплоносителями в промышленности:

немедленная и полная изоляция нагреваемых изделий от контакта с открытой атмосферой;

более быстрый нагрев изделий преимущественно теплопередачей, а не радиацией или конвекцией. Благодаря более высокому значению коэффициента теплоотдачи от жидкости к металлу скорость нагрева деталей в 5—8 раз выше, чем в электрических, муфельных или пламенных печах;

равномерность нагрева изделий сложной формы, отсутствие термических ударов (расплав, застывая на холодном металле в момент погружения, изолирует его до тех пор, пока температура металла не превысит температуру плавления расплава);

защита поверхности нагретого металла от окисления при охлаждении. После извлечения детали из расплава соль остается на поверхности в виде тонкой пленки до полного охлаждения;

возможность нагрева с точностью до  $\pm 2^\circ$  С;

более равномерное распределение температуры по объему ванны вследствие более высокой теплопроводности жидкостей по сравнению с газами.

Таблица 1  
РАСПЛАВЫ ДЛЯ НАГРЕВА ДЕТАЛЕЙ В ЖИДКИХ СРЕДАХ [2]

Составы расплавов	$t_{пл}$ , °С	$(t_1-t_2)$ , °С	Примечание
100% BaCl <sub>2</sub>	962	1020—1320	Раскислитель: 2—3% Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O; 0,5% FeSi; 5% MgF <sub>2</sub>
90% BaCl <sub>2</sub> +10% NaCl	—	950—1300	Раскислитель: <0,5% Si; <1% SiO <sub>2</sub>
100% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	577	1200—1400	—
100% NaCl	800	850—920	Раскислитель: 0,5% С (древесный уголь); Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O, FeSi; K <sub>4</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]·3H <sub>2</sub> O
100% KCl	776	820—920	
78% BaCl <sub>2</sub> +22% NaCl	—	700—950	Раскислитель: 0,5% SiC; Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O
80% BaCl <sub>2</sub> +20% KCl	640	680—1060	
70% BaCl <sub>2</sub> +30% KCl	—	680—900	
53% BaCl <sub>2</sub> +20% NaCl+27% KCl	550	600—900	
80% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +10% NaCl+10% SiC	—	870—900	
56% KCl+44% NaCl	660	700—815	Для нагрева никеля и его сплавов
83% BaCl <sub>2</sub> +17% BaF <sub>2</sub>	844	900—1000	
100% KNO <sub>3</sub>	338	350—600	Для нагрева алюминия и его сплавов
100% NaNO <sub>3</sub>	317	330—600	
100% NaOH	318	350—580	

Примечание.  $(t_1-t_2)$  — температурный интервал применения расплава.

Нагревающая способность расплавов зависит от температуры их перегрева. Свинец, азотнокислые и хлористые соли, перегретые на  $250^{\circ}\text{C}$  выше температуры плавления, обеспечивают нагрев одинаковых образцов за одинаковое время, несмотря на значительную разницу в абсолютных температурах расплавов. Колебание времени нагрева в разных расплавах составляет около 10%. Это объясняется тем, что коэффициент теплоотдачи в расплавах солей при температурах плавления является постоянной величиной  $[200-220 \text{ кал}/(\text{м}^2 \times \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})]$  и прямо зависит от температуры. Поэтому скорость нагрева возрастает с перегревом расплава. Однако значительный перегрев увеличивает летучесть компонентов расплава.

Скорость нагрева изделий в расплавах зависит также от соотношения масс расплава  $m_p$  и нагреваемых деталей  $m_d$  ( $m_p/m_d \geq 6$ ) [3]. При недостаточном объеме тигля ванной печи ее температура существенно уменьшается, так как одновременно с нагревом изделий требуется повышение температуры расплава до заданной температуры. При нагреве до высоких температур отношение  $m_p/m_d$  должно быть увеличено до 80.

В табл. 1 приведен рекомендуемый температурный интервал работы ванн с расплавами различных солей.

## 2. ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКЕ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

### Влияние жидкой среды

При ДС в жидких средах между контактными поверхностями находится значительное количество газа (на три-четыре порядка больше, чем при сварке в вакууме), а сами поверхности покрыты окисными и другими (масляными, жировыми) пленками. Очевидно, что эти особенности ДС в жидких средах должны существенно влиять на образование сварного соединения и его качество.

Известно, что длительность формирования сварного соединения и его прочность существенно зависят от количества находящегося в зоне соединения газа; с уменьшением содержания газа сокращается длительность процесса и возрастает прочность соединения. В частности, при сварке конструкционной стали в вакууме 10 мм рт. ст. прочность соединения в 2—3 раза ниже, чем при сварке в вакууме  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  мм рт. ст. [1].

Поэтому для ДС необходимо свести к минимуму количество газа в зоне соединения.

При ДС в жидких средах этого можно достичь ограничением подвода газа в зону соединения в результате предварительного сжатия свариваемых деталей перед погружением их в расплавленную соль. В этом случае количество газа в зоне соединения будет определяться в основном шероховатостью контактных поверхностей. После сжатия свариваемых деталей новые порции газа в зону соединения не поступают, так как в результате смятия микронеровностей давление газа в зоне контакта выше, чем в окружающей среде.

Газ, находящийся в зоне соединения, можно удалить несколькими способами. При нагреве предварительно сжатых деталей в жидкой среде до температуры сварки  $500-1100^{\circ}\text{C}$  объем газа между микронеровностями увеличивается в 3—6 раз. Пространство, образованное микронеровностями контактных поверхностей, не замкнуто, а по периферии имеется зазор, образованный из-за неполного смятия микронеровностей соединяемых поверхностей. Поэтому часть нагретого до температуры сварки газа уходит в окружающую среду. Количество присутствующего в зоне соединения газа при этом уменьшается в 3—6 раз.

Оставшийся газ может удаляться также растворением в приконтактных объемах соединяемых деталей [4]. Исследованию этого эффекта посвящены работы [5—10].

Общее количество газа, поглощаемого двумя контактными поверхностями за время  $\tau_1$ , определяется формулой [11]:

$$W_1 = 4 F_1 (C_0 - C_1') \sqrt{D_1 \tau_1 / \pi}, \quad (1)$$

где  $C_1' \approx 0$  — концентрация газа в металлах до контакта.

Общее количество газа, находящегося в зазоре между свариваемыми поверхностями, если исходить из размеров поверхностей и высоты микронеровностей  $R$ , приблизительно равно:

$$W_{\text{общ}} \approx F_1 R C_0. \quad (2)$$

Поэтому длительность растворения газа, находящегося в зоне соединения:

$$\tau_1 = \pi R^2 / (16 D_1). \quad (3)$$

Средняя высота микронеровностей контактирующих поверхностей в зависимости от вида обработки может составлять 0,1—20 мкм. Длительность растворения находящихся в зоне соединения газов (водорода азота или кислорода) в зависимости от высоты микронеровностей, температуры процесса, растворяющегося газа и свариваемого материала составляет от нескольких секунд до десятков минут, а длительность смятия микронеровностей — от нескольких секунд до нескольких минут. Например, при ДС в вакууме стали Ст3 ( $t_{св}=1000^\circ\text{C}$ ,  $p=2$  кгс/мм<sup>2</sup>) микронеровности ( $R=10$  мкм) сминаются за 90 с [12], а длительность растворения находящегося в зоне соединения воздуха согласно расчетам по уравнению (3) составляет ~30 мин.

Следовательно, при ДС в жидких средах удаление находящегося в зоне соединения газа происходит также в процессе смятия микронеровностей вытеснением его в окружающую среду через зазор, возникающий при контактировании свариваемых поверхностей. Основной причиной вытеснения газа является разность давлений его в зоне соединения и в окружающей среде. Вытеснение газа в окружающую среду происходит за доли секунды, так как объем его в зоне соединения мал.

Другим возможным путем удаления газа из зоны соединения является поглощение его окружающей жидкой средой. Этот процесс возможен ввиду наличия зазора по периферии контактирующих деталей.

Общее количество газа, поглощаемого окружающей средой за время  $\tau_2$ :

$$W_2 = 2 F_2 (C_0 - C_1) \sqrt{D_2 \tau_2 / \pi}, \quad (4)$$

где  $C_1$  — концентрация поглощаемого газа в окружающей среде при  $\tau_2=0$ ;

$$F_2 = \pi d z. \quad (5)$$

Зазор между микронеровностями достаточно мал (менее 10 мкм), однако поглощение газа окружающей средой может играть определенную роль в удалении

газа из зоны соединения, так как коэффициенты диффузии газа в металле примерно на 7 порядков ниже, чем в жидкой среде [13, 14].

Например, если свариваются в жидкой среде (расплавленных солях) две детали диаметром  $d=12$  мм, контактные поверхности которых вследствие их шероховатости образуют зазор  $z=1\div 10$  мкм, то отношение количеств газа, поглощенных окружающей средой и контактными поверхностями металла за одинаковое время, будет равно:

$$W_2/W_1 \approx (F_2/2 F_1) \sqrt{D_2/D_1} \text{ или}$$

$$W_2/W_1 = (2 R/d) \sqrt{D_2/D_1}. \quad (6)$$

При  $R=1\div 10$  мкм,  $d=12$  мм;  $D_2/D_1=10^7$  получим  $W_2/W_1 \approx 0,5\div 5$ . Следовательно, при ДС окружающая жидкая среда способна поглотить от 30 до 80% газа, находящегося в зоне соединения.

Приведенные оценки соответствуют случаю, когда поглощение находящегося в зоне соединения газа поверхностью металла и окружающей средой не сопровождается химической реакцией.

Соединяемые поверхности всегда покрыты слоем окислов, который тормозит проникновение газа в глубь металла. Поэтому длительность растворения газа в металле будет несколько больше рассчитанной по уравнению (3).

При растворении газа в окружающей жидкой среде в ряде случаев скорость растворения газа определяется не скоростью диффузии его в растворителе, а скоростью химической реакции на границе газа с жидкой средой. Поэтому длительность растворения газа в окружающей среде может быть меньше, чем следует из уравнения (4). Таким образом, окружающая жидкая среда способна поглощать большее количество газа, чем это следует из уравнения (4).

Зная скорости протекания указанных процессов, можно определить количество газа, поглощаемого соединяемыми материалами при ДС в жидких средах. Расчеты показывают, что в реальных условиях контактирующими поверхностями поглощается  $\leq 10\%$  общего количества находящегося в зоне соединения газа.

Выполненный анализ позволяет сформулировать требования к свойствам жидких сред при ДС.



Жидкая среда должна иметь, по возможности, низкую температуру плавления и минимальную вязкость. В этом случае интенсифицируются нагрев деталей и растворение твердой корки соли, возникающей на деталях сразу же после погружения их в расплав.

С уменьшением вязкости жидкой среды скорость диффузии газа в жидкость возрастает. В результате ускоряется удаление газа из зоны соединения.

Желательно, чтобы жидкая среда вступала в химическую реакцию с газами, находящимися в зоне соединения. В этом случае часть растворенного в жидкой среде газа переходит в связанное состояние, и концентрация его в жидкости понижается. Это приводит к увеличению градиента концентрации газа и ускорению его удаления из зоны соединения. Это ускорение тем больше, чем выше скорость химической реакции газа с жидкой средой. При весьма больших скоростях реакции ускорение удаления газа из зоны соединения может быть настолько большим, что сопротивление жидкой фазы становится равным нулю [14]. Следовательно, применение в качестве жидкой среды веществ, вступающих в химическую реакцию с кислородом или другими газами, способствует более интенсивному удалению газов, находящихся в зоне соединения. Для снижения концентрации кислорода в жидком расплаве целесообразно добавлять в него раскислители, способные связывать растворенный кислород и другие газы в химические соединения.

Общее количество поглощенного окружающей средой газа увеличивается, если среда вокруг зоны соединения находится в газообразном состоянии. Поглощение оставшегося в зазоре между соединяемыми поверхностями газа окружающей средой будет ускоряться потому, что коэффициент диффузии газа в газе превышает коэффициент диффузии газа в жидкости примерно на четыре порядка [14]. Следует отметить, что газ, окружающий зону соединения, должен отличаться от газа в зоне контактирования (если в зоне контактирования и вокруг нее одинаковая газовая среда, то газ из этой зоны не удаляется, так как градиент концентрации его в этом случае равен нулю).

Если сварку вести в жидкой среде, температура плавления которой ниже температуры сварки, то при нагреве деталей (например, проходящим током, токами

высокой частоты) вокруг зоны соединения возникает паровая рубашка, способствующая удалению газа, находящегося в зоне контактирования свариваемых деталей. В качестве жидкой среды можно использовать керосин, ацетон, бензин, воду.

При взаимодействии окружающей среды с поверхностью соединяемых деталей возможно изменение химического состава приповерхностных слоев, а следовательно, и их физико-механических свойств. В результате структура и механические свойства в центральной части и по периферии соединения могут различаться.

Окружающая среда, поглощая часть находящихся в зоне соединения газов, тем самым также влияет на образование и качество сварного соединения.

Кроме того, окружающая среда может быть поверхностно активной и, следовательно, способствовать развитию пластической деформации соединяемых деталей при сварке.

В табл. 2 приведены режимы ДС ряда материалов в различных средах и данные механических испытаний на разрыв сварных соединений. Сваривали заготовки диаметром 12—15 мм. Испытаниям на разрыв подвергали стандартные образцы диаметром 8 мм. Нагрев заготовок в воде осуществляли токами высокой частоты. Сварку на воздухе проводили в шахтной электропечи.

Данные табл. 2 указывают, что прочность сварных соединений (из стали, меди, титана, алюминия) существенно зависит от химического состава и агрегатного состояния окружающей среды. Особенно различается прочность сварных соединений, полученных на воздухе и в расплавленной соли (когда в зоне контактирования находится воздух). Прочность соединений из стали 45, полученных сваркой в расплавленных солях, в четыре раза больше, чем соединений, полученных сваркой на воздухе. Для стали 50ХГА значения прочности соединений разнятся в восемь раз. Аналогичные результаты получены при сравнении значений прочности медных сварных соединений.

Наличие в зоне соединения других веществ может существенно влиять на их качество (см. табл. 2). Например, использование при сварке таких веществ, как хлористый и фтористый аммоний, флюс Ф220, значительно уменьшает разницу в значениях прочности сварных

Таблица 2

РЕЖИМЫ ДС РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРОЧНОСТЬ  
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Вещество в зоне соедине- ния	Окружающая среда	$t_{\text{св}}'$ °C	$p_{\text{св}}'$ кгс/мм <sup>2</sup>	$\tau_{\text{св}}'$ мин	$\sigma_{\text{в}}^*$ кгс/мм <sup>2</sup>
<i>Сталь Э+сталь Э(Ш<sub>св.п</sub>—6-й класс)</i>					
Вазелин	Вода	1000	1,0	9	43—47/45
	Воздух	1000	1,0	9	34—38/36
	BaCl <sub>2</sub>	1000	1,0	9	2—5/3
<i>Сталь 45+сталь 45(Ш<sub>св.п</sub>—8-й класс)</i>					
Воздух+	70% BaCl <sub>2</sub> +30%	850	2,3	5	42—48/45
	KCl				
Воздух+	Воздух	850	2,3	5	30—35/33
	70% BaCl <sub>2</sub> +30%	850	2,3	5	59—64/62
+флюс Ф220	KCl				
	Воздух	850	2,3	5	40—50/45
Глицерин	70% BaCl <sub>2</sub> +30%	850	2,3	5	54—60/57
	KCl				
Вазелин	Воздух	850	2,3	5	56—60/59
	70% BaCl <sub>2</sub> +30%	850	2,3	5	10—12/11
Воздух	KCl				
	Воздух	850	2,3	5	36—42/39
	70% BaCl <sub>2</sub> +30%	850	2,3	5	42—48/45
	KCl				
	Воздух	850	2,3	5	8—13/10
<i>Сплав ВТ8+сплав ВТ8(Ш<sub>св.п</sub>—6-й класс)</i>					
Вазелин	BaCl <sub>2</sub>	1010	0,8	5	5—10/7
	Воздух	940	1,1	8	52—60/56
<i>Алюминий+алюминий(Ш<sub>св.п</sub>—6-й класс)</i>					
Вазелин	KNO <sub>3</sub>	600	0,24	27	3—5/4
	Воздух	600	0,15	22	7—8,5/7,8
<i>Сталь 50ХГА+сталь 50ХГА(Ш<sub>св.п</sub>—8-й класс)</i>					
Воздух	Воздух	850	2,3	5	10—15/13
	70% BaCl <sub>2</sub> +30%	850	2,3	5	100—110/104
	KCl				
<i>Медь+медь(Ш<sub>св.п</sub>=6)</i>					
Воздух+	Воздух	820	0,9	5	17—19/18,2
	70% BaCl <sub>2</sub> +30%	820	0,9	5	5—8/6,8
	KCl				
Воздух+	Воздух	820	0,9	5	6—8/6,8
	70% BaCl <sub>2</sub> +30%	820	0,9	5	6—8/6,6
	KCl				
Вазелин	Воздух	820	0,9	5	5—8/6,3
	70% BaCl <sub>2</sub> +30%	820	0,9	5	4—7/5,3
	KCl				
Глицерин	Воздух	820	0,9	5	11—14/12
	70% BaCl <sub>2</sub> +30%	820	0,9	5	9—11/9,8
	KCl				

Продолжение табл. 2

Вещество в зоне соедине- ния	Окружающая среда	$t_{\text{св}}'$ °C	$p_{\text{св}}'$ кгс/мм <sup>2</sup>	$\tau_{\text{св}}'$ мин	$\sigma_{\text{в}}^*$ кгс/мм <sup>2</sup>
Воздух	Воздух	820	0,9	5	4—6/4,7
	70% BaCl <sub>2</sub> +30%	820	0,9	5	15—17/15,8
Воздух	KCl				
	Воздух	820	0,9	8	15—17/15,7
	70% BaCl <sub>2</sub> +30%	820	0,9	8	20—21/20,6
	KCl				

\* В знаменателе указаны средние значения  $\sigma_{\text{в}}$ .

соединений, полученных при ДС на воздухе и в расплавленных солях. Видно также, что наличие в зоне соединения вазелина, глицерина и других веществ органического происхождения оказывается наиболее эффективным при осуществлении ДС на воздухе. Если контактные поверхности покрыты вазелином, то прочность сварного соединения из стали 45 при сварке на воздухе оказывается в три-четыре раза большей, чем при сварке в расплавленных солях (39 и 11 кгс/мм<sup>2</sup>).

Для соединений из титанового сплава ВТ8 значения прочности при аналогичных условиях осуществления процесса сварки составляют 56 и 7 кгс/мм<sup>2</sup>, для соединений из стали Э—36 и 3 кгс/мм<sup>2</sup>, для соединений из алюминия—7,8 и 4 кгс/мм<sup>2</sup>.

Из уравнений (4) и (6) следует, что способность окружающей среды поглощать находящиеся в зоне соединения газы зависит от разности их концентраций в зоне соединения в окружающей среде и коэффициента диффузии газа. Разность концентраций газа определяется химическим составом веществ, находящихся в зоне соединения и в окружающей среде. Скорость диффузии газа в первую очередь зависит от агрегатного состояния среды (газообразной или жидкой).

При ДС на воздухе и присутствии его в зоне соединения разность концентраций кислорода и азота, находящихся в зоне соединения и окружающей среде, равна нулю. При сварке в расплавленных солях разность концентраций этих газов весьма значительна. Поэтому при ДС в жидкой среде часть газа поглощается этой средой, а при сварке на воздухе поглощения газов не происходит. Наличие большего количества газа в зоне соедине-

ния требует большей длительности для его растворения в контактирующих слоях металлов и приводит к тому, что процесс формирования сварного соединения протекает медленнее.

При наличии в зоне контактирования углеводородного вещества (например, вазелина) градиенты концентраций углерода и водорода не зависят от того, воздух или расплавленная соль окружают зону соединения. Поэтому при сравнении количеств газа, поглощенных окружающими средами, важным параметром является скорость диффузии газа в воздухе и в расплавленных солях. Так как скорость диффузии газа в газе на четыре порядка больше, чем в жидкой среде, то воздух поглощает из зоны соединения больше углеводородов, чем расплавленная соль. Поэтому при ДС в расплавленных солях образование качественного сварного соединения происходит медленнее, чем при сварке на воздухе. Соответственно прочность сварного соединения выше при ДС на воздухе.

Рассмотренные случаи влияния окружающей среды на качество соединения в определенном смысле являются предельными: в первом случае основным фактором является различный химический состав веществ, находящихся в зоне соединения и окружающей среде, во втором — агрегатное состояние окружающей среды.

Прочность сварных соединений из стали Э, полученных при ДС в воде, весьма высока. Эти результаты подтверждают сделанные ранее выводы относительно эффективности осуществления ДС в жидких средах, температура испарения которых ниже температуры сварки.

Жидкая среда (например, расплавленная соль) может являться поверхностно-активной и тем самым способствовать развитию пластической деформации соединяемых деталей при ДС. Однако, влияние её менее существенно. Если бы расплавленная соль оказывала существенное влияние как поверхностно активное вещество, то при ДС в расплавленных солях прочность сварных соединений должна быть выше, чем, например, при сварке на воздухе во всех случаях независимо от состава вещества, находящегося в зоне контакта.

Таким образом, влияние окружающей среды на формирование и качество сварного соединения проявляется прежде всего в ее способности поглощать часть находящихся в зоне соединения газов.

## Влияние окисных пленок

При нагреве перед ДС происходят физико-химические процессы, обусловленные взаимодействием поверхности нагреваемого материала с окружающей средой и весьма влияющие на формирование сварного соединения: диссоциация, возгонка, восстановление, растворение окислов в свариваемом материале.

Наиболее вероятным процессом удаления окисных пленок с контактных поверхностей является растворение их в соединяемых материалах при сварке.

При ДС в жидких средах скорость растворения окисных пленок является лимитирующим фактором и наряду с процессом смятия микронеровностей определяет зависимость прочности сварного соединения от длительности процесса [15].

Исследование влияния окисных пленок на качество сварных соединений проводили на образцах диаметром 12—16 мм. Сварку осуществляли в расплавленных солях (70%  $\text{BaCl}_2 + 30\% \text{KCl}$ ) при 750—950°C и в хлористом барии при температурах выше 1000°C.

Свариваемые поверхности обрабатывали на токарном станке или зачищали на шлифовальной бумаге. Необходимую толщину окислов на соединяемых поверхностях достигали длительным (до полутора-двух лет) вылеживанием образцов или нагревом их на воздухе при различных температурах и длительностях.

Толщину окисной пленки, образовавшейся на образцах, оценивали на основании известных литературных данных по окислению металлов.

На рис. 3 показаны зависимости прочности сварных соединений от длительности пребывания образцов на воздухе ( $t_0$ ) перед ДС в жидкой среде  $\text{BaCl}_2$  ( $t_{\text{св}} = 1050^\circ\text{C}$ ,  $p = 1,7 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\tau_{\text{св}} = 5 \text{ мин}$ ,  $\text{Ш}_{\text{св.п.}}$  соответствует 5-му классу). Аналогичные зависимости представлены на рис. 4. Анализ показывает, что длительное пребывание соединяемых материалов при комнатной температуре на воздухе перед сваркой влияет на прочность сварного соединения, однако в ряде случаев не приводит к резкому ее уменьшению. В частности, пребывание образцов из углеродистых сталей в течение 9 мес на воздухе в большинстве случаев не оказывает отрицательного влияния на прочность сварного соединения (см. рис. 3).

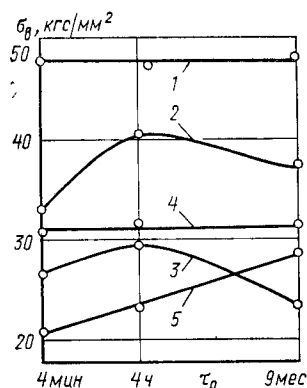


Рис. 3. Зависимость прочности сварных соединений от длительности пребывания образцов на воздухе перед ДС: 1 — сталь У12+сталь У12; 2 — сталь 45+сталь 45; 3 — сталь Э+сталь Э; 4 — сталь У12+сталь Э; 5 — сталь 45+сталь Э

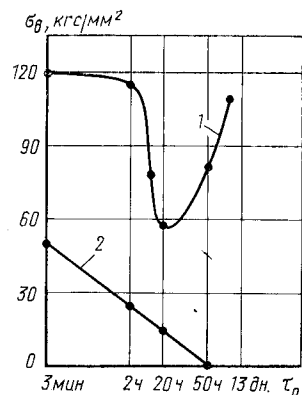


Рис. 4. Зависимость прочности сварных соединений от длительности пребывания образцов на воздухе перед ДС:

Кривая	Свариваемые стали	Ш <sub>св.п</sub> класс	$\rho$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$t_{св}$ , °C	$\tau_{св}$ , мин
1	50ХГА+50ХГА	8	1,9	1000	5
2	35ХГСА+35ХГСА	5	1,7	1150	4

Пребывание образцов из стали 50ХГА на воздухе перед сваркой в течение нескольких дней незначительно влияет на прочность сварных соединений (исключение составляет выдержка на воздухе в течение 20 ч). Увеличение длительности пребывания на воздухе образцов из стали 35ХГСА приводит к уменьшению прочности сварных соединений; после пребывания образцов на воздухе в течение 50 ч сварное соединение не образуется.

Интересные результаты получены при ДС в расплаве солей 70% BaCl<sub>2</sub>+30% KCl различных сталей, соединяемые поверхности которых были предварительно окислены при 100—400°C. Увеличение толщины окисного слоя на соединяемых поверхностях не только не снижает прочности сварных соединений, но и в ряде случаев даже значительно увеличивает ее (рис. 5). Максимальную прочность имеют сварные соединения из сталей, контактные поверхности которых были предварительно окислены при определенных температуре и выдержке. В частности, оптимальная температура окисления для

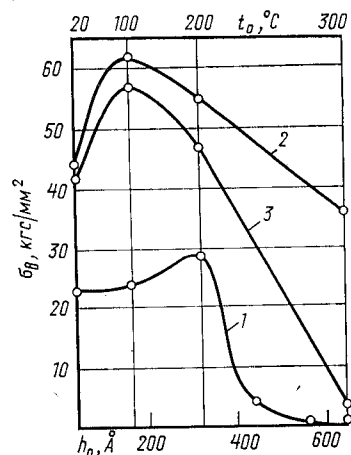


Рис. 5. Влияние суммарной толщины окисной пленки на прочность сварных соединений при  $t_{св}=750^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{св}=5$  мин,  $\tau_0=30$  мин:

Кривая	Свариваемые материалы	Ш <sub>св.п</sub> класс	$\rho_{св}$ , кгс/мм <sup>2</sup>
1	Сталь Э+сталь Э	6	3,5
2	Сталь 45+сталь 45	8	5,2
3	Сталь У12+сталь У12	8	5,2

Рис. 6. Влияние длительности предварительного окисления на прочность сварных соединений ( $\tau_{св}=5$  мин):

Кривая	Свариваемые материалы	Ш <sub>св.п</sub> класс	$t_0$ , °C	Среда	$t_{св}$ , °C	$\rho$ , кгс/мм <sup>2</sup>
а	Сталь Э+сталь Э	5—6	200	70% BaCl <sub>2</sub> +30% KCl	750	3,5
б	Сталь 50ХГА+Сталь 50ХГА	8	100	BaCl <sub>2</sub>	1000	1,9

стали Э составляет 200°C, для сталей 45, У8, У12 и 50ХГА ~100°C, причем сварные соединения имеют максимальную прочность при определенных значениях длительности окисления. Результаты механических испытаний (рис. 6,а,б) указывают на сложный характер зависимости прочности сварных соединений от длительности предварительного окисления. Представляет интерес наличие минимума прочности при определенной длительности окисления. Для сварных соединений из стали Э минимум прочности наблюдается в случае окисления образцов при 200°C в течение 6 мин (рис. 6,а), а из стали 50ХГА — при 100°C в течение 20 мин.

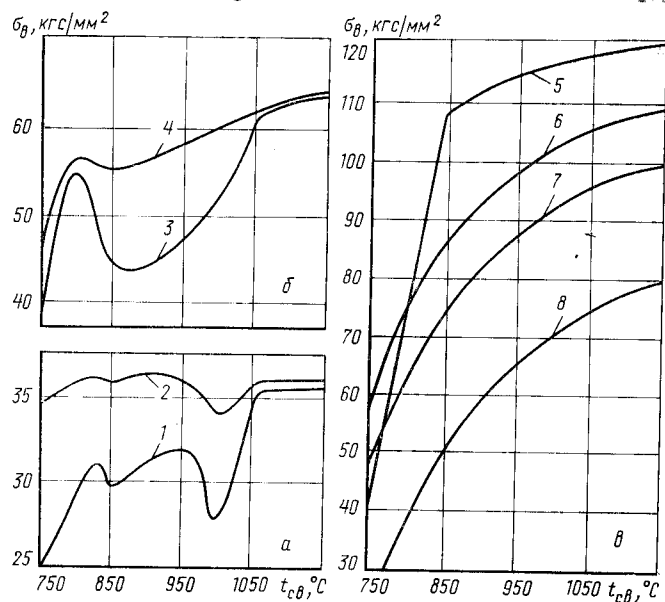


Рис. 7. Зависимость прочности соединений от температуры ДС в расплавленной соли ( $\tau_{св}=5$  мин):  
 а — сталь Э+сталь Э (осадка 3—5%): 1 —  $t_0=20^\circ\text{C}$ ,  $\tau_0=3$  мин; 2 —  $t_0=200^\circ\text{C}$ ,  $\tau_0=20$  мин;  
 б — сталь 45+сталь 45 (осадка 2%): 3 —  $t_0=20^\circ\text{C}$ ,  $\tau_0=3$  мин; 4 —  $t_0=110^\circ\text{C}$ ,  $\tau_0=30$  мин;  
 в — сталь У12+сталь У12 (осадка 10%): 5 —  $t_0=20^\circ\text{C}$ ,  $\tau_0=5$  мин; 6 —  $t_0=100^\circ\text{C}$ ; 7 —  $t_0=200^\circ\text{C}$ ; 8 —  $t_0=300^\circ\text{C}$ ,  $\tau_0=30$  мин (б—в)

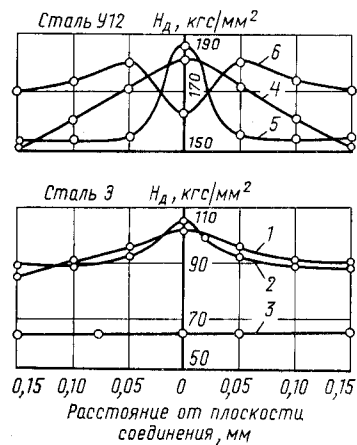


Рис. 8. Распределение микротвердости в зоне сварных соединений ( $\tau_{св}=5$  мин):

Кривая	$t_0, ^\circ\text{C}$	$\tau_0$ , мин	$t_{св}, ^\circ\text{C}$	$p$ , кгс/мм <sup>2</sup>
1	200	30	850	2,3
2	200	30	750	3,5
3	200	30	1050	1,2
4	20	2	1050	1,2
5	100	30	1050	1,2
6	300	30	1050	1,2

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что в результате предварительного окисления углеродистых сталей прочность соединений, полученных при температуре сварки  $750^\circ\text{C}$ , увеличивается. При более высоких температурах сварки этот эффект наблюдается только для соединений из сталей, содержащих до  $\sim 0,6\%$  С (рис. 7, а—в). Суммарная толщина окисного слоя на соединяемых поверхностях может составлять  $100\text{--}700 \text{ \AA}$ .

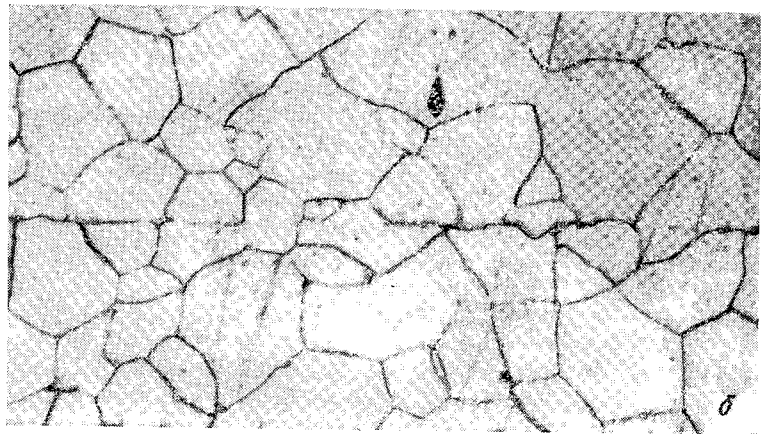
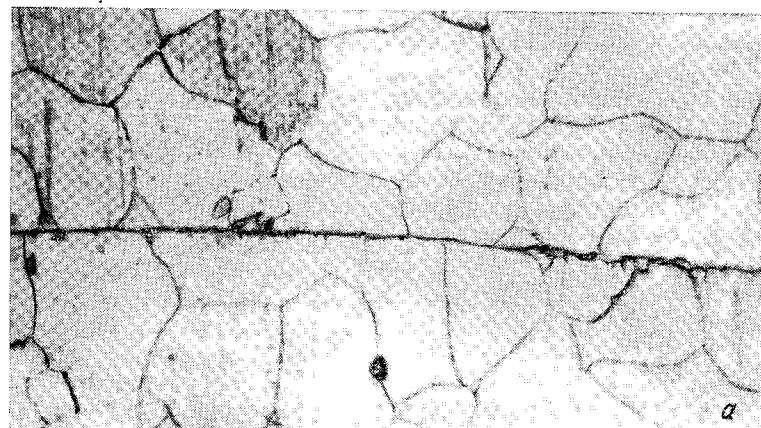


Рис. 9. Структура околошовной зоны соединений из стали Э, полученных ДС в расплавленных солях ( $t_{св}=1150^\circ\text{C}$ ,  $p=1$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\tau_{св}=4$  мин):  
 а —  $t_0=20^\circ\text{C}$ ,  $\tau_0=5$  мин; б —  $t_0=200^\circ\text{C}$ ,  $\tau_0=20$  мин.  $\times 450$

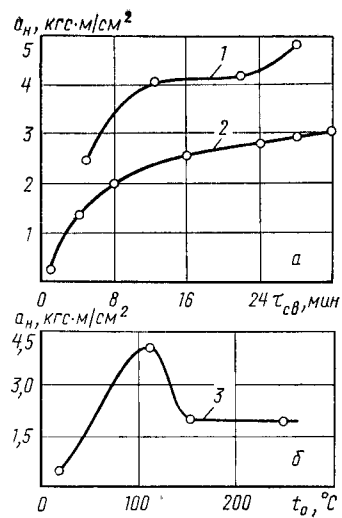


Рис. 10. Влияние длительности сварки (а) и температуры окисления перед сваркой (б) на ударную вязкость соединений из стали Ст3 ( $t_{св} = 800^\circ\text{C}$ ,  $p = 2$  кгс/мм<sup>2</sup>). Среда: 1 — 70% BaCl<sub>2</sub> + 30% KCl; 2 — вакуум 10<sup>-4</sup> мм рт. ст.; 3 — 70% BaCl<sub>2</sub> + KCl,  $\tau_{св} = 12$  мин

на на воздухе при температурах от 20 до 250°C. В случае предварительного окисления контактных поверхностей при 110°C ударная вязкость существенно повышается. В ряде случаев ДС в расплавленных солях с предварительным окислением контактных поверхностей можно получать сварные соединения, превосходящие по ударной вязкости аналогичные соединения, полученные в вакууме [16].

Следует отметить, что на некоторое повышение механических свойств (в том числе и ударной вязкости) при ДС в вакууме предварительно окисленных образцов указано в работе [17]. Было установлено, что ударная вязкость сварного соединения из стали Ст3, предварительно окисленной при 400°C, оказалась несколько выше, чем соединений из той же стали с естественной окисной пленкой на контактной поверхности (табл. 3).

Увеличение толщины окисной пленки при сварке алюминия, меди, титана [18], разнородных материалов (например, алюминия с углеродистой и нержавеющей сталью) также приводит к повышению прочности соединения (по крайней мере прочность не уменьшается). При

Присутствие растворенного кислорода в зоне соединения хорошо выявляется измерением микротвердости (рис. 8). При сварке через окисные пленки на отдельных участках зоны соединения образуются общие зерна. Это подтверждается видом микроструктуры зоны соединения образцов из стали Э, соединяемые поверхности которых были предварительно окислены при различных температурах (рис. 9).

Влияние окисных пленок на ударную вязкость сварных соединений показано на рис. 10. Контактная поверхность одного образца из стали Ст3 перед сваркой была окисле-

этом положительный эффект от предварительного окисления соединяемых поверхностей наблюдается при ДС в вакууме, в жидких средах, а также на воздухе.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что влияние окисных пленок на прочность и пластичность сварных соединений имеет более сложный характер, чем принято считать. Есть материалы (углеродистые стали, алюминий, медь и их сплавы), которые лучше свариваются при наличии на их поверхностях окисных пленок определенной толщины. Объяснить это явление можно на основе анализа процессов возникновения и разрушения окисной пленки, исходя из общей термодинамической теории фазовых превращений в поликристаллическом материале.

Согласно этой теории продолжительность растворения окисной пленки в металле зависит от объема оксидной фазы, ориентационного расположения и размерного соответствия кристаллических решеток окисла и металла, строения границы раздела окисла и металла.

Влияние объема оксидной фазы при диффузионной сварке (толщины окисной пленки) на длительность растворения очевидно: чем больше толщина окисла, тем больше длительность его растворения в металле при прочих равных условиях.

Поверхность раздела между окислом и металлом создает определенный энергетический барьер, следовательно, необходима дополнительная энергия активации для диффузии атомов кислорода из окисла в металл. Это приводит к увеличению длительности растворения.

Таблица 3

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ Ст3 [17]

Контактные поверхности	$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_T$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$a_n$ , кгс·м/см <sup>2</sup>
Без предварительного окисления	32—41/37	20—23/21	4—31/14	0—62/21	2,5—3,8/3,1
Предварительно окисленные*	36—41/39	21—24/23	6—32/16	3—67/23	2,3—5,7/4,0

Примечание. Режим сварки:  $t_{св} = 1020^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{св} = 10$  мин,  $p = 1,5$  кгс/мм<sup>2</sup>.

\* Толщина окисной пленки ~ 600 Å.

При благоприятной ориентации кристаллических решеток окисла и металла возможно уменьшение энергии межфазной границы до определенного предела, даже если межфазная граница между металлом и окислом некогерентна. Максимальное снижение поверхностной энергии может быть достигнуто при максимальном сходстве в расположении атомов на соприкасающихся гранях кристаллов металла и окисла. В этом случае плавный переход структуры окисла в структуру металла обеспечивает закономерную ориентацию обеих кристаллических решеток (принцип С. Т. Конобеевского и П. Д. Данкова).

Поэтому наиболее благоприятное условие для ускоренного растворения окисной пленки в металле — существование окисной пленки в метастабильном состоянии со структурой, близкой к структуре металла, при наличии когерентной границы между окисной пленкой и металлом.

Это условие может быть решающим при растворении окисной пленки, так как доля поверхностной энергии в общей свободной энергии фазового превращения весьма значительна, особенно при относительно малых толщинах окисных пленок (суммарная толщина окисных пленок в зоне соединения не превышает 500—1000 Å). В ряде случаев снижение поверхностной энергии при появлении более толстой, но когерентной окисной пленки может перекрывать проигрыш в объемной свободной энергии вследствие увеличения толщины окисла и возрастания упругой энергии, связанной с созданием когерентной или полукogerентной границы.

По-видимому, этим объясняются приведенные результаты экспериментальных исследований, свидетельствующие об аномальном характере влияния толщины окисной пленки на образование сварного соединения.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что положительное влияние предварительного окисления на процесс образования сварного соединения является следствием благоприятного строения образующегося окисного слоя и возникновения когерентной или полукogerентной границы между кристаллическими решетками окисла и металла.

Эти факторы, способствуют быстрому растворению находящейся в зоне контактирования окисной пленки в соединяемых металлах.

В случае, если процесс формирования сварного соединения контролируется скоростью растворения окисной пленки, а не смятием микронеровностей контактирующих поверхностей, возникновение когерентной окисной пленки может способствовать образованию общих зерен в зоне сварки и, следовательно, высокой пластичности сварных соединений.

Это явление можно также связать с особенностями кристаллизации окисла между контактирующими поверхностями в процессе ДС. Кристаллизация окисла начинается на свариваемых поверхностях. Если на них возникают когерентные окисные пленки, то при контактировании в процессе сварки возможно образование общей окисной пленки, которая одновременно будет иметь когерентную межфазную границу с обеими соединяемыми решетками металлов.

При соединении зерен металлов, кристаллические решетки которых различно ориентированы, между ними образуется окисидная фаза, которая создает плавный переход от одной кристаллической решетки к другой. Поэтому после ухода кислорода из оксидной фазы граница раздела полностью исчезает ввиду того, что кристаллические решетки окисла и металла минимально различались по размерам и расположению атомов.

Таким образом, при подготовке контактных поверхностей деталей под ДС в жидких средах следует стремиться не только к уменьшению толщины окисла, но также к созданию условий, при которых возможно образование когерентной окисной пленки.

Ориентационная кристаллизация окислов, возникающих на металлической поверхности, — распространенное явление [19—26]. Экспериментальные данные показывают, что тонкие (толщиной до 500 Å) окисные пленки железа, меди, никеля и ряда других металлов вырастают эпитаксиально на кристаллических решетках уже при 20°C на воздухе. Однако полная кристаллизация окисной пленки наступает при более высокой температуре. Например, FeO полностью кристаллизуется при 130—150°C [21]. Окисная пленка алюминия, аморфная при 20°C, начинает кристаллизоваться при 200°C и становится полностью кристаллической при ~400°C.

Возможность появления ориентированного окисного слоя определяется скоростью его роста, которая зависит от температуры окисления, структуры приповерхности

стного слоя металла, количества газа над поверхностью, толщины слоя окисла. До настоящего времени не существует единой теории, удовлетворительно объясняющей это явление.

Сложнее определить оптимальные условия возникновения поверхностной окисной пленки, стимулирующей процесс образования соединения материалов при различных способах ДС. Это вызвано тем, что при формировании сварного соединения действуют дополнительные факторы: сварочное давление, вызывающее пластическую деформацию контактирующих слоев металла и выход дислокаций на поверхность; изменение количества и состава газа в зоне соединения вследствие растворения газа в приповерхностных слоях металла и поглощения его окружающей средой; фазовые превращения в материале и в окисной пленке при нагреве до температуры сварки и др.

Приведенные экспериментальные данные и их анализ, безусловно, далеко не исчерпывают рассматриваемую проблему, которая требует дальнейшего систематического изучения. Можно, однако, отметить, что оптимальные температуры окисления на воздухе контактных поверхностей 100—400°C для железа, стали, меди и их сплавов и 300—400°C для алюминия. Окислением при пониженных давлениях кислорода можно получать эпитаксиальные пленки при более высоких температурах.

Положительное влияние окисных пленок на процесс образования сварного соединения некоторых материалов открывает новые пути усовершенствования технологии сварки давлением<sup>1</sup>.

### **Влияние природы вещества, находящегося в зоне соединения**

В реальных условиях ДС состав газа, находящегося между микронеровностями контактных поверхностей, может быть весьма разнообразным.

Обычно на соединяемых поверхностях наряду с окисными имеются также масляные и жировые пленки, которые при нагреве металла до температуры сварки могут испаряться.

Масла и жиры — органические кислоты, состоящие главным образом из углерода, водорода и кислорода. Разлагаясь при испарении, они образуют газообразную среду сложного состава, компонентами которой являются различные углеводородные соединения, окись и двуокись углерода, пары воды. Если поверхности перед сваркой обезжирены, то в зоне соединения присутствуют газы.

В целях интенсификации образования сварного соединения на контактные поверхности могут быть нанесены различные соли, кислоты или другие неорганические вещества, которые при комнатной температуре находятся в твердом или в жидком состоянии. При нагреве до температуры сварки они образуют газообразные хлориды, фториды, гидриды и другие соединения.

Присутствующий в зоне соединения газ в зависимости от химического состава может взаимодействовать как с поверхностной окисной пленкой, восстанавливая ее, так и со свариваемыми металлами, образуя летучие или твердые продукты реакции. В некоторых случаях возможно также дополнительное окисление соединяемых поверхностей. Наличие газа может также создавать условия для транспортного переноса атомов металла с одной соединяемой поверхности на другую. Многообразие и специфика возможных реакций газов с контактными поверхностями существенно затрудняют анализ взаимодействия свариваемых материалов.

Наиболее вероятным процессом при ДС в рассматриваемых условиях является восстановление окисной пленки находящимися в зоне соединения газами.

Возможными восстановителями окислов могут быть прежде всего водород, окись углерода, углеводороды, хлор, фтор, хлористый водород, борсодержащие соединения.

Газы-восстановители образуются в зоне соединения в результате термического разложения различных органических соединений, хлористого и фтористого аммония и других веществ.

Взаимодействие между газом и окисной пленкой при ДС в жидкой среде имеет свои специфические особенности, связанные с влиянием окружающей среды.

В первый момент при нагреве свариваемых материалов окружающая среда может поглощать часть газов и газообразных продуктов реакции из зоны соединения.

<sup>1</sup> Финкельштейн М. Л. Авт. свид. № 282038. — «Открытия. Изобрет. Пром. образцы. Товарные знаки», 1977, № 7, с. 206.



Затем, когда микронеровности значительно смяты, реакция происходит в замкнутом объеме, и непрореагировавшие газы вместе с продуктами реакции остаются в зоне соединения и, очевидно, растворяются в приповерхностных слоях свариваемых материалов.

Находящееся в зоне соединения вещество вначале реагирует с поверхностной окисной пленкой. Если реакция восстановления идет быстрее, чем происходит смятие микронеровностей, то во взаимодействие вступают поверхностные слои металла, свободные от окисных пленок. Поскольку протекающие химические реакции обратимы и отвод продуктов реакции из зоны соединения для рассматриваемых условий ДС ограничен, то на контактных поверхностях всегда остается слой продуктов реакции, через который и происходит дальнейшее взаимодействие между материалами. Состав возникшего на соединяемой поверхности слоя продуктов реакции может быть отличным от состава окисных пленок. Длительность формирования сварного соединения при ДС в жидких средах определяется скоростью растворения окисной пленки [15]. Если на контактной поверхности находится слой других продуктов реакции, то скорость его растворения может лимитировать образование сварного соединения. Это справедливо в том случае, если скорость диффузии атомов из слоя в металл мала, а длительность распада вновь возникшей на соединяемой поверхности фазы больше, чем длительность смятия микронеровностей.

Специально нанесенное на контактные поверхности вещество может восстанавливать поверхностную окисную пленку и образовывать пограничный слой, обладающий большей способностью к растворению в соединяемых металлах, чем первоначально существовавший слой окислов. Это особенно важно для случая, когда образовавшаяся на контактной поверхности окисная пленка имеет неблагоприятное кристаллическое строение.

Кроме того, в ходе реакции восстановления окислов металла уменьшается толщина окисной пленки, несмотря на то, что продукты реакции из зоны соединения полностью не удаляются и вновь конденсируются на контактных поверхностях.

Нанесенное вещество, растворяясь в металле, может существенно изменять химический состав и структуру приповерхностных слоев и тем самым при благоприят-

ных условиях повышать механические свойства зоны соединения. Таким веществом при сварке малоуглеродистой стали может быть углерод, а при сварке других материалов — соли тяжелых металлов.

Присутствие на контактных поверхностях углерода и солей тяжелых металлов может изменить химический состав и структуру зоны соединения в результате их взаимодействия со свариваемыми материалами.

Одна из основных опасностей использования при диффузионной сварке солей металлов (прежде всего хлоридов) состоит в том, что в зоне контакта могут образоваться или остаться вещества, ухудшающие механические свойства (в первую очередь пластичность), а также коррозионную стойкость сварных соединений.

И, наконец, введение в зону сварки вещества, находящегося при комнатной температуре в жидком состоянии, способствует вытеснению воздуха и тем самым стабилизирует химический состав газовой среды в зоне соединения. Если жидкое вещество — бескислородное соединение, то его введение предотвращает дополнительное окисление контактирующих поверхностей при сварке.

Исследованиями не выявлено особых преимуществ от использования химически активных веществ на основе хлористых и фтористых соединений (хлористого и фтористого аммония, смеси хлористых и фтористых солей) при сварке сталей различного химического состава, сплавов меди, титана, никеля и алюминия. Присутствие в зоне соединения среднеуглеродистых сталей хлористого аммония приводит, например, к значительному обезуглероживанию соединяемых поверхностей (рис. 11) и, как следствие, к низкой прочности сварного соединения.

При введении в зону сварки хлористых или фтористых веществ коррозионная стойкость сварных соединений оказывается низкой: уже через несколько суток после сварки в зоне соединения появляются следы коррозии.

Определенный интерес для ДС в жидкой среде представляют углеводородные соединения типа вазелина, глицерина, триэтанолamina, эпоксидной смолы.

Нанесение этих веществ на контактные поверхности перед сваркой изменяет газовый состав в зоне соединения, приводит к вытеснению воздуха и в ряде случаев стабилизирует свойства сварного соединения.

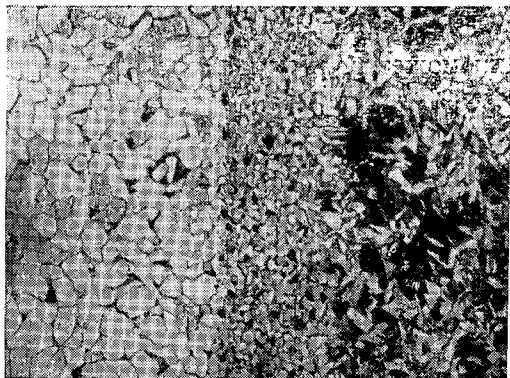


Рис. 11. Структура соединения стали 45 со сталью Э, полученного ДС в расплаве  $\text{BaCl}_2$  ( $t_{\text{св}}=1050^\circ\text{C}$ ,  $p=1,2 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $t_{\text{св}}=12 \text{ мин}$ , флюс —  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ).  $\times 115$

При грубой обработке контактных поверхностей присутствие углеводородных веществ ускоряет образование качественных сварных соединений из стали, алюминия, сплавов меди и никеля.

Применение вазелина целесообразно при сварке нержавеющей сталей ЭИ395, Х15Н9Ю, 3Х12Н2МФ, алюминия, алюминия со сталью и титановыми сплавами.

При сварке среднеуглеродистых сталей 50ХГА, 50ХФА, 40Х, 35ХГСА и быстрорежущих сталей желательно создание в зоне соединения слабоокислительной, но науглероживающей или, по крайней мере, нейтральной к углероду атмосферы. В этом случае целесообразно на контактные поверхности наносить кислородсодержащие органические соединения типа глицерина, триэтанолamina или эпоксидной смолы. На рис. 12, а, б приведены микроструктуры и микротвердость сварных соединений стали 35ХГСА, полученных с предварительным нанесением на контактные поверхности слоя вазелина (бескислородное углеводородное соединение) и слоя глицерина (углеводородное соединение, содержащее 52% кислорода). При наличии вазелина весьма заметно обезуглероживание приконтактных объемов металлов. Однородная структура получается, если в зоне контакта есть глицерин (рис. 12, б).

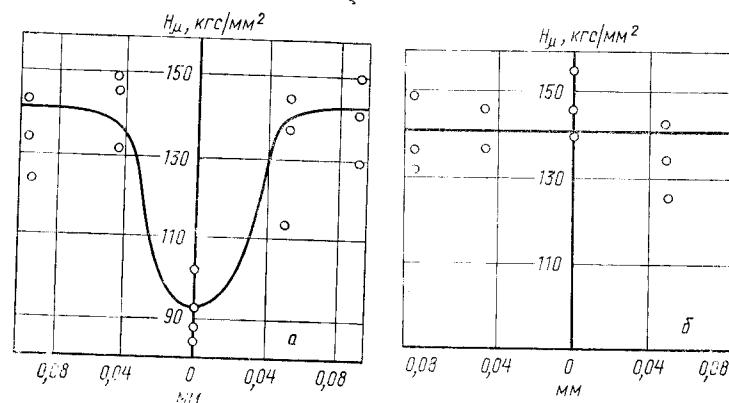
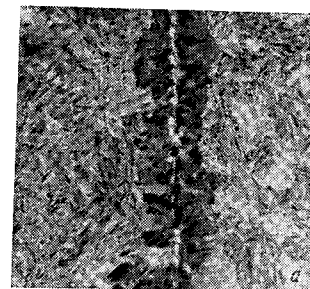


Рис. 12. Структура ( $\times 225$ ) и микротвердость зоны соединения стали 35ХГСА со сталью 35ХГСА при ДС в расплаве  $\text{BaCl}_2$  ( $t_{\text{св}}=1050^\circ\text{C}$ ): а —  $p=2,3 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $t_{\text{св}}=4 \text{ мин}$ ; б —  $p=1,7 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $t_{\text{св}}=16 \text{ мин}$ . В зоне сварки: а — вазелин, б — глицерин

При ДС чугуна и стали У12 со сталью Э в расплаве солей присутствие на контактных поверхностях масла, жира или другого подобного вещества сказывается незначительно, о чем свидетельствуют механические свойства сварных соединений (табл. 4).

О различном влиянии химического состава углеводородного вещества на прочность сварных соединений можно судить также по данным, приведенным в табл. 5.

Таблица 4

ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ У12  
И ЧУГУНА СЧ18-36 СО СТАЛЬЮ Э, ПОЛУЧЕННЫХ ДС\*  
В РАСПЛАВЛЕННЫХ СОЛЯХ

Вещество в зоне соедине- ния	$t_{\text{св}}, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кгс/мм}^2$	$\sigma_{\text{в}}, \text{кгс/мм}^2$
<i>Сталь У12+сталь Э</i>			
Рыбий жир . . . . .	1050	1,2	30,0
Тавот . . . . .	1050	1,2	29,0
Вазелин . . . . .	1050	1,2	29,5
Глицерин . . . . .	1050	1,2	29,0
Клей БФ-2 . . . . .	1050	1,2	31,0
Рыбий жир . . . . .	850	1,7	29,5
Тавот . . . . .	850	1,7	28,5
Вазелин . . . . .	850	1,7	29,0
Глицерин . . . . .	850	1,7	28,0
Эпоксидный клей . . . . .	850	1,7	29,0
<i>Чугун СЧ18-36+сталь Э</i>			
Тавот . . . . .	1000	1,0	18,0**
Глицерин . . . . .	1000	1,0	17,9**
Вазелин . . . . .	1000	1,0	18,0**
Рыбий жир . . . . .	1000	1,0	18,1**

\*  $\tau_{\text{св}} = 5$  мин.

\*\* Разрушение происходило по чугуну.

Таблица 5

ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДС В  $\text{BaCl}_2$ 

Свариваемые материалы	В пр. пов	$t_{\text{св}}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{св}}, \text{мин}$	$p, \text{кгс/мм}^2$	$\sigma_{\text{в}}, \text{кгс/мм}^2$
Сталь 35ХГСА+ +сталь 35ХГСА	На возду- хе	1050	16	1,2	(12÷20)/16
	Глицерин	1050	16	1,2	(46÷52)/50
	Эпоксид- ный клей	1050	16	1,2	(38÷45)/41
	Глицерин	1050	4	2,3	(55÷62)/58
	Рыбий жир	1050	4	2,3	(60÷65)/62
	Вазелин	1050	4	2,3	~ 0
Сталь Х17Н2+сталь Х17Н2	Глицерин	1150	4	2,5	(70÷78)/76
	Вазелин	1150	4	2,5	(36÷42)/40
Сталь 3Х12Н2МФ+ +сталь 3Х12Н2МФ	Глицерин	1150	4	2,5	(25÷35)/30
	Вазелин	1130	4	2,5	(85÷95)/90
Сплав 44НХТЮ+ +сплав 44НХТЮ	Вазелин	1150	12	2,0	(42÷50)/45
	Глицерин	1150	12	2,0	(60÷65)/63

Примечание. В пр. пов — вещество, под слоем которого производилась проточка свариваемых поверхностей.

## Влияние исходной структуры свариваемых материалов

Исходная структура соединяемых материалов существенно влияет на процесс образования сварного соединения при ДС в жидких средах.

Данные рис. 13, а—г иллюстрируют характер влияния наклепа на прочность сварных соединений стали и меди. Образцы перед сваркой отжигали, а затем при комнатной температуре подвергали одноосному сжатию в направлении, перпендикулярном соединяемой поверхности.

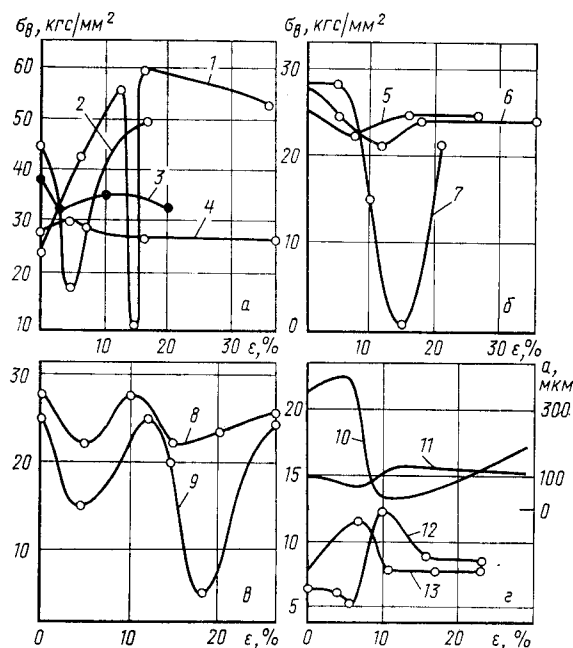


Рис. 13. Влияние предварительной холодной деформации  $\epsilon, \%$  на величину зерна  $a$  (кривые 10, 11) и на прочность соединений, полученных ДС в среде 70%  $\text{BaCl}_2 + 30\% \text{KCl}$  при  $t_{\text{св}} = 850^\circ\text{C}$  (1—9),  $t_{\text{св}} = 820^\circ\text{C}$  (11, 13)  $\text{BaCl}_2$  при  $t_{\text{св}} = 1000^\circ\text{C}$  (10, 12), и  $\tau_{\text{св}} = 5$  мин:  
а — сталь У12+сталь У12 (1), сталь 45+сталь 45 (2), сталь Э+сталь Э (отожженная) (3), сталь Э+сталь Э (калиброванная) (4), осадка — 2%.  
б — сталь У12+сталь Э; до сварки деформировались: сталь Э (5, 6), сталь У12 (7);  $p = 1,7 \text{ кгс/мм}^2$  (5),  $p = 1,2 \text{ кгс/мм}^2$  (6, 7).  
в — сталь У12+сталь Э; до сварки деформировались обе стали;  $p = 1,2 \text{ кгс/мм}^2$  (8),  $p = 1,7 \text{ кгс/мм}^2$  (9).  
г — медь М1+медь М1, осадка 5%.

Соединяемые поверхности образцов зачищали на шлифовальной бумаге (кривые 1—4; 6—8) до и после деформации и обезжиривали ацетоном за 3—5 мин до сварки. В некоторых опытах после деформации поверхности образцов протачивали на токарном станке под слоем вазелина (кривые 5, 9) или без применения смазки (кривые 12, 13) — в этом случае с поверхности удаляли слой 0,1—0,2 мм.

Эксперименты показывают, что предварительная пластическая деформация соединяемых материалов в различной степени влияет на прочность сварного соединения сталей с различным содержанием в них углерода.

При сварке предварительно отожженных образцов из стали Э прочность сварных соединений на 15—20% выше (кривая 3), чем при сварке образцов из той же стали, подвергнутых предварительной пластической деформации (рис. 13, кривая 4).

Отрицательное влияние предварительной пластической деформации проявляется также при сварке сталей с более высоким содержанием углерода. Однако у этих материалов снижение прочности сварных соединений наблюдается при определенной степени пластической деформации. Наименее прочны сварные соединения из стали 45, предварительно пластически деформированной на ~6%. Для сварных соединений из стали У12 минимум прочности наблюдается при деформации ~16%. При других степенях деформации наблюдается повышение прочности сварных соединений по сравнению с исходным, причем с увеличением степени деформации прочность сварных соединений увеличивается до некоторого значения, а затем остается постоянной.

Данные, представленные на рис. 13,б, показывают, что деформация только стали Э (кривые 5, 6) или стали У12 (кривая 7) приводит к снижению прочности сварных соединений сталь Э+сталь У12 в том случае, если степень предварительной деформации составляет 5—7% для стали Э или 16% для стали У12. Предварительная деформация соединяемых материалов приводит к появлению на графике зависимости прочности сварного соединения от степени деформации двух минимумов, причем опять же при ~5% для стали Э и ~16% для стали У12 (рис. 13,в). Минимальные значения прочности сварных соединений сталь У12+сталь Э при указанных

степенях деформации обнаруживаются независимо от того, были ли в зоне соединения воздух или углеводородные соединения (рис. 13,б,в).

Отрицательное влияние предварительной деформации при некоторых ее значениях на прочность сварного соединения можно объяснить многими причинами. Одной из них является усиленный рост зерна при нагреве под сварку материалов, предварительно подвергнутых деформации с критической степенью. Данные, представленные на рис. 13,г, подтверждают этот вывод. Поэтому не следует осуществлять ДС в жидкой среде материалов, степень предварительной деформации которых близка к критической.

Влияние исходной структуры материала, полученной предварительной термической обработкой, на прочность сварных соединений изучали при ДС углеродистых и среднелегированных сталей. Исследуемые образцы перед сваркой подвергали термической обработке по различным режимам: отжигу, нормализации, закалке с последующим отпуском при различных температурах. За 2—5 мин до сварки контактные поверхности образцов

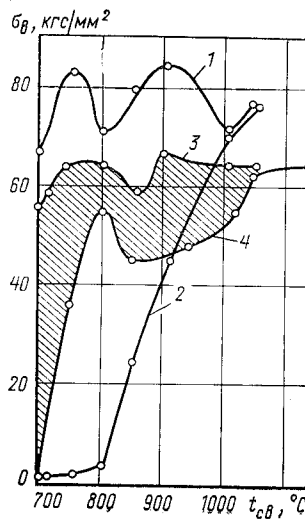


Рис. 14. Влияние температуры ДС в расплавленной соли на прочность сварных соединений сталь У12+сталь У12 (1, 2) и сталь 45+сталь 45 (3, 4) ( $t_{св}$  = 5 мин, осадка 1—3%) в зависимости от предварительной термической обработки свариваемых материалов: закалки (1, 3) и отжига (2, 4)

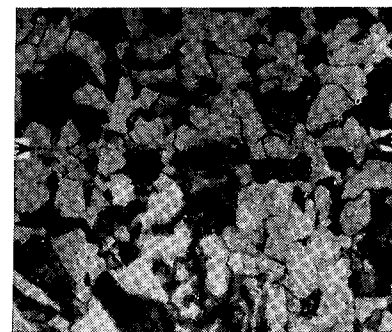


Рис. 15. Структура соединения, полученного ДС предварительно закаленных образцов из стали 45 ( $\sigma_B$  = 67 кгс/мм²,  $\delta$  = 12,5%) в среде 70% BaCl<sub>2</sub>+30% KCl ( $t_{св}$  = 750°C,  $p$  = 2,3 кгс/мм²,  $t_{св}$  = 5 мин) ×450

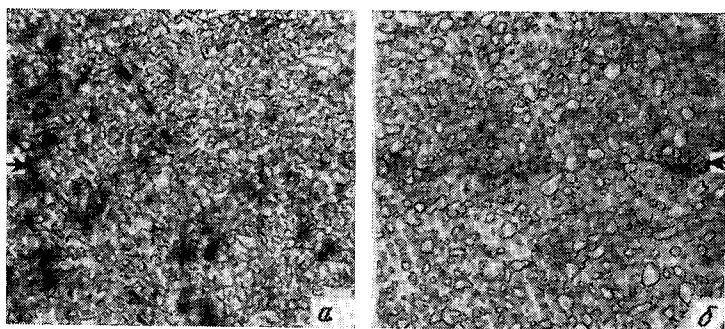


Рис. 16. Структура соединений из стали У12, полученных ДС в среде 70%  $\text{BaCl}_2 + 30\% \text{KCl}$  ( $t_{\text{св}} = 750^\circ\text{C}$ ,  $p = 3,3$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\tau_{\text{св}} = 5$  мин).  $\times 450$ . Образцы перед сваркой подвергали: а — закалке ( $\sigma_B = 86$  кгс/мм<sup>2</sup>); б — отжигу ( $\sigma_B \approx 0$ )

подвергали чистовому точению или шлифовке и обезжиривали ацетоном.

На рис. 14 показаны зависимости прочности сварных соединений сталей 45 и У12 от температуры сварки при  $p = 2$  кгс/мм<sup>2</sup> и  $\tau_{\text{св}} = 5$  мин. Сварные образцы предварительно подвергали закалке или отжигу. Термическая обработка существенно влияет на характер изменения прочности сварных соединений. Прочность сварных соединений, полученных ДС при одинаковых режимах, может отличаться в 50—80 раз в зависимости от структуры материала перед сваркой. Особенно резко различие в прочности сварных соединений проявляется при невысоких (700—800°C) температурах сварки.

Существенно отличаются также и структуры зон сварных соединений. Граница раздела в зоне соединения не обнаруживается при сварке предварительно закаленных с  $t = 750^\circ\text{C}$  в воде образцов (рис. 15, 16, а) и легко выявляется при сварке отожженных образцов (рис. 16, б).

Влияние структуры материалов на их свариваемость можно выявить на основании изучения особенностей кинетики образования соединения (в первую очередь характера изменения прочности и степени деформации ползуности образцов при сварке). На рис. 17 приведены кинетические зависимости прочности сварных соединений и развития пластической деформации при сварке нормализованных и закаленных образцов из стали 50.

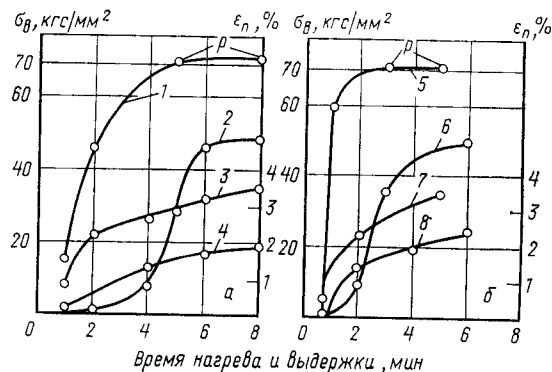


Рис. 17. Кинетика роста прочности соединений из стали 50 (1, 2, 5, 6) и пластической деформации (3, 4, 7, 8) при ДС в среде 70%  $\text{BaCl}_2 + 30\% \text{KCl}$  ( $p = 3,7$  кгс/мм<sup>2</sup>). Образцы предварительно подвергали закалке (1, 3, 5, 7) или нормализации (2, 4, 6, 8). В точках р — разрушение по основному материалу; а —  $t_{\text{св}} = 800^\circ\text{C}$ ; б —  $t_{\text{св}} = 850^\circ\text{C}$

Зависимости относительного удлинения сварных соединений образцов из предварительно нормализованной и закаленной стали 50 от времени сварки приведены на рис. 18.

Данные, приведенные на рис. 17, 18, указывают на значительную разницу в скорости роста прочности, а также относительного удлинения при сварке закаленных и нормализованных образцов. При сварке предварительно закаленных образцов равнопрочность соединения основному металлу достигается при  $t_{\text{св}} = 800^\circ\text{C}$  за 5 мин

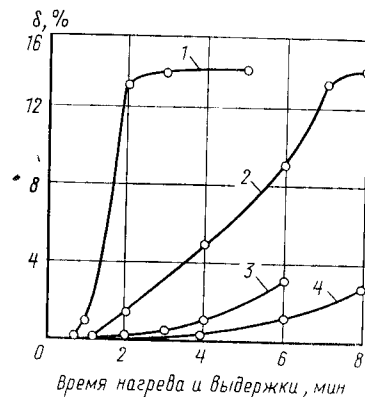


Рис. 18. Зависимость относительного удлинения сварных соединений от длительности ДС предварительно закаленных (1, 2) или нормализованных (3, 4) образцов из стали 50. Состав среды: 70%  $\text{BaCl}_2 + 30\% \text{KCl}$ ,  $p = 3,7$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $t_{\text{св}} = 800^\circ\text{C}$  (2, 4),  $t_{\text{св}} = 850^\circ\text{C}$  (1, 3)

и при  $t_{св}=850^{\circ}\text{C}$  за 2 мин, а при сварке нормализованных образцов даже через 8 мин прочность сварного соединения составляет лишь 70% прочности основного материала.

Существенное различие в кинетике роста прочности наблюдается также при сварке дисперсионно-твердеющего сплава 44НХТЮ и мартенситно-старееющих сталей (X15Н9Ю, X17Н7Ю, X17Н5М3), находящихся в различном (закаленном или отпущенном) состоянии.

Из приведенных на рис 17 зависимостей видно, что степень пластической деформации нормализованных образцов ниже, чем закаленных. Это наблюдается также при сварке сталей У8, У12, 50ХГА, 35ХГСА, имеющих в закаленном состоянии мартенситную структуру или структуры отпуска (бейнит, троостит или сорбит).

Анализ экспериментальных данных приводит к выводу о том, что при сварке образцов, на контактных поверхностях которых имелась окисная пленка минимальной толщины, ускорение процесса образования сварного соединения происходит вследствие разупрочнения материала при распаде метастабильной фазы. Поэтому один из способов интенсификации ДС может быть основан на использовании явления метастабильного распада в соединяемых материалах при сварке<sup>1</sup>.

Данные рис. 19 иллюстрируют зависимость прочности сварных соединений предварительно закаленных образцов из сталей 45, У12 и 50ХГА, контактные поверхности которых были зачищены за 3 мин перед сваркой, от температуры закалки. Видно, что прочность сварных соединений увеличивается с повышением температуры закалки соединяемых материалов от 750 до  $1100^{\circ}\text{C}$ , за исключением отдельных случаев, когда исследуемые материалы были предварительно закалены с определенных температур. Например, минимальную прочность имеют сварные соединения из стали 45 в результате предварительной закалки с температур 850, 1000 или  $1100^{\circ}\text{C}$  и последующей сварки при  $750^{\circ}\text{C}$  в расплавленных солях. Для сталей У12 и 50ХГА температура закалки, приводящей к уменьшению прочности сварного соединения, составляет  $950^{\circ}\text{C}$ . Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что температура закалки, уменьшающей прочность сварных

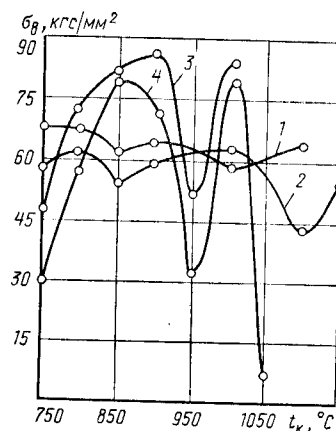


Рис. 19. Влияние температуры предварительной закалки  $t_k$  на прочность соединений из стали 45 (1, 2), стали У12 (3) и стали 50ХГА (4), полученных ДС в среде 70%  $\text{BaCl}_2 + 30\% \text{ KCl}$  ( $t_{св}=750^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_{св}=5$  мин):  $p=5,2$  кгс/мм² (1, 3, 4),  $p=2,3$  кгс/мм² (2)

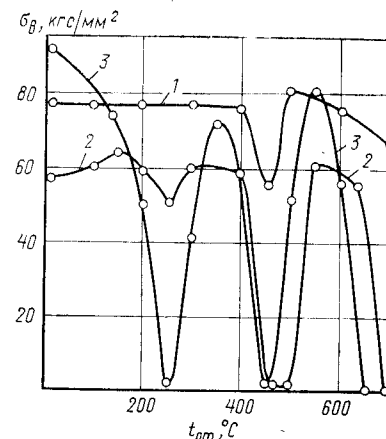


Рис. 20. Влияние температуры отпуска на прочность соединений из стали У12 (1), стали 45 (2) и 35ХГСА (3), полученных ДС в среде расплавленной соли при  $\tau=5$  мин:

1 —  $t_{св}=850^{\circ}\text{C}$ ,  $p=2,3$  кгс/мм²; 2 —  $t_{св}=750^{\circ}\text{C}$ ,  $p=2,3$  кгс/мм²; 3 —  $t_{св}=1000^{\circ}\text{C}$ ,  $p=1,8$  кгс/мм²

соединений, не является постоянной для каждой стали, а зависит от ряда факторов и в первую очередь от температуры и давления сварки.

Представляют интерес имеющие немонотонный характер зависимости прочности сварных соединений от температуры отпуска закаленных образцов перед сваркой (рис. 20).

Количество ярко выраженных минимумов на этих зависимостях, видимо, зависит от химического состава стали. Так, например, для соединений из стали 45 обнаруживаются два минимума прочности при температурах отпуска  $450-500^{\circ}\text{C}$  и  $700^{\circ}\text{C}$ . Для соединений из стали У12 минимум прочности наблюдается при температуре отпуска  $450^{\circ}\text{C}$ , а для соединений из стали 35ХГСА при температурах отпуска 250, 450 и  $650^{\circ}\text{C}$ .

Следует отметить, что для всех исследованных материалов температура отпуска, снижающего прочность сварных соединений, зависит от температуры и давления сварки.

Характер рассматриваемой зависимости существенно зависит от состава газа, находящегося в зоне соединения.

<sup>1</sup> Финкельштейн М. Л. Авт. свид. № 256482. — «Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки». 1977, № 7, с. 207.

При сварке образцов из стали 45 в расплавленных солях введение в зону соединения различных веществ ( $\text{NH}_4\text{F}$ , флюсов Ф220 или 34А) существенно изменяет прочность сварных соединений в зависимости от исходного состояния стали перед сваркой:

Вещество в зоне соединения	Воздух	Флюс Ф220	Флюс 34А	$\text{NH}_4\text{F}$
$\sigma_{\text{н}}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	45/60	62/45	27/~0	20/25

В числителе прочность сварных соединений в отожженном, в знаменателе — в закаленном состоянии, режим сварки:  $t_{\text{св}} = 850^\circ\text{C}$ ,  $p = 2,3$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\tau_{\text{св}} = 5$  мин.

Следует отметить, что структура стали после закалки может быть более благоприятной для сварки в расплавленных солях, когда в зоне соединения присутствует воздух, и, наоборот, менее благоприятной, если в зоне соединения присутствуют такие вещества, как фтористый аммоний, флюсы 34А или Ф220. Результаты проведенных исследований указывают на то, что не существует единственной структуры стали, способствующей интенсивному формированию соединения при любых условиях ДС. Вместе с тем подбором исходных структур материалов можно существенно интенсифицировать процесс ДС в солях. В частности, большую группу сталей можно успешно соединять при  $700\text{—}800^\circ\text{C}$ , что на  $200\text{—}300^\circ\text{C}$  ниже температур ДС этих материалов в вакууме. При этом снижение температуры сварки не приводит к необходимости увеличения длительности процесса или давления сварки.

### 3. ТЕХНОЛОГИЯ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

#### Основные параметры процесса и свойства сварных соединений

Наряду с такими известными факторами, как температура, давление, длительность сварки, скорость и степень деформации, шероховатость контактирующих поверхностей, на кинетику процесса и качество сварных соединений существенно влияют также строение и толщина поверхностной окисной пленки, химический состав находящегося в зоне соединения вещества, состав

и агрегатное состояние окружающей среды, исходное структурное состояние материала. Многообразие влияющих факторов, естественно, определяет многообразие оптимальных режимов сварки различных пар материалов.

При разработке технологии ДС в жидкой среде любой пары материалов основное внимание должно уделять выбору состава жидкой среды, подготовке контактных поверхностей деталей, выбору оптимального исходного структурного состояния материала, определению оптимального режима сварки (температуры, давления и длительности).

На основе выполненных исследований можно сформулировать общие рекомендации, позволяющие облегчить разработку приемлемого для производства технологического процесса ДС.

Ранее было показано, что воздействие окружающей жидкой среды на образование сварного соединения и его качество обусловлено способностью жидкой среды поглощать часть находящегося в зоне соединения газа. Эта способность определяется в основном особенностями взаимодействия газа с окружающей жидкой средой при ДС и мало зависит от химического состава свариваемых материалов.

В качестве жидких сред при ДС пригодны хлористые соли бария, натрия и калия. Комбинация этих веществ позволяет проводить сварку в широком диапазоне температур — от  $600$  до  $1300^\circ\text{C}$ . Конкретные составы жидких сред, в которых можно осуществлять ДС углеродистых и легированных сталей, сплавов титана, меди, никеля, а также алюминия, приведены в табл. 1.

Одной из важнейших операций, существенно определяющих прочность сварного соединения, является подготовка контактных поверхностей деталей под сварку. При сварке стальных деталей шероховатость контактных поверхностей должна соответствовать шестому или более высокому классу. Поэтому соединяемые поверхности следует подвергать тонкому лучистовому (чистовому) точению или шлифовке.

Для сварки цветных металлов (алюминия, меди, титана и их сплавов) вполне достаточна токарная обработка контактных поверхностей по шестому классу. Шлифовка или полировка поверхностей обычно ухудшает качество сварного соединения.

Способ и режим окисления контактных поверхностей можно выбирать на основании приведенных данных и уточнять экспериментально для каждого случая сварки. В качестве примера правильного выбора режима окисления можно указать зависимости прочности сварных соединений сталей Э и 45 от температуры сварки, приведенные на рис. 7, а, б. Контактные поверхности этих материалов были специально окислены при нагреве на воздухе или имели естественную окисную пленку.

Создание на контактных поверхностях окисного слоя, ускоряющего образование сварного соединения, является отдельной операцией, требующей времени и специального оборудования для ее осуществления. Это обстоятельство в определенной мере ограничивает применение данной технологии при сварке.

Для подготовки контактных поверхностей деталей под сварку может быть рекомендован другой способ, основанный на свойстве жидкого углеводорода препятствовать взаимодействию кислорода воздуха с металлом при механическом удалении окисной пленки в процессе холодной обработки контактных поверхностей соединяемых деталей.

Технология такой подготовки контактных поверхностей под сварку заключается в следующем<sup>1</sup>. На контактные поверхности заготовок наносят жидкое вещество, и окончательную (чистовую) их обработку ведут под слоем этого вещества. В этом случае кислород воздуха не взаимодействует с обрабатываемой поверхностью, и окисная пленка не образуется.

Заготовки, контактные поверхности которых подготовлены по указанной технологии, могут быть сварены без использования дополнительных средств очистки поверхности, так как вещество, под слоем которого проводилась механическая обработка, при нагреве испаряется, и контактные поверхности оказываются свободными как от окисных пленок, так и от нанесенного при механической обработке вещества.

Для подготовки контактных поверхностей можно использовать углеводородные или более сложные органические соединения, жидкие при комнатной температуре.

<sup>1</sup> Финкельштейн М. Л., Феликсон Е. И. Авт. свид. № 211298.— «Открытия. Изобрет. Пром. образцы. Товарные знаки», 1977, № 7, с. 208.

Расчеты показывают, что при нагреве заготовок, поверхности которых проточены под слоем углеводородного соединения (вазелина, парафина, минерального масла и др.), в зоне соединения образуется среда, содержащая небольшое количество кислорода ( $\sim 3 \times 10^{-8} \%$ ). Для сравнения отметим, что содержание кислорода в вакууме  $10^{-4}—10^{-6}$  мм рт. ст. составляет примерно  $3 \times 10^{-6}—3 \cdot 10^{-8} \%$ .

При указанном способе подготовки контактных поверхностей детали можно сваривать через длительное время после их изготовления. Экспериментальные исследования (рис. 21) показывают, что пребывание в течение нескольких часов на воздухе образцов из стали 35ХГСА, контактные поверхности которых были проточены без смазки (кривая 1), приводило к значительному снижению прочности сварного соединения. В то же время образцы, поверхности которых были проточены под слоем рыбьего жира (кривая 2), хорошо сваривались даже после пребывания на воздухе в течение двух недель.

Весьма эффективной оказывается проточка контактных поверхностей деталей из титановых сплавов под слоем вазелина с последующим их обезжириванием непосредственно перед сваркой. Использование такой технологии подготовки поверхностей под ДС в расплаве солей позволяет резко уменьшить разброс механических характеристик сварных соединений.

Данная технология эффективна для сварки алюминиевых и никелевых сплавов, легированных сталей и других материалов.

При ДС в жидких средах ряда материалов хорошие результаты дает также гальваническое покрытие поверхностей. Например, гальваническое нанесение нике-

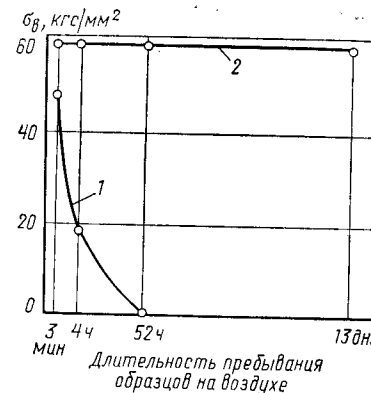


Рис. 21. Влияние длительности пребывания образцов на воздухе перед сваркой на прочность соединений из стали 35ХГСА, полученных ДС в среде ВаСl₂ при  $t_{св} = 4$  мин:

1 —  $t_{св} = 1150^\circ\text{C}$ ,  $p = 1,7$  кгс/мм²; 2 —  $t_{св} = 1050^\circ\text{C}$ ,  $p = 2,3$  кгс/мм²



левого покрытия при сварке твердых сплавов с легированными сталями позволяет получать качественные соединения [27].

Выбор оптимальной исходной структуры особенно важен при сварке сталей различного химического состава, сплавов никеля и титана при температурах ниже  $0,7 T_{пл}$ . В первую очередь целесообразно выявлять влияние на качество сварного соединения исходной структуры, полученной термической обработкой, так как в этом случае можно ожидать наибольшего эффекта.

При определении оптимального режима ДС в жидкой среде (температуры, давления и длительности) можно ориентироваться на известные значения этих параметров, полученные при ДС в вакууме. Необходимо при этом учитывать различие в характере приложения давления сварки.

Удовлетворительные результаты при сварке получаются в том случае, если сжимающая нагрузка прикла-

Таблица 6

СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ДС В РАСПЛАВЛЕННЫХ СОЛЯХ

Свариваемые материалы	$t_{св}, ^\circ\text{C}$	$p, \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$	$\tau_{св}, \text{мин}$	$\sigma_{в.м}, \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$	$\sigma_{в}, \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$	$\alpha_{заг}, \text{град}$
Сталь Э+сталь Э	1150	2	2	36—38	$\geq 38$	$>180$
Сталь Ст3+сталь Ст3	1150	2	2	46	$\geq 46$	180
Сталь 45+сталь 45*4	1100	2	4	60	$>60$	60—90
Сталь 15X+сталь 15X*4	1100	2	4	50	$>50$	180
Сталь X18H10T+сталь Э*1	1150	2	5	36—38	$>38$	$>150$
Чугун СЧ18-36+сталь Э*2	800	2,5	10	17—19	$>19$	—
Чугун СЧ18-36+сталь 45*2	850	2,0	10	17—19	$>19$	—
Сплав Т15К6+сталь 45*3	850	3,0	15	—	30—35	—
Сплав ВК20+сталь Х12М [27]*3	1050	0,4	15	—	65—70	—

\*1 Основной материал — сталь Э.

\*2 При ударном разрыве разрушение происходит по чугуну (основному материалу).

\*3 При ударном разрыве разрушение происходит по сплаву.

\*4  $a_H = 1,5 \div 2,0 \text{ кгс} \cdot \text{м/см}^2$  (для соединения из стали 45),  $a_H = 6 \div 10 \text{ кгс} \cdot \text{м/см}^2$  (для соединения из стали 15X).

дывается к деталям перед их погружением в жидкую среду и остается неизменной в течение всего сварочного цикла вплоть до охлаждения деталей. Лучшие результаты достигаются при ступенчатом изменении нагрузки от более высокой при нагреве к меньшей при выдержке. Эффективно также плавное уменьшение нагрузки. В этом случае смятие контактных поверхностей происходит более интенсивно, что обеспечивает более полное удаление газа из зоны соединения в окружающую жидкую среду вследствие его выдавливания.

В табл. 6 приведены режимы сварки и механические свойства сварных соединений ряда материалов. Эти данные показывают, что ДС в жидкой среде получают сварные соединения с высокими значениями прочности и пластичности. Приведенные оптимальные режимы сварки не являются единственно возможными. В зависимости от требований к условиям процесса (допустимой температуры, степени пластической деформации деталей или длительности процесса) они могут быть иными.

При ДС в жидкой среде с допустимой деформацией  $<10\%$  оптимальными режимами ДС для углеродистых, некоторых легированных конструкционных и инструментальных сталей являются:

$t_{св} = 800 \div 1100^\circ\text{C}$ ,  $p = 5 \div 2 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\tau_{св} = 15 \div 2 \text{ мин}$ ; для чугуна со сталью  $t_{св} = 800 \div 1000^\circ\text{C}$ ,  $p = 3 \div 1 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\tau_{св} = 15 \div 3 \text{ мин}$  [32]; для сплавов титана  $t_{св} = 800 \div 1050^\circ\text{C}$ ,  $p = 1,5 \div 0,4 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\tau_{св} = 20 \div 2 \text{ мин}$  [30, 31]; для алюминия  $t_{св} = 500 \div 600^\circ\text{C}$ ,  $p = 0,45 \div 0,1 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\tau_{св} = 30 \div 10 \text{ мин}$ .

## Оборудование для сварки

Для ДС в жидких средах необходимо специальное оборудование. ДС в жидких средах на известных в настоящее время установках для сварки в газовых средах или в вакууме невозможна.

При ДС в жидких средах требуется обязательное перемещение собранных и предварительно сжатых деталей из воздушной среды в жидкую и обратно. Поэтому установки для ДС в жидких средах должны несколько отличаться от известных и состоять из следующих основных узлов: ванны с жидкой средой, механизма сжатия соединяемых деталей и механизма пере-

мещения сжатых деталей из воздушной среды в жидкую и обратно.

Ванны с жидкой средой применяют в промышленности достаточно широко. Конструкции их весьма разнообразны и определяются условиями эксплуатации: температурным диапазоном работы, составом используемой жидкой среды, размерами нагреваемых деталей и т. д. Наиболее распространены ванны, нагреваемые электрическим током.

По способу нагрева электрические ванны разделяют на электродные, а также с наружным и внутренним косвенным нагревом.

В электродных ваннах нагрев производится проходящим через расплав электрическим током. Основное выделение тепла происходит между электродами. Перенос тепла и выравнивание температуры по всему объему расплава осуществляются под действием возникающих при прохождении тока электромагнитных сил и конвекционных потоков. Конструкции электродных ванн различаются числом фаз (однофазные или трехфазные), расположением и количеством электродных групп, а также способом перемешивания соли (электромагнитная или конвекционная циркуляция). Переменный ток напряжением 380 и 220 В подводится к ваннам от сети через понижающие трансформаторы, с помощью которых обеспечивается рабочее напряжение на электродах в 10—20 В.

Электродный способ нагрева жидкой среды обычно применяют в ваннах, работающих при температурах от 1000 до 1300°C. Этот способ нагрева используется также в средне- и низкотемпературных ваннах различных конструкций, рабочие температуры в которых составляют 850 и 650°C соответственно.

В ваннах двух других типов жидкая среда помещается в металлический тигель, нагреваемый излучением от элементов сопротивления, расположенных снаружи тигля либо погруженных в расплав. Ванны с наружным нагревом используют для работы при 850—900°C. Максимальная температура работы ванн с внутренним нагревом обычно не превышает 550—600°C.

Конструкции и технические характеристики электрических ванн, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в работе [28].

Для создания давления на соединяемые детали при сварке в жидких средах опробованы на практике механизмы сжатия пружинного, рычажного, пневматического и гидравлического типов.

Конструкция приспособления сжатия пружинного типа приведена на рис. 22.

Внутри жесткой рамы параллельно стойкам 5 расположен шток 6. Соединяемые детали 8 помещают между нижним основанием рамы 9 и штоком 6. Стойки 5, шток 6 и нижнее основание рамы 9 изготовлены из жаропрочного никелевого сплава ХН70ВМТЮ (ЭИ617). В верхней части рамы между траверсой 2 и направляющими 7 помещена изготовленная из элинварного сплава сменная пружина 4, ко-

торая предварительно тарирована по осадке. Жесткость пружины подбирается из условия, чтобы при деформации деталей в процессе сварки усилие сжатия уменьшалось не более чем на 10—15%. Необходимое усилие сжатия деталей создается при вращении винта 1 через упорный подшипник 3. Величину сжимающей силы определяют по осадке пружины, измеряемой, например, по числу оборотов винта 1, шаг которого известен. В данном приспособлении можно создать сжимающее усилие на детали от 50 до 2500 кгс и сваривать изделия диаметром 50 мм и высотой до 120 мм в жидкой среде при 1200—1300°C.

Приспособления пружинного типа имеют небольшую массу и размеры. Их целесообразно использовать при сварке небольших по габаритам однотипных деталей при серийном производстве.

В работе [29] описано аналогичное приспособление без сжимающей пружины, применяя которое необходимо дополнительно сжимать соединяемые детали в процессе сварки с помощью винта, что создает неудобство в работе.

Конструкция приспособления сжатия рычажного типа приведена на рис. 23 [30].

Приспособление представляет жесткую раму, соединенную в верхней части с рычажной системой 8. Последняя с помощью сменных грузов 7 создает требуемую сжимающую нагрузку, действующую на свариваемые детали 2 и 3 через подвижный шток 4. Отношение плеч рычажной системы 19:1, что дает возможность с помощью сменных грузов 7 небольшой массы создавать при сварке усилие сжатия деталей от 30 до 600 кгс. Нижнее основание 1 рамы, стойки 5 и 6 и подвижный шток 4 выполнены из жаропрочного сплава ХН70ВМТЮ (ЭИ617). Используя направляющие 10 и 11, можно вручную погружать в ванну с жидкой средой раму со свариваемыми деталями (масса этой конструкции 12 кг).

Расстояние между подвижным штоком 4 и основанием 1 рамы можно регулировать, изменяя высоту стоек 5 и 6, а также высоту серги 9 или длину штока 4, который при необходимости можно заменить штоком другой длины. Совмещение контактных поверхностей соединяемых деталей обеспечивается при настройке приспособления регулировкой параллельности плоскостей нижнего основания рамы и подвижного штока 4.

Приспособление можно использовать для сварки деталей шириной или диаметром до 34 мм и высотой до 150 мм в жидкой среде при 1200—1300°C. Оно удобно для экспериментальных работ.

В Куйбышевском политехническом институте создана промышленная установка рычажного типа, в которой усилие на рычаг передается от пневмоцилиндра. Сжимающий механизм смонтирован на передвижной тележке. На установке можно сваривать в соляной ванне одновременно до шести заготовок калибрующих пуансонов.

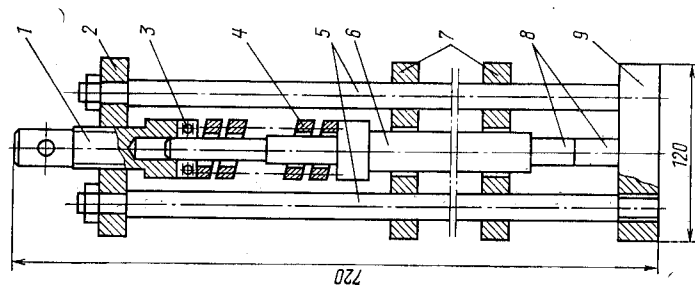


Рис. 22. Схема приспособления для сжатия пружинного типа

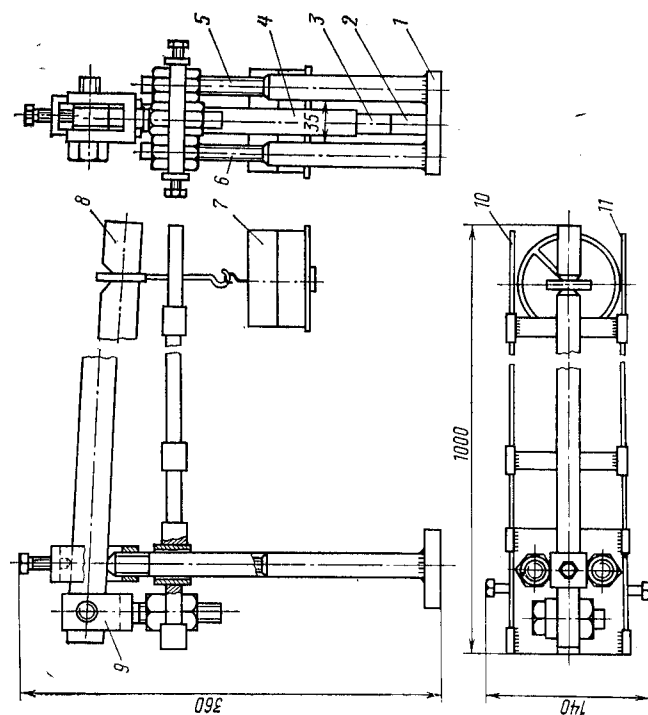


Рис. 23. Схема приспособления для сжатия рычажного типа

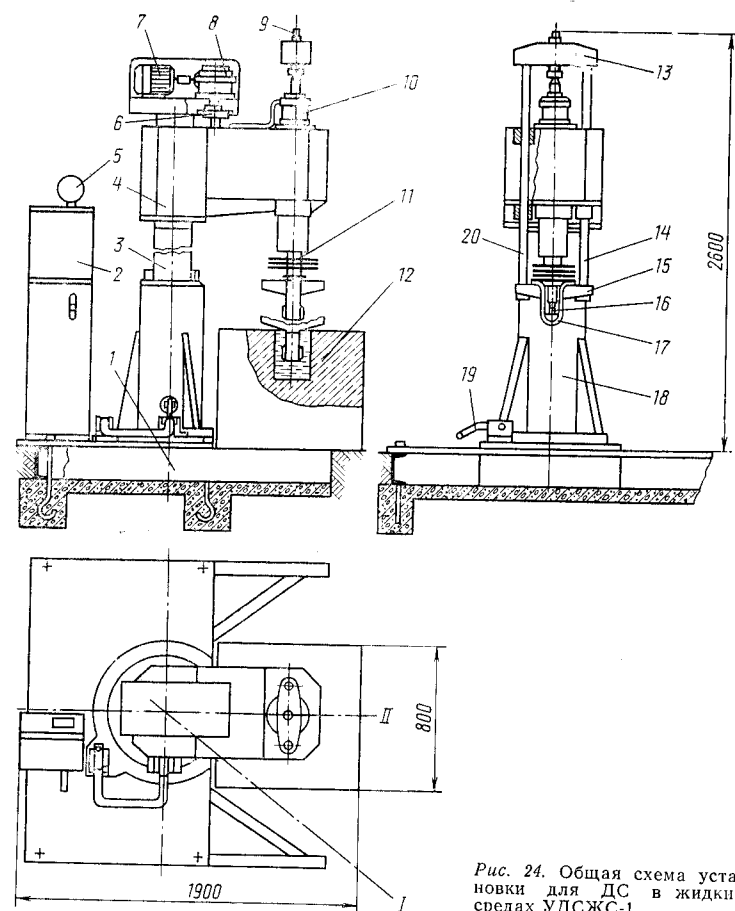


Рис. 24. Общая схема установки для ДС в жидких средах УДСЖС-1

На рис. 24 приведена разработанная в НИКИИ конструкция установки УДСЖС-1, в которой давление между соединяемыми деталями создается с помощью гидравлической системы<sup>1</sup>.

В ванне 12 находится расплавленная среда. Неподвижный стакан 18 закрепляется на основании 1; в стакан вставлена колонна 3, которая может поворачиваться в стакане 18 вокруг своей оси и за-

<sup>1</sup> Феликсон Е. И., Финкельштейн М. Л., Орлов А. Н., Артемичева И. М., Оглоблин В. А., Сморгкова З. В. Авт. свид. № 255755. — «Открытия, Изобрет. Пром. образцы. Товарные знаки», 1977, № 7, с. 207.

крепляется в нужном положении с помощью фиксаторов и упоров стопорного механизма 19.

На колонну 3 надета горизонтальная консоль 4, которую можно перемещать вверх и вниз по колонне и поворачивать в горизонтальной плоскости вместе с колонной. Подъем и опускание консоли вдоль колонны осуществляются отдельным электродвигателем 7, передающим движение вертикальному ходовому винту 6 через редуктор 8.

На свободном конце консоли находится силовая рама с механизмом давления. Силовая рама состоит из траверс 13 и 15 и направляющих 14 и 20. В середине нижней траверсы имеется опорная скоба 17, изготовленная из жаропрочного материала, в которую вставляют заготовки 16 для сварки.

Для сдавливания свариваемых заготовок ручным насосом нагнетают масло в силовой гидроцилиндр 10. Давление передается через верхнюю траверсу 13, направляющие 14 и 20 и основание опорной скобы 17. Величина давления контролируется по показаниям манометра 5. В гидравлической системе имеется клапан для предохранения силовой рамы и опорной скобы от перегрузки.

Расстояние между пуансоном 11 и основанием опорной скобы 17 в зависимости от размеров свариваемых деталей можно изменять, перемещая поршень в гидроцилиндре 10 или вращая винт 9, установленный в верхней траверсе 13.

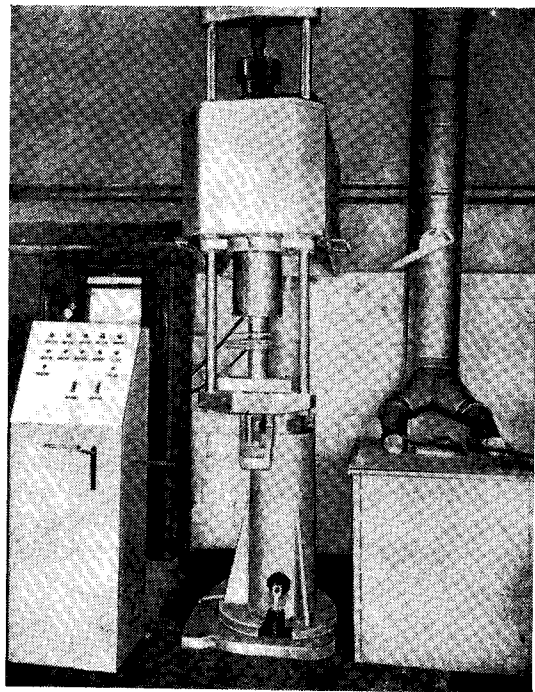


Рис. 25. Установка УДСЖС-1

Пуансон 11 установлен между направляющими силовой рамы и опирается верхним концом в основание гидроцилиндра, а нижним — в поверхность свариваемой заготовки. Для удобства эксплуатации нижняя часть пуансона выполнена съемной. Пульт управления установкой вынесен в отдельный шкаф 2. Колонна с консолью и основанием и пульт управления установлены рядом с электродной соляной ванной.

Установка УДСЖС-1 изображена на рис. 25.

Принцип ее работы следующий. Заготовки, подготовленные к сварке, устанавливают в опорной скобе 17 (см. рис. 24) и прижимают друг к другу усилием, создаваемым в гидравлической системе. Для загрузки заготовок в опорную скобу и выгрузки из нее консоль с силовой рамой поворачивают на некоторый угол в положение 1 (см. рис. 24) так, чтобы опорная скоба не находилась над зеркалом ванны.

После помещения свариваемых заготовок в опорную скобу консоль поворачивают в положение 11 (см. рис. 24) и фиксируют ее над зеркалом ванны с помощью упоров стопорного механизма. Затем включают механизм вертикального перемещения консоли, и опорная скоба со свариваемыми заготовками опускается в нагретую жидкую среду на требуемую глубину. Необходимая глубина погружения опорной скобы обеспечивается срабатыванием конечного выключателя, установленного на траверсе, который выключает механизм опускания траверсы.

После опускания опорной скобы с заготовками в ванну заготовки выдерживают под давлением в жидкой среде. Затем поднимают консоль со сваренными заготовками над ванной и поворачивают ее вокруг колонны 3 в положение 1 (см. рис. 24). После охлаждения сваренных заготовок до заданной температуры давление снимают, сваренные заготовки вынимают из скобы, и цикл сварки повторяется.

На установке УДСЖС-1 можно осуществлять ДС в жидких средах крупных изделий при температурах до 1200°C и усилиях сжатия от 100 до 5000 кгс. Габаритные размеры установки вместе с соляной ванной СЗО и пультом управления 1,9×0,8×2,6 м.

В НИКИМП разработан проект стационарной установки УДСЖС-2, общий вид которой приведен на рис. 26.

Она состоит из поворотной колонны 2, траверсы 5, пульта управления 1 и соляной ванны 8.

Траверса представляет собой двухконсольную жесткую сварную конструкцию, установленную на колонне 2. В каждой консоли находится рычажный механизм, служащий для создания усилия сжатия свариваемых заготовок. Рычажный механизм состоит из системы грузового рычага второго рода 6 с подвеской грузов 4 и механизма разгрузки и нагружения 3. Нагруженный рычаг 6 через систему валков и серег передает давление на шток 7, который сжимает свариваемые заготовки 10, установленные в скобе 9.

Сжатие заготовок и снятие нагрузки осуществляется с помощью электрической тали 3 при опускании и подъеме рычага с грузами в крайнее нижнее и верхнее положения.

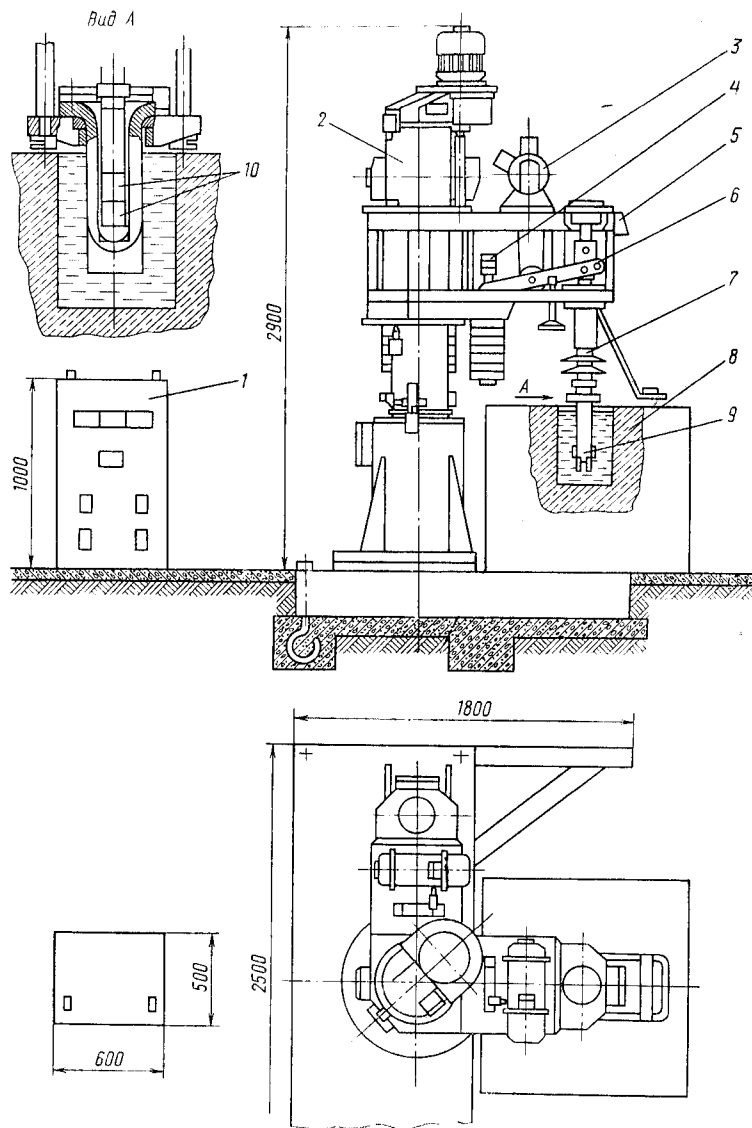


Рис. 26. Общая схема установки для ДС в жидких средах УДСЖС-2

Охлаждение сваренных деталей под нагрузкой, выгрузка их из скобы и установка новых заготовок в скобу производятся в период сварки другой пары заготовок, находящихся в скобе второй консоли, работающей по аналогичному с первой консолью режиму. В связи с этим значительно сокращается общий цикл сварки и уменьшается простой соляной ванны.

Установка УДСЖС-2 полуавтоматическая. Вручную производится только загрузка заготовок в скобу и поворот консоли в положение над зеркалом ванны. Опускание и выдержка заготовок, поддержание заданного давления при сварке, а также извлечение сваренных деталей из ванны осуществляются автоматически.

На установке УДСЖС-2 можно осуществлять ДС деталей высотой до 195 мм при температурах до 1200°C и усилиях сжатия от 300 до 3000 кгс. Ее габаритные размеры (без соляной ванны) — 2,5×2,07×2,9 м.

#### 4. ВОЗМОЖНОСТИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

Достоинства процесса обусловлены использованием жидких сред в качестве защитной среды и источника нагрева.

При ДС в жидких средах не нужны герметичные камеры. В ваннах с жидким теплоносителем можно одновременно нагревать несколько деталей под сварку, что наряду с отсутствием необходимости вакуумирования зоны соединения уменьшает длительность процесса. Поэтому ДС в жидких средах является высокопроизводительным процессом.

ДС в жидких средах можно проводить одновременно с химико-термической и термической обработками, получая сварные соединения с новым комплексом физико-механических свойств.

Для этого способа сварки требуется простое и сравнительно недорогое оборудование, стоимость которого в 2—50 раз ниже стоимости оборудования для ДС в вакууме. Несложное и компактное оборудование дает возможность использовать сварку в жидких средах для соединения разнообразных изделий в условиях единичного и серийного производств. При серийном производстве процесс сварки можно механизировать.

Технологический процесс ДС в жидких средах отличается простотой и одновременно обеспечивает в про-

мышленных условиях высокую воспроизводимость свойств сварных соединений.

ДС в жидких средах можно получать качественные соединения различных углеродистых и легированных сталей, чугуна, сплавов меди, алюминия, титана, никеля, разноименных материалов: сталей, различающихся по химическому составу и физическим свойствам, стали с чугуном, стали с алюминием, титана с алюминием, твердых сплавов со сталью, титана с нержавеющей сталью, нитрида бора со сталью, алмаза с металлом и др.

ДС в жидких средах получают герметичные, коррозионно-стойкие сварные соединения с хорошими упругими свойствами, противоударной и вибрационной стойкостью и другими важными эксплуатационными характеристиками. Сварные соединения, полученные данным способом, устойчиво работают при резких и циклических изменениях температуры.

ДС в жидких средах можно изготавливать матрицы сложной формы, а также резцы из быстрорежущей стали, твердых сплавов и алмаза со стальной державкой, твердосплавные штампы с основанием из среднеуглеродистых и высокоуглеродистых сталей. Перспективно применение этого процесса сварки при изготовлении деталей машин и приборов, изделий из магнитных и немагнитных материалов, различных типов упругих элементов, биметаллических переходников.

Имеющиеся в литературе данные по ДС в жидких средах позволяют говорить о широких возможностях и эффективности использования в промышленности этого способа сварки.

ДС в жидких средах можно соединять детали приборов из титана и нержавеющей стали [29]. В качестве барьерного слоя, препятствующего диффузии углерода из стали в титан и образованию в зоне соединения хрупкого карбида титана, использовали прокладки из ванадия и меди. Сварное соединение разрушалось по медной прокладке. Авторы считают, что ДС в жидких средах является перспективной и экономически выгодной при соединении деталей небольших размеров.

Вопросам армирования штампового инструмента твердым сплавом ДС в среде расплавленных солей посвящена работа [27]. Были исследованы структура, механические и эксплуатационные свойства сварных сое-

динений твердого сплава ВК20 со сталью Х12М, полученных сваркой в вакууме и в расплаве солей, содержащих хлористый барий, хлористый натрий и буру. Технология подготовки контактных поверхностей и режимы сварки ( $t_{св} = 1050 \div 1100^\circ\text{C}$ ,  $p = 0,4$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\tau_{св} = 15$  мин) в обоих случаях были идентичны. Поверхность детали из стали Х12М покрывалась слоем никеля.

Качество сварных соединений, полученных обоими способами, оценивалось по прочности, микротвердости, результатам металлографического и электронномикроскопического анализов зоны соединения.

Структура и механические свойства соединений стали Х12М с твердым сплавом ВК20, полученные обоими способами сварки, были идентичны, причем независимо от способа сварки соединения разрушались по твердому сплаву.

Эксплуатационные испытания изделий подтвердили хорошее качество сварных соединений. Калибрующие пуансоны для сепараторов подшипников из стали Х12М, армированные твердым сплавом ВК20, изготовленные ДС в вакууме и в среде расплавленных солей, практически полностью исчерпали ресурс по работоспособности твердого сплава и выбраковывались по причине истирания.

Авторы цитируемой работы считают, что ДС в расплавленных солях отличается дешевизной и высокой производительностью, которая примерно в пять раз выше, чем при сварке в вакууме.

Целесообразность сварки пуансонов в расплавленных солях связана также с возможностью закалки стального остова на высокую твердость, необходимую для сохранения формы и размеров пуансона при работе. Температура сварки соответствовала оптимальной температуре закалки стали Х12М, а нагрев в расплаве солей обеспечивал полный и равномерный нагрев всего объема пуансона. После охлаждения на воздухе остова пуансона имел твердость  $HRC\ 60-62$ . При сварке в вакууме твердость остова оказывалась недостаточной ( $\sim HRC\ 56-58$ ) из-за неравномерного нагрева пуансона и малой скорости охлаждения в вакуумной камере. Разработанный процесс ДС в расплаве солей твердого сплава со сталью используется при изготовлении калибрующих пуансонов. Стойкость таких пуансонов в 15—30 раз выше, чем цельнометаллических.

О возможности ДС в среде расплавленных солей титановых сплавов сообщается в работах [30, 31]. Показано, что прочностные характеристики соединения находятся на уровне прочностных характеристик основного материала. Важно отметить, что взаимодействие расплавленной соли с поверхностью детали из титанового сплава незначительно и не влияет на прочность свариваемых деталей. Изделия из титанового сплава можно также сваривать в расплавленных солях.

В расплаве  $BaCl_2 + KCl$  хорошо сваривается серый чугун с конструкционной сталью [32]. Исследования ДС чугуна со сталью проводились в вакууме и в расплаве солей. Сварку в вакууме  $10^{-2}$  мм рт. ст. проводили при  $t_{св}=850, 880, 900$  и  $920^\circ C$ ,  $\tau_{св}=5, 10, 15$  и  $20$  мин и  $p=1,3; 2,0; 2,3$  и  $2,5$  кгс/мм<sup>2</sup>. Сварные соединения, полученные при  $t_{св}=920^\circ C$ ,  $p=2,3$  кгс/мм<sup>2</sup> и  $\tau_{св}=5$  мин, при испытании разрушались по чугуну. Сварку в солях осуществляли при  $t_{св}=800, 850$  и  $900^\circ C$ ,  $\tau_{св}=5, 10$  и  $15$  мин,  $p=1,6$  и  $2,2$  кгс/мм<sup>2</sup>. При любых указанных параметрах сварки разрушение соединений происходило по чугуну. Сварку серого чугуна с конструкционной сталью в расплаве солей рекомендуется проводить по следующему режиму:  $t_{св}=800^\circ C$ ,  $p=2,2$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\tau_{св}=10$  мин.

Таким образом, представленные в данной книге результаты экспериментальных исследований показывают высокую эффективность ДС в жидких средах.

Анализ процессов, определяющих образование соединения при ДС в жидких средах, приводит также к важному выводу о возможности ДС на воздухе. Подтверждением этого являются приведенные в работе [33] данные по сварке концевой профильной инструмента.

Полученные методом выдавливания заготовки из быстрорежущей стали Р9 или Р18, имеющие форму метчика, сверла, фрезы или развертки, необходимо было соединить с цилиндрическим хвостовиком из углеродистой стали 45 или 40Х. Сваркой трением не удалось получить качественное соединение из-за непроваров по наружным слоям деталей, являющихся источником возникновения трещин при последующей термической обработке сваренного инструмента. ДС в вакууме нельзя было использовать из-за низкой производительности.

Основной особенностью технологии сварки инструмента на воздухе было то, что контактные поверхности заготовок механически обрабатывали под слоем углеродородного вещества. Такая подготовка поверхности спо-

собствовала быстрому протеканию сварки на воздухе при  $t_{св}=1100 \div 1150^\circ C$ ,  $p=3$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\tau_{св}=15 \div 30$  с (пластическая деформация деталей в зоне соединения не превышала 4%) и получению качественного сварного соединения. Опыт промышленного использования разработанной технологии ДС на воздухе концевой инструмента показывает, что производительность сварочной операции возрастает в 15—20 раз по сравнению с ДС в вакууме за счет сокращения как подготовительного, так и основного времени.

## Библиографический список

1. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка в вакууме. М., «Машиностроение», 1968. 332 с. с ил.
2. Смольников Е. А., Жданова Ф. И. Соляные ванны для термической обработки изделий. Справочник. М., «Машгиз», 1963. 124 с. с ил.
3. Вишняков Д. Я. — «Структура и свойства стали». М., Metallurgizdat, 1949 (МИСиС. сб. XXVII). с. 126—154.
4. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Кирдо И. В. и др. — ДАН СССР, 1964, т. 159, № 1, с. 72, 73.
5. Беседин А. И., Владимиров Л. П. — «Физика и химия обработки материалов», 1967, № 2, с. 56—62.
6. Никифоров Г. Д., Дьяченко В. В., Орлов Б. Д. и др. — «Сварочное производство», 1967, № 12, с. 4—7.
7. Гельман А. С., Барышев М. С. — «Сварочное производство», 1971, № 5, с. 9—11.
8. Рымарь В. И., Лоцманов С. Н., Радзиевский В. Н., Чернов В. Ю. — «Сварочное производство», 1973, № 11, с. 6—8.
9. Рымарь В. И., Лоцманов С. Н., Радзиевский В. Н., Плеханов В. Г. — «Сварочное производство», 1975, № 6, с. 14.
10. Рымарь В. И., Радзиевский В. Н., Плеханов В. Г., Рымарь Н. Н. — «Сварочное производство», 1976, № 7, с. 14.
11. Данквертс Р. В. Газожидкостные реакции. Пер. с англ. М., «Химия», 1973. 296 с. с ил.
12. Гельман А. С. Основы сварки давлением. М., «Машиностроение», 1970. 312 с. с ил.
13. Баймаков Ю. В., Ветюков М. М. Электролиз расплавленных солей. М., «Металлургия», 1966. 560 с. с ил.
14. Рамм В. М. Абсорбция газов. М., «Химия», 1966. 767 с. с ил.
15. Блантер М. Е., Финкельштейн М. Л. — «Металловедение и термическая обработка металлов», 1971, № 2, с. 53—55.
16. Гельман А. С., Большаков М. В. — «Сварочное производство», 1967, № 10, с. 23—26.
17. Гельман А. С., Большаков М. В. — В кн.: Научно-исследовательская информация ЦНИИТмаш. М., «Машиностроение», 1967, кн. 74, с. 72—86.
18. Пешков В. В., Воронцов Е. С. — «Металлы», 1973, № 4, с. 99—102.

19. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. Пер. с англ. М., «Металлургия», 1965. 428 с. с ил.
20. Шишаков Н. А., Андреева В. В., Андриющенко Н. К. Строение и механизм образования окисных пленок на металлах. М., Изд-во АН СССР, 1959. 195 с. с ил.
21. Wilman H. — «Journal de chimie physique», 1956, t. 53, p. 607—619.
22. Данков П. Д., Игнатов Д. В., Шишаков Н. А. Электронографические исследования окисных и гидроокисных пленок на металлах. М., Изд-во АН СССР, 1953. 200 с. с ил.
23. Кофстад П. Высокотемпературное окисление металлов. Пер. с англ. М., «Мир», 1969. 392 с. с ил.
24. Палатник Л. С., Папиров И. И. Ориентационная кристаллизация. М., «Металлургия», 1964. 408 с. с ил.
25. Окисление металлов. Т. 1. Под ред. Ж. Бенара. Пер. с франц. М., «Металлургия», 1968. 499 с. с ил.
26. Окисление металлов. Т. 2. Под ред. Ж. Бенара. Пер. с франц. М., «Металлургия», 1969. 488 с. с ил.
27. Макаров А. М., Тетюева Т. В., Трахтенберг Б. Ф., Шубина М. А. — «Механика». Куйбышев, изд. Куйбышевского политехнического ин-та им. В. В. Куйбышева, 1975 (Сб. № 8), с. 152—160.
28. Кауфман В. Г., Михайлов Л. А., Пылаев В. М. Электрические печи с жидкими теплоносителями. М., «Энергия», 1973. 104 с. с ил.
29. Чаплыгин В. И., Пилякин П. И., Починский В. М. — «Сварочное производство», 1975, № 1, с. 15—16.
30. Каракозов Э. С., Горбульский Л. Ф., Котов Г. Н., Вигдорчик С. А. — «Автоматическая сварка», 1976, № 2, с. 74.
31. Горбульский Л. Ф., Молчанов Б. А., Каракозов Э. С., Вигдорчик С. А. — «Сварочное производство», 1976, № 11, с. 34.
32. Velikonja Meta — «Varilna tehnika», 1975, 24, № 2, s. 33—36.
33. Губарев В. В., Казаков Ю. В., Финкельштейн М. Л. — «Сварочное производство», 1976, № 7, с. 49.

## СОДЕРЖАНИЕ

От издательства . . . . .	3
Основные обозначения . . . . .	4
Введение . . . . .	5
<b>1. СУЩНОСТЬ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ В ЖИДКИХ СРЕДАХ</b>	<b>7</b>
Схема процесса . . . . .	7
Жидкие среды и их характеристика . . . . .	9
<b>2. ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКЕ В ЖИДКИХ СРЕДАХ</b>	<b>12</b>
Влияние жидкой среды . . . . .	12
Влияние окисных пленок . . . . .	21
Влияние природы вещества, находящегося в зоне соединения . . . . .	30
Влияние исходной структуры свариваемых материалов . . . . .	37
<b>3. ТЕХНОЛОГИЯ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ В ЖИДКИХ СРЕДАХ</b>	<b>44</b>
Основные параметры процесса и свойства сварных соединений . . . . .	44
Оборудование для сварки . . . . .	49
<b>4. ВОЗМОЖНОСТИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ В ЖИДКИХ СРЕДАХ</b>	<b>57</b>
Библиографический список . . . . .	61