



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

**Молодежная научно-практическая конференция АО «ВНИИНМ»
«Материалы и технологии в атомной энергетике», июнь 2021**

ВОЗМОЖНЫЕ ДЕФЕКТЫ В СВАРНЫХ ШВАХ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРЫ ПО ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ

Авторы: И.С. Гареев, А. Г. Филимоненко, С.А. Собко, М.С. Писарев

В работе рассмотрены типичные поверхностные и объемные дефекты в сварных швах конструкций из титанового сплава ОТ4 и алюминиевого сплава АМгб, изучены причины их возникновения при ручной и автоматической АДС, а также предложен ряд технологических мер, включая конструктивные решения по их предотвращению применительно к данным сплавам.

Основные положения



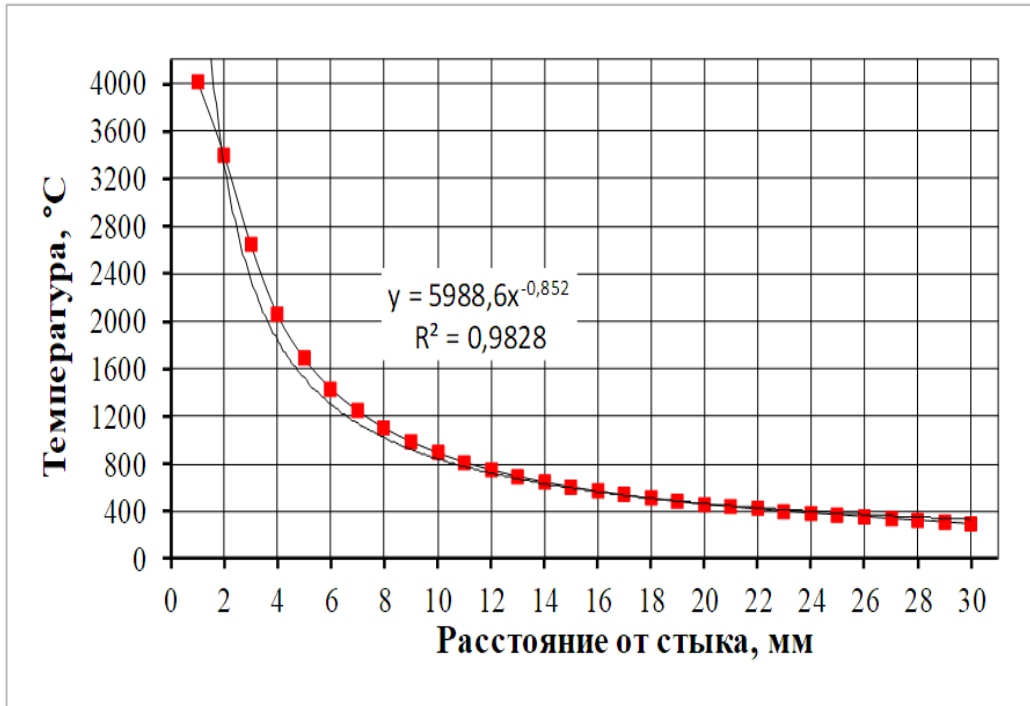
1. Проблема свариваемости легких сплавов (ОТ4, АМг6) актуальна для корпусных конструкций, изготовленных с применением ручной и автоматической аргодуговой сварки (АДС).
2. Работоспособность сварных конструкций во многом определяется непосредственно качеством сварных швов.
3. При ручной АДС качество сварки зависит от квалификации сварщика. Колебание электрода, изменение длины дугового промежутка и значений параметра скорости сварки вызывают неравномерный нагрев свариваемых кромок, который может спровоцировать появление различных дефектов.
4. Технологии автоматической сварки, по сравнению с ручной, обеспечивают стабильность процесса формирования шва, но не исключают возможности образования дефектов как технологического, так и металлургического происхождения .
5. Уменьшению массы сварных конструкций способствует ориентация на конструктивно-технологическое обеспечение равнопрочности соединений при сварке со сквозным проваром и контролируемым формированием корня шва.
6. Сварка со сквозным проваром, в том числе легких сплавов с точки зрения качества шва сопровождается рядом определенных трудностей .

Постановка задачи

- Анализ типичных дефектов в сварных швах конструкций из титанового сплава ОТ4 и алюминиевого сплава АМг6 и причин их возникновения при ручной и автоматической АДС;
- Разработка технологических мер и конструктивных решений по их предотвращению.

Свариваемость сплава ОТ4

Расчетно-экспериментальное моделирование тепловых процессов при дуговой сварке



Распределение максимальной температуры нагрева в поперечном сечении соединения

На свариваемость влияет химическая активность титана по отношению к газам (кислороду, водороду и азоту).

Установлено, что концентрационный пик содержания водорода в ОШЗ на определенном расстоянии от оси шва (от 25 до 33 мм) является доминирующим фактором разрушения образцов сварных соединений титановых пластин.

Рекомендовано защищать остывающие участки ОШЗ до расстояния от оси шва, соответствующем температуре порядка 300 °C и ограничивать содержание водорода в сплаве ОТ4 (не более 0,0026%).

Поверхностные и объемные дефекты в сплаве ОТ4

Цвета побежалости, кроме серебристого и бледно-желтого, являются недопустимыми для кратера шва

Поверхностное окисление сварного соединения из сплава ОТ4



цвета побежалости



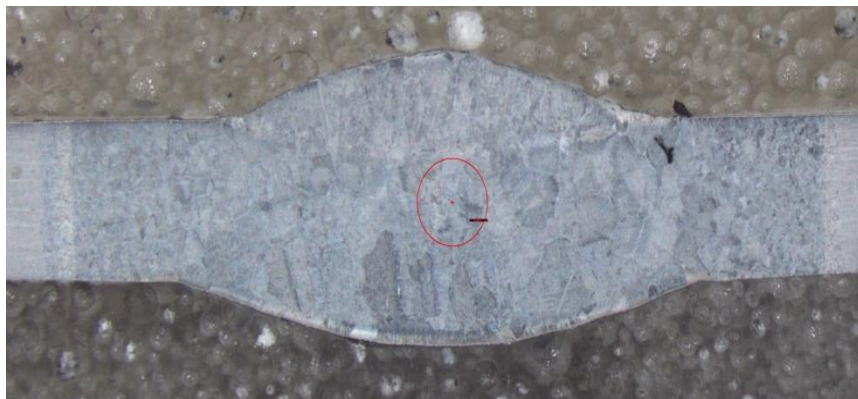
увеличенный участок шва

Поверхностные дефекты обусловлены некачественной защитой соединения с наружной стороны в процессе сварки.

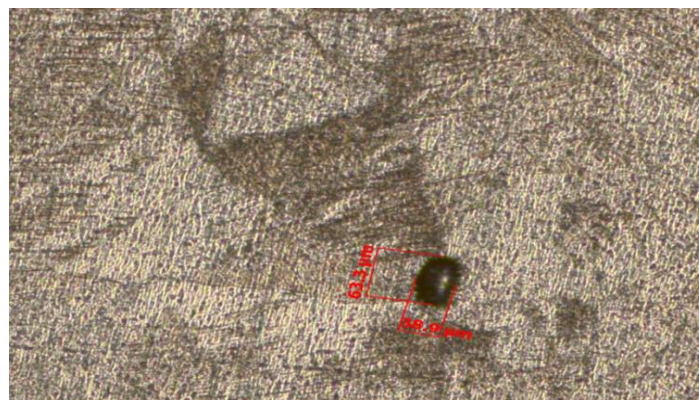
Поверхностные и объемные дефекты в сплаве ОТ4

Пористость при сварке титана

Снимок шлифа поперечного сечения сварного соединения из сплава ОТ4



дефект в виде поры, 10^x



размеры пор (увеличено), 100^x

Причины возникновения пор при сварке титана:

- Наличие водорода;
- Качество подготовки свариваемых кромок;
- Качество поверхностей применяемых сварочных материалов.

Математическое моделирование процесса распространения теплоты в пластине



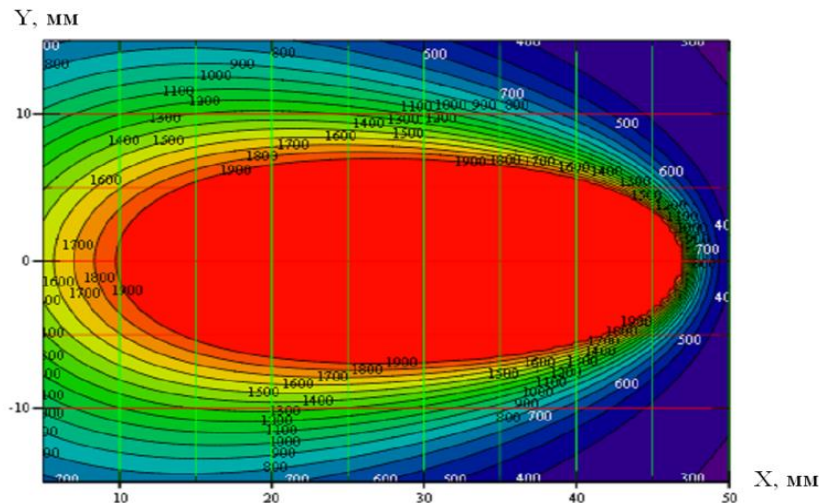
РОСАТОМ

Расчетное уравнение – «линейный источник-бесконечная пластина»

$$dT(x, y) = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \delta} \cdot \exp\left(\frac{g \cdot x}{2 \cdot a}\right) \cdot K_0\left(\frac{g \cdot r(x, y)}{2 \cdot a} \sqrt{1 + \frac{4 \cdot a \cdot b}{g^2}}\right)$$

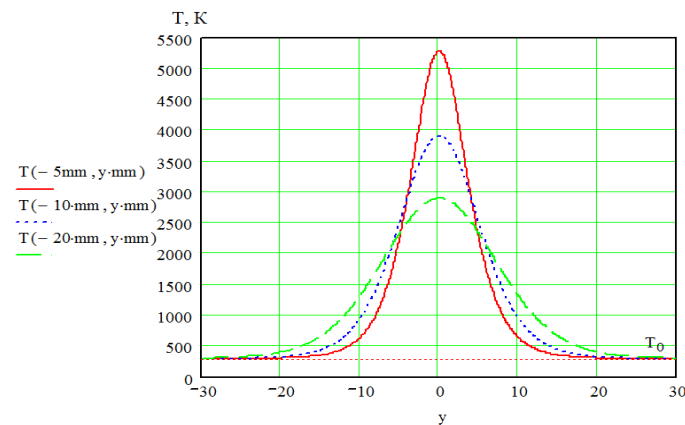
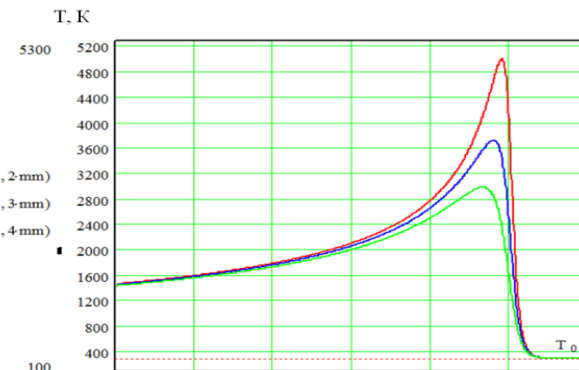
Расчетное уравнение для стадии теплонасыщения:

$$dT_H(x, y, t_H) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \delta} \cdot \exp\left(\frac{v \cdot x}{2 \cdot a}\right) \int_0^{t_H} \frac{1}{t} \cdot \exp\left(\frac{v^2 \cdot t}{4 \cdot a} - \frac{r(x, y)^2}{4 \cdot a \cdot t}\right) dt$$



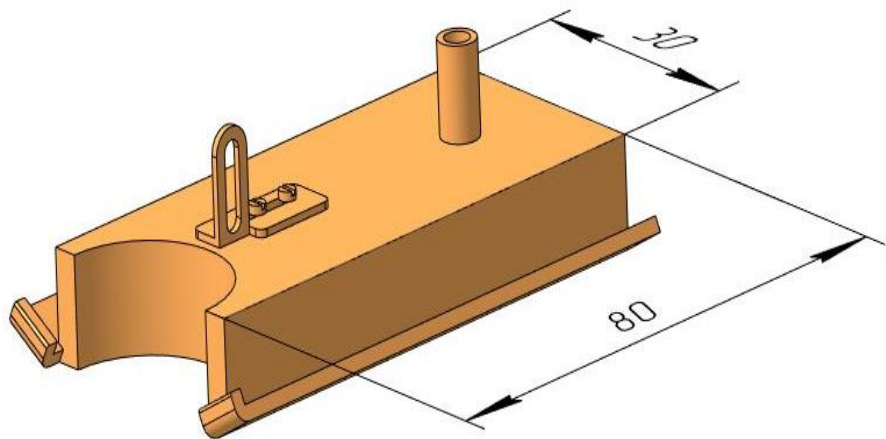
Температурное поле в пластине толщиной 2,5 мм

Определены участки сварного соединения с критической для нагрева температурой и соответствующие размеры защитного приспособления от окисления при сварке.



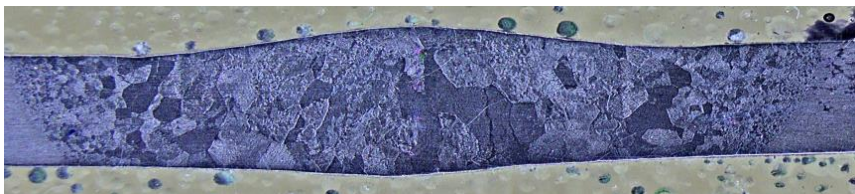
Термические циклы сварки

Технологические меры по предотвращению дефектов



Длина защитного приспособления **80 мм**,
ширина – **30 мм**

3D-модель конструкции защитного приспособления



Поперечное сечение соединения, 10^x

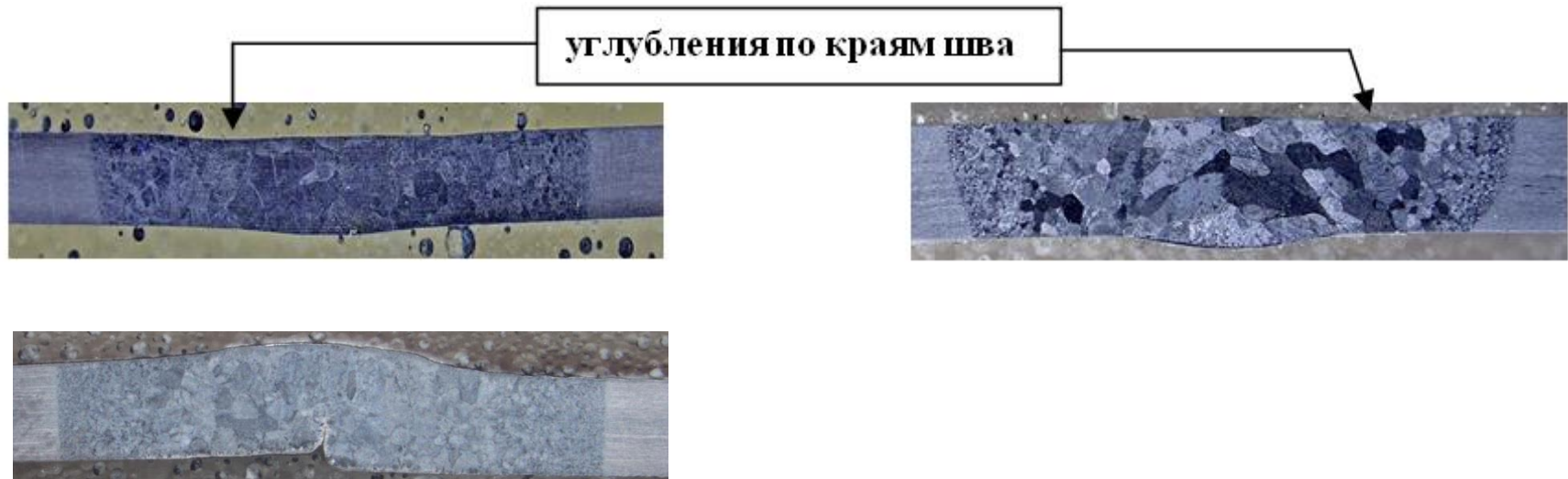


Внешний вид соединения

Сварное соединение, полученное с применением защитного приспособления, сформировано равномерно на всем протяжении стыка, без цветов побежалости и внутренних дефектов в виде пор

Дефекты формирования шва в сплаве ОТ4

Дефекты, уменьшающие рабочее сечение сварного шва и в виде концентраторов напряжений, являются недопустимыми, так как оказывают отрицательное влияние на выносливость и долговечность сварных соединений из титана, а также на их равнопрочность.

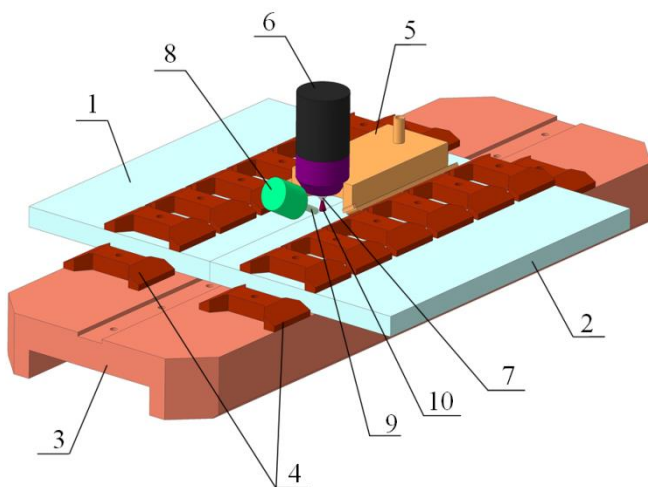


При выполнении автоматической односторонней сварки соединений толщиной до 2,5 мм без разделки кромок вероятно образование непроваров, подрезов и углублений.

Технологические меры по предотвращению дефектов

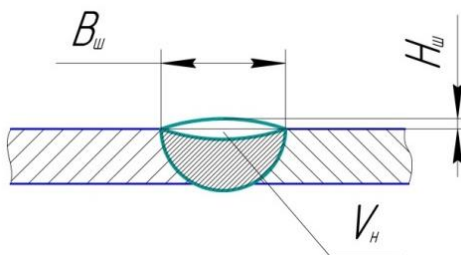
Разработка усовершенствованного варианта сварки

3D-схема процесса сварки



1, 2 – свариваемые детали, 3 – подкладка, 4 – прижимы, 5 – насадок, 6 – сварочная горелка, 7 – неплавящийся электрод, 8 – механизм подачи сварочной проволоки, 9 – сварочная проволока, 10 – сварочная дуга

В модели фактическая форма наплавленного металла сварного шва представляет собой эллипс



$B_{ш}$ – ширина шва,
 $H_{ш}$ – высота усиления,
 S_H – площадь усиления

Выпуклость с наружной стороны и ширина шва обеспечены скоростью подачи присадочной проволоки:

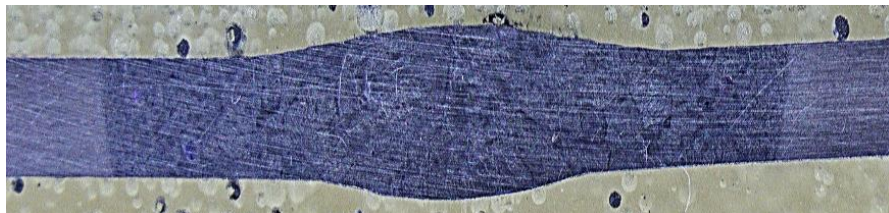
$$U_{н.пр.} = K \cdot U_{св.} \quad K = \frac{2B_{ш} \cdot H_{ш}}{d_{н.пр.}^2}$$

k - коэффициент, характеризующий объем наплавленного металла присадочной проволоки,
 $d_{н.пр.}$ - диаметр присадочной проволоки

Предложен вариант автоматической сварки за один проход с применением присадочной проволоки и с полным проплавлением

Технологические меры по предотвращению дефектов

Отсутствие подрезов и непровара при фактических размерах выпуклости швов гарантирует запас прочности шва по отношению к прочности основного металла.



Толщина 1,5 мм



Толщина 2,5 мм

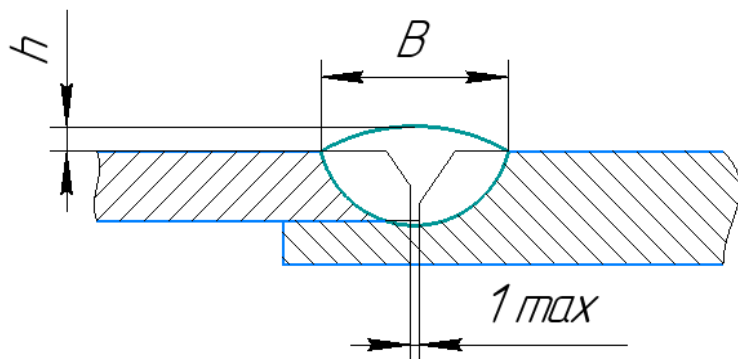
Снимки шлифов поперечных сечений сварных соединений из сплава OT4

Предложенный вариант по результатам освоения технологии показал свою эффективность в части обеспечения необходимой конфигурации по ширине и выпуклости сварного шва при условии сквозного провара.

Свариваемость сплава АМг6

Высокая химическая активность алюминия и его сплавов к кислороду с образованием оксидной пленки; склонность к образованию пор в металле шва из-за влияния водорода; склонность шва к утяжкам, ослаблениям, прожогам, «провалам» при сварке на весу.

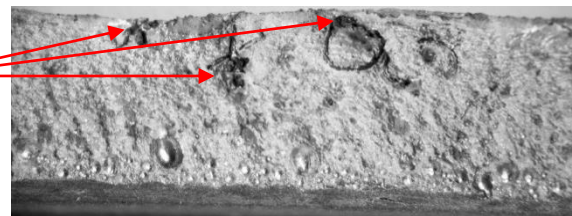
Базовая конструкция стыкового соединения замкового типа



Цепочка пор

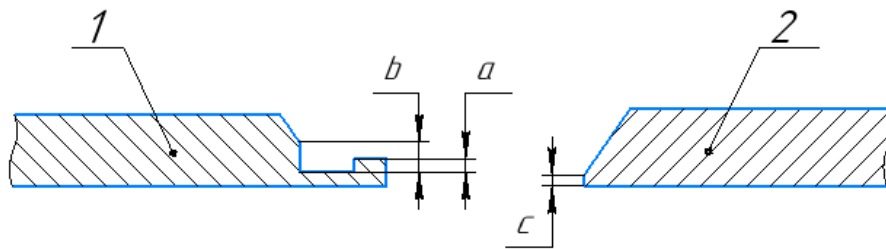


Свищи

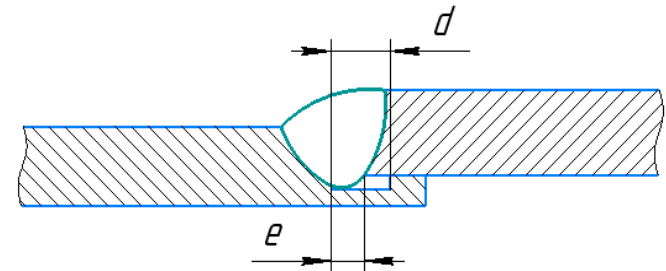


По результатам автоматической сварки образцов в виде пластин **выявлены дефекты** в виде цепочки пор разного размера в корне шва и свищей в верхней части шва

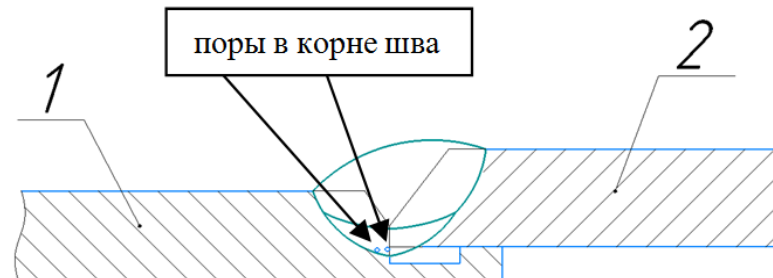
Новая конструкция разделки кромок



Технологическая канавка
Характерные размеры a , b , c , d , e



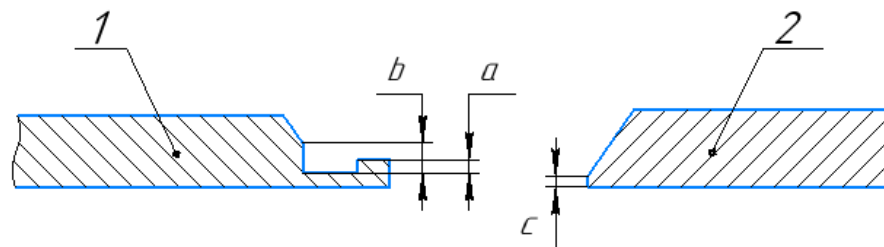
Схематичное изображение
конфигурации шва



При сварке с симметричным расположением сварного шва относительно стыка свариваемых деталей отмечено образование пор в корне шва со стороны детали 1 при условии $c = b - a$.

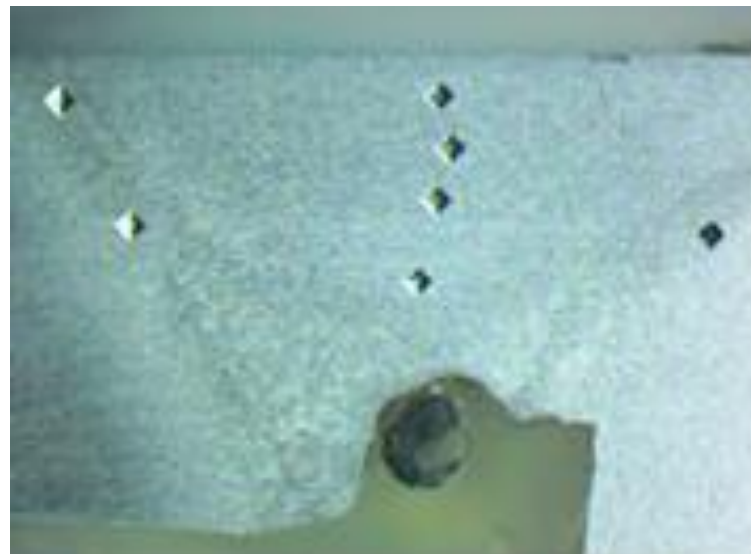
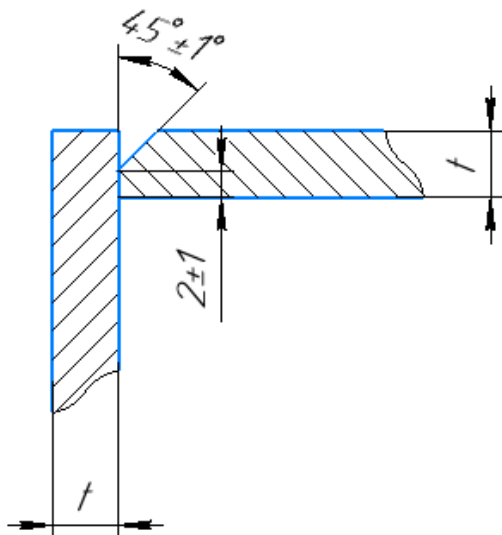
Усовершенствованная технология сварки

При дуговой автоматической сварке выполнено условие $c < b - a$, обеспечивающее смещение корня сварного шва шириной e в сторону технологической канавки шириной d .



Шов, смещенный в сторону канавки, сформирован без внутренних дефектов в виде пор, трещин и непроваров

Дефекты шва при ручной сварке



вертикальное угловое соединение

дефект в корне сварного шва

При ручной АДС со сквозным проваром угловых соединений несущих конструкций из алюминиевых сплавов отмечены дефекты в виде утяжки корня шва или вогнутости.

Усовершенствованная угловая конструкция

Введена двухсторонняя разделка кромок с меньшими величинами притупления и угла скоса кромок

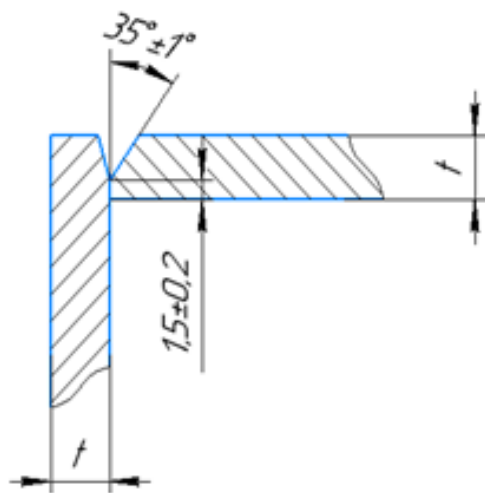
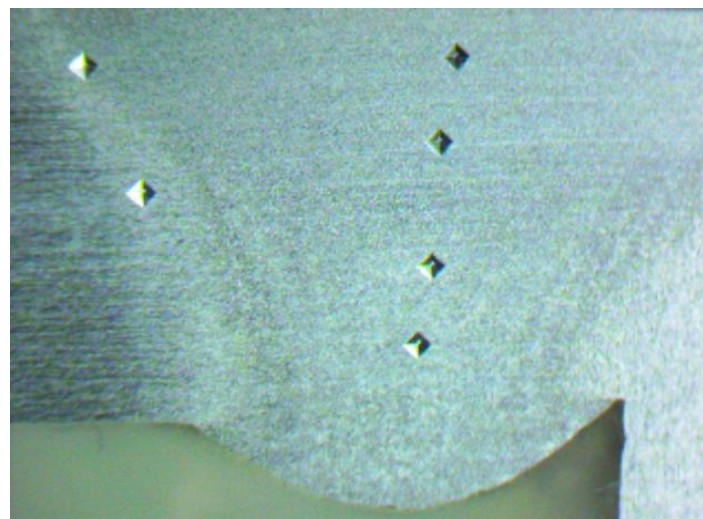


схема углового соединения



вид шлифа поперечного сечения сквозного шва, 12,5^x

При ручной АДС со сквозным проваром угловых соединений усовершенствованной конструкции корень сварного шва формируется в контролируемом режиме, без характерных дефектов в корневой части.

Усовершенствованная технология многопроходной сварки



При многопроходной непрерывной автоматической сварке толстостенных соединений (от 8 до 12 мм) из алюминиевого сплава АМгб (с заполнением разделки присадочной проволокой) со сквозным проваром и формированием шва на весу отмечено аномальное провисание его корня, достигающее 25% от толщины соединения.



Аномальное провисание корня шва



Допустимое провисание корня шва

Предложена технология прерывистого формирования шва при автоматической аргодуговой сварке, предусматривающая охлаждение швов до температуры 30 °С после первых шести проходов с исключением автоподогрева при перекрытиях швов, а также оптимизацию режимов сварки в части уменьшения уровня погонной энергии заполняющих проходов. Это позволило обеспечить контролируемое провисание корня шва (не более 10% от его толщины).

Заключение

- 1. Обсуждены практические проблемы дефектности сварных швов соединений из легких сплавов титана ОТ4 и алюминия АМг6 при ручной и автоматической АДС со сквозным проваром.**
- 2. К разработанным технологическим мероприятиям, обеспечивающим предотвращение дефектов за счет изменения процесса сварки можно отнести: применение нового метода сварки за один проход с применением сварочной проволоки; применение специальных защитных приспособлений; установленные временные перерывы в многопроходной сварке; регламентированное смещение шва относительно стыка, а также изменение режимов сварки, вызванное усовершенствованием разделки кромок соединений.**
- 3. Разработка и усовершенствование конструкций сварных соединений из сплава АМг6 позволили избежать образование дефектов шва при ручной и автоматической АДС.**
- 4. Набор конструктивно-технологических решений, с применением, в том числе, математического моделирования термического цикла сварки, позволил во всех рассмотренных случаях предотвратить дефекты автоматической АДС, выполняемой как с применением присадочной проволоки, так и без нее. Эффективность разработанных мер предотвращения дефектов подтверждена результатами системных исследований и направлена на обеспечение равнопрочности соединений при сварке со сквозным проваром и контролируемым формированием корня шва на весу или на подложке.**