

Л и т е р а т у р а

1. А б и б о в А.Д. и др. Технология самолетостроения. М.:Машиностроение, 1970, 598с.
2. Б о й ц о в В.В. и др. Сборочные и монтажные работы. М.:Оборонная промышленность, 1959, 476с.
3. Ш и х а н о в и ч Д.А. Введение в современную математику. М.:Наука, 1965. 375с.
4. Методы расчета основных показателей плана серийного производства летательных аппаратов. НИИТ, 1964. 131с.
5. Руководство по организации технологической подготовки производства на самолетостроительных заводах. НИИТ, 1957. 497с.
6. Ш р е й д е р Д.А. Равенство, сходство, порядок. М.: Наука, 1971. 252с.
7. Б е р ж К. Теория графов и ее применение. М.: Иностранная литература, 1962, с 319с.
8. У и л с о н Р. Введение в теорию графов. М.: Мир, 1977. 207с.

УДК 621.791.76:621.7.044.2

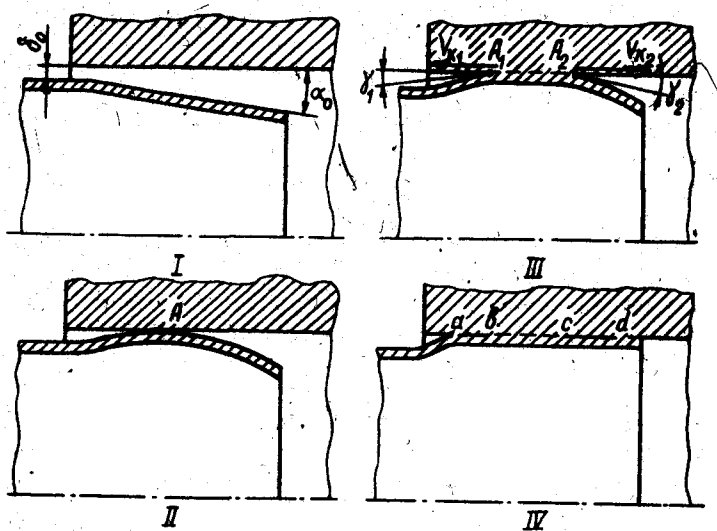
А.А.Дудин

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ПРОЦЕССЕ ОБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКЕ

Сопоставление геометрических характеристик сварных соединений с диаграммами движения метаемого элемента позволяет представить процесс образования соединения при магнитно-импульсной сварке¹ в следующей последовательности (рис. 1).

1. В начальный момент свариваемые поверхности образцов расположены друг к другу под некоторым углом α_0 и с зазором δ_0 между ними.

¹Ильсёнок Д.Н., Ермолаев В.В., Дудин А.А. А.С. №226393-Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки, 1968, №28, с.136.



Р и с. I. Последовательность образования соединения при магнитно-импульсной сварке

2. Под действием давления магнитного поля μεταаемый элемент движется из начального положения до встречи с неподвижной поверхностью в точке А со скоростью соударения V .

В зоне первого контакта возникают высокие давления, однако $V_k > c_0$ вследствие малых значений угла соударения ($\gamma < \gamma_{кр}$), в результате чего отсутствуют условия для волнообразования и самоочистки соударяемых поверхностей, соединение между ними не образуется.

3. Дальнейшее движение μεταемого элемента приводит к образованию двух фронтов контакта A_1 и A_2 , движущихся в противоположные стороны со скоростями V_{k1} и V_{k2} . Вследствие кривизны образующей μεταемого элемента углы соударения γ_1 и γ_2 увеличиваются от нуля до $\gamma_{кр}$, при котором возможно образование сварного соединения.

4. По мере движения фронтов контакта A_1 и A_2 образуется соединение; при этом $\gamma \geq \gamma_{кр}$, а $V \geq V_{мин}$, где $V_{мин}$ - минимальная скорость соударения, обеспечивающая образование сварного соединения.

Соударение свариваемых поверхностей связано с необратимым переходом кинетической энергии метаэлемента в работу пластической деформации в зоне контакта. Поэтому для образования сварного соединения при $\gamma > \gamma_{кр}$ на всем протяжении движения фронта контакта скорость соударения V не должна быть меньше минимально необходимой для сварки. Это может быть обеспечено либо предварительным разгоном всех участков метаэлемента до скоростей, значительно превышающих $V_{мин}$, либо другим путем, обеспечивающим повышение кинетической энергии движущихся участков до их соударения с неподвижной поверхностью. Если до окончания процесса соударения наступит момент, при котором $V < V_{мин}$, сварное соединение не образуется.

Данное представление о механизме образования соединения при магнитно-импульсной сварке подтверждает результаты обработки экспериментов. Сварные соединения имеют одну или две кольцевые зоны. При наличии двух зон соединения они разделены между собой участком непровара, приходящимся на область первого контакта.

При наличии одной зоны соединения она следует за областью, предшествующей сварке в направлении свободного конца метаэлемента.

Наличие двух зон соединения характерно в основном для случая, когда $\alpha_0 = 0$. В этой связи интересно отметить топографию зон соединения, соответствующую магнитно-импульсной сварке с применением децентрактора магнитного поля. Слияние двух зон соединения наблюдалось на участке, расположенном при сварке против оси децентрактора. При большой ширине щели или в случае недостаточной энергии разряда на этом участке наблюдается непровар.

Подтверждением такой схемы образования сварного соединения является также топография соединения, имеющая место при сварке трубчатых образцов с плоскими заготовками.

Зона соединения в этом случае имеет эллипсовидную форму с участком непровара в центре, приходящимся на область первого контакта. Такая форма зоны соединения является следствием соударения поверхности метаэлемента трубчатой заготовки, приобретающей к моменту встречи с неподвижным плоским образцом форму выпуклой поверхности двойной кривизны.

С позиции изложенного представления о последовательности образования сварного соединения можно объяснить наличие некоторой спиральности зоны соединения по окружности трубчатого соединения.

Такая конфигурация зоны соединения отражает форму витков в спиральном индукторе. При сварке с помощью концентратора указанное давление не наблюдается.

Таким образом, топография зоны сварного соединения при магнитно-импульсной сварке определяется начальной ориентировкой свариваемых поверхностей, распределением давления магнитного поля по поверхности метаемого элемента, формой фронта контакта и характером его движения. Наличие двух фронтов контакта при сварке труб по угловой схеме, как правило, ведет к образованию одной зоны соединения, а при сварке по схеме с углом $\alpha_0 = 0$ - к образованию двух зон соединения, разделенных участком несплавления. При сварке трубы с плоской заготовкой имеет место один замкнутый фронт контакта, расширяющийся в процессе движения.

Основное место в процессе очистки контактных поверхностей отводится поверхностной струе, которая представляет собой выходящий поток металла, направленный из точки контакта и состоящий из поверхностных слоев соударяемых металлов.

Расчеты, выполненные на основе теории сходящихся струй, показывают, что при $\gamma < 10^\circ$, масса металла, уносимая струей, не превышает одного процента от массы метаемой заготовки. Вследствие этого в практике не наблюдается возникновения сплошной кумулятивной пелены между соударяющимися поверхностями. В.В.Крыловским установлено, что при магнитно-импульсной сварке образуется облако мелкодисперсных частиц соединяемых материалов, вылетающих из зоны соударения. Отсутствие сплошной кумулятивной пелены является причиной того, что самоочищение соединяемых поверхностей происходит лишь частично. Поэтому для повышения качества сварного соединения рекомендуется производить обезжиривание свариваемых поверхностей, а в некоторых случаях удаление сплошных слоев окислов одним из известных способов.

При больших углах соударения γ возможно образование более мощных непрерывных потоков в виде поверхностных струй.

При сварке разнородных материалов в общем случае условия для самоочистки свариваемых поверхностей могут не соответствовать оптимальным одновременно для двух материалов. Вследствие этого поверхности материала с более прочными окисными пленками следует перед сваркой подвергать дополнительной предварительной механической очистке или травлению. При сварке материалов с резко отличающимися механическими свойствами, например, стали и алюминия, для

выравнивания механических свойств целесообразен предварительный нагрев более прочного материала. Это снижает скорости соударения, соответствующие началу образования кумулятивной пелены, и приводит к снижению необходимой энергии разряда.

Ранее отмечалось, что в сварном соединении за зоной первого контакта следует так называемые зоны, предшествующие соединению. Характерным признаком их является более шероховатая поверхность по сравнению с зоной первого контакта.

На рис. 2 показана структура участка соединения АД1-АМг-3М при частичном удалении сплава АД1.

Направленным освещением удалось выявить причину шероховатости этого участка. Она является следствием волнообразования. В зоне, предшествующей образованию сварного соединения, хорошо виден рельеф контактной поверхности.

В начале этой зоны на поверхности раздела видны отдельные бугры - следствие неустойчивости процесса волнообразования при малых углах соударения. Далее появляются мелкие волны длиной $\sim 0,05$ мм, увеличивающиеся по мере приближения к зоне соединения до $\sim 0,13$ мм. Зона, предшествующая соединению, переходит в зону соединения, на которой не удалось удалить сплав АД1.

В зоне, предшествующей соединению, лежащей справа от зоны первого контакта, микроскопические исследования показали наличие волн. Светлый участок, в который переходит зона, предшествующая соединению, соответствует второй зоне соединения шириной $\sim 0,6$ мм.

Високоскоростное соударение при магнитно-индукционной сварке сопровождается очень высоким давлением, распространяющимся в свариваемых металлах в виде ударных волн, и высокими температурами. По данным работы [1] под влиянием сил, действующих внутри фронта ударной волны, происходит интенсивное перемешивание металла с температурой более высокой, чем в основном материале.

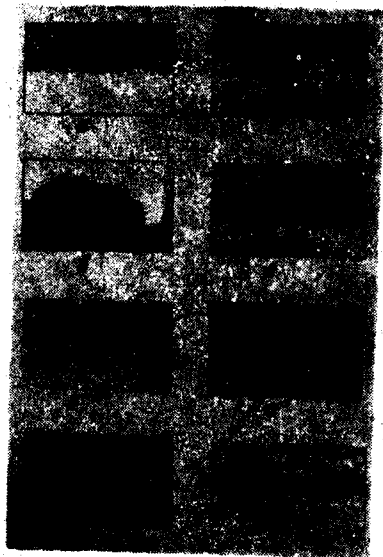
Исследования структуры зоны соединения проводились с помощью оптического микроскопа МММ-7 при увеличении $\times 200$. Образцы выра-



Р и с. 2. Микрофотография контактной поверхности сварного соединения ($\times 7$)

лись из сварной зоны вдоль по образцам, шлифовались и полировались обычным способом. Травление разнородных металлов в паре производили таким образом, чтобы выявить структуру основных металлов зоны.

Исследования показали, что контактная поверхность сварного соединения может быть без волн или иметь волнообразную форму. Длина волн в соединенных рассмотренных сочетаниях металлов (рис. 3)



Р и с. 3. Микрофотографии сварных соединений ($\times 200$): а-АД+Ст.3; б-АД+АМг6; в-АД+МІ; г-АД+І2ХІ6НІ0Т; д,е-АД+Ст.3; ж,з-АД+МІ

Микрорентгеновский анализ показывает, что при отсутствии новых фаз между соединяемыми металлами заметной диффузии одного металла в другой не наблюдается (рис. 3, а, кривая I).

Новые фазы наблюдаются в соединениях разнородных и одноименных металлов; В зоне соединения алюминия с алюминием часто наблюдается светлая фаза, твердость которой выше твердости основного металла [2, 3].

Фазы высокой твердости выявлены также в соединениях разнородных материалов АД + МІ, АД+Ст.3, АД + І2ХІ6НІ0Т. Характерно, что химический состав этих фаз близок к постоянному по всему сечению

составляет 0,1-0,2 мм. В зависимости от условий сварки и свойств свариваемых материалов волны на контактной поверхности могут иметь различные конфигурации: синусоидальную с малой высотой волны (рис. 3, а), синусоидальную с большой высотой волны (рис. 3, б) и выребобразную (рис. 3, в).

Зона соединения в зависимости от наличия или отсутствия волн может не содержать новых фаз и переходные слои (рис. 3, а, б) или содержать отдельные включения и сплошные прослойки новой фазы (рис. 3, в, г, е, ж).

Базовый состав в зоне сварного соединения исследовался с помощью рентгеновского микроанализатора MAP-I.

прослойки (рис.4). Это свидетельствует о бездиффузионной природе формирования указанных фаз. Однако в узкой зоне толщиной 10-20 мкм при переходе от основного металла к прослойке наблюдается постепенное изменение концентрации, что, по-видимому, является следствием диффузии.

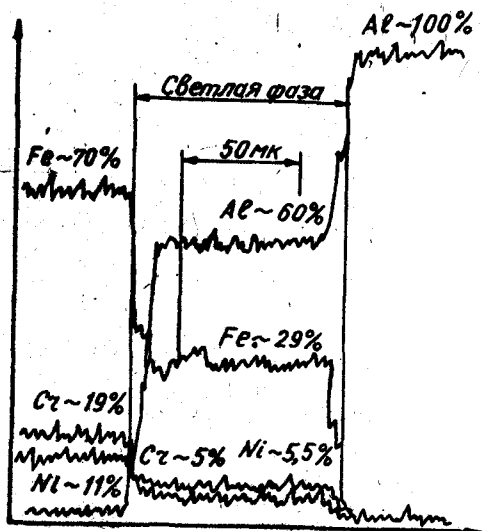
При сварке алюминия с медью иногда наблюдается очень твердая $H_{\mu} = (467-590)10^7 \text{ Па}$, "белая фаза", расположенная преимущественно в углублениях волн. Сварка алюминия с нержавеющей сталью I2X18H10T при определенных условиях также сопровождается образованием в зоне соединения твердой фазы (см.рис.3,г).

Аналогичная картина наблюдается в от-

дельных зонах соединения алюминий + Ст.3 (рис.3,е). Твердость "белой фазы" в этом случае составляет $H_{\mu} = (402-451)10^7 \text{ Па}$.

Можно предположить, что в образовании твердой фазы при сварке разнородных материалов не последнюю роль играет локальный нагрев контактной зоны до температур образования между ними эвтектики. Так, в соответствии с диаграммой состояния Cu-Al [4] при температуре 565°C возможно образование жидкой фазы эвтектического состава, отличающейся после кристаллизации низкой прочностью и высокой хрупкостью. Равномерный характер распределения всех элементов в переходном слое (см.рис.4) свидетельствует об отсутствии их механического перемещения.

Микротвердость в зоне соединения алюминиевых сплавов можно снизить нагревом до 200°C и выдержкой в течение двух часов [3].



Р и с. 4. Распределение элементов свариваемых материалов в зоне соединения А1 + I2X18H10T

В состав "белых фаз" соединений разнородных металлов могут входить термически устойчивые интерметаллиды, твердость которых не изменяется при термической обработке. Размеры таких включений при длительном нагреве могут расти, а в соединениях, не имеющих интерметаллидов после сварки, при термической обработке возможно их появление. В частности, отжиг биметалла АД1+Т2Х18Н10Т при температуре 525°C в течение трех часов приводит к появлению в зоне соединения сплошного слоя интерметаллидов шириной 14-15 мм с твердостью $H_B = (848-1275)10^7 \text{ Па}$.

Наличие зон с повышенной твердостью в сварках соединений является нежелательным, так как снижает их прочностные характеристики. Сплошной малопрочный хрупкий слой по всей свариваемой поверхности может быть разрушен волнами разгрузки еще в процессе сварки (рис. 3, з).

Интересно сопоставление энергетических параметров магнитно-импульсной сварки с другими процессами. Согласно работе [5] для образования стыкового соединения стальных стержней диаметром 20 мм при дуговой сварке требуется удельная энергия 1800 Дж/мм², при стыковой сварке оплавлением - 400 Дж/мм², при сварке трением 130 Дж/мм²; для соединения встык пластин из алюминиевого сплава толщиной 3-5 мм при аргоно-дуговой сварке - 300 Дж/мм², при контактной сварке - 200 Дж/мм², при холодной сварке - 30 Дж/мм². При магнитно-импульсной сварке трубчатых деталей из сплава АД1 с трубчатыми деталями из сплава АМг-3М требуется удельная энергия 4-10 Дж/мм².

Выводы

1. На основе сопоставления геометрических характеристик сварного соединения с диаграммой движения метаемого элемента установлен механизм образования соединения при магнитно-импульсной сварке.

2. Топография зоны сварного соединения при магнитно-импульсной сварке определяется начальной ориентировкой свариваемых поверхностей, распределением давления магнитного поля по поверхности метаемого элемента, формой фронта контакта и характером его движения.

3. Микрорентгеновский анализ показывает, что при отсутствии новых фаз между соединяемыми металлами заметной диффузии одного металла в другой не наблюдается.

4. При некоторых условиях сварки разнородных металлов имеет место образование зон с повышенной твердостью, снижающих прочность соединения.

5. Магнитно-импульсная сварка является менее энергоемким процессом по сравнению с такими способами сварки, как аргоно-дуговая, контактная и холодная.

Л и т е р а т у р а

1. Г е л ь м а н А.С. Основы сварки давлением. М.: Машностроение, 1970.
2. В о л о б у е в И.В., Л е г е з а А.В. - Сварочное производство, № 8, 1972.
3. В о л о б у е в И.В., Л е г е з а А.В. - В кн.: Магнитно-импульсная обработка металлов, № 94, вып. 2, (Вестник ХПИ), Харьков: Выща школа, 1974, с. 49-52.
4. К а л а ч е в В.А., Л и в а н о в В.А., Е л а г и н В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1972. 480с.

УДК 621.791.76:621.7.044.2

П.А.Бордаков, Н.В.Дашкин, И.С.Гришин, В.И.Любимов

РОЛЬ ДИФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ СБОРКЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Сложность и многообразие процессов, протекающих в зоне контактного взаимодействия соединяемых металлических поверхностей, существенно затрудняет выбор оптимальных значений параметров технологических процессов сборки (механического крепления, сварки давлением, клевки) элементов конструкций летательных аппаратов и прогнозирование их работоспособности в условиях эксплуатации. Актуальность этой проблемы значительно возрастает в связи с необходимостью создания и эксплуатации сборных конструкций в экстремальных условиях (вакуум, температурные перепады и др.).