



ВЛИЯНИЕ МАКРОВКЛЮЧЕНИЙ ОКСИДНОЙ ПЛЕНЫ НА ПРОЧНОСТЬ ШВОВ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА АМг6

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние макровключений оксидной пленки в швах на механические свойства швов, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом алюминиевого сплава АМг6 толщиной 6...12 мм. Получены зависимости прочности швов от площади таких дефектов, выходящих на поверхность со стороны проплава и находящихся внутри шва. По ним можно судить о допустимом уровне макровключений оксидной пленки в швах при изготовлении сварных конструкций.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка, неплавящийся электрод, алюминиевый сплав АМг6, макровключения оксидной пленки, временное сопротивление, протяженность дефектов

При изготовлении сварных конструкций ответственного назначения из алюминиевых сплавов значительную часть швов выполняют аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом (АДС-НЭ). Этот способ сварки позволяет получать качественные швы с гладкой лицевой поверхностью, плавным переходом к основному металлу, без подрезов, наплывов и брызг. Прочность стыковых соединений сплава АМг6 толщиной 6...12 мм, полученных однопроходной АДСНЭ, составляет 95 или 75 % прочности основного металла соответственно в отожженном или нагартованном состоянии [1, 2]. Однако при изготовлении крупногабаритных сварных конструкций вследствие нарушения требований к подготовке свариваемых кромок, точности их сборки и фиксации, а также изменения технологических параметров процесса сварки в швах довольно часто образуются макровключения оксидной пленки [3]. Наличие таких дефектов может приводить к снижению механических свойств сварных соединений [4, 5].

Цель настоящей работы — определить степень влияния макровключений оксидной пленки на прочность швов, выполненных АДСНЭ на алюминиевом сплаве АМг6 толщиной 6...12 мм.

Исследовали стыковые соединения, полученные на листах алюминиевого сплава АМг6 размером 400×200 мм автоматической однопроходной АДСНЭ со скоростью 12 м/ч с использованием присадочной проволоки СвАМг6 диаметром 2,5 мм. Питание дуги осуществляли от разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона опытного источника питания И-160, позволяющего независимо регулировать длительность $\tau_{пр}$, $\tau_{обр}$ и амплитуду $I_{пр}$,

$I_{обр}$ тока соответственно при прямой и обратной полярности. Материал толщиной 6 мм сваривали симметричным током ($I_{пр} = I_{обр} = 360$ А; $\tau_{пр} = \tau_{обр} = 10,4$ мс). Чтобы обеспечить необходимую стойкость неплавящегося электрода (иттрированный вольфрамовый прутки диаметром 10 мм), при сварке металла толщиной 12 мм использовали асимметричный по амплитуде ток ($I_{пр} = 780$ А, $I_{обр} = 440$ А). Для гарантированного получения макровключений оксидной пленки в швах сборку стыков осуществляли с фиксированным зазором (1,2 мм при толщине листа 6 мм и 1,6 мм при толщине листа 12 мм) между кромками [6]. Перед сваркой листы и сварочную проволоку подвергали химическому травлению по общепринятой технологии. С целью получения в швах дефектов большой площади часть стыков сваривали без предварительной механической зачистки поверхностей и торцов свариваемых кромок.

Из полученных соединений изготавливали стандартные образцы для определения временного сопротивления металла швов. Чтобы разрушение образцов происходило по шву в месте нахождения дефекта, усиление и проплавы удаляли заподлицо с основным металлом. При испытании образцов в условиях статического растяжения фиксировали реальную нагрузку P , при которой происходило их разрушение. На образце перед его испытанием измеряли площадь поперечного сечения шва $F_{ш}$ с целью определения временного сопротивления металла швов. После разрушения образцов в изломах швов с помощью микроскопа МБС-2 определяли площадь макровключений оксидной пленки $F_{о.п}$. Все дефекты по характеру их залегания в швах подразделяли на открытые (выходящие на поверхность со стороны проплава) и закрытые (находящиеся внутри шва) (рис. 1). Отдельно для каждой группы дефектов определяли относительную площадь $F_{о.п}/F_{ш}$ макровключений

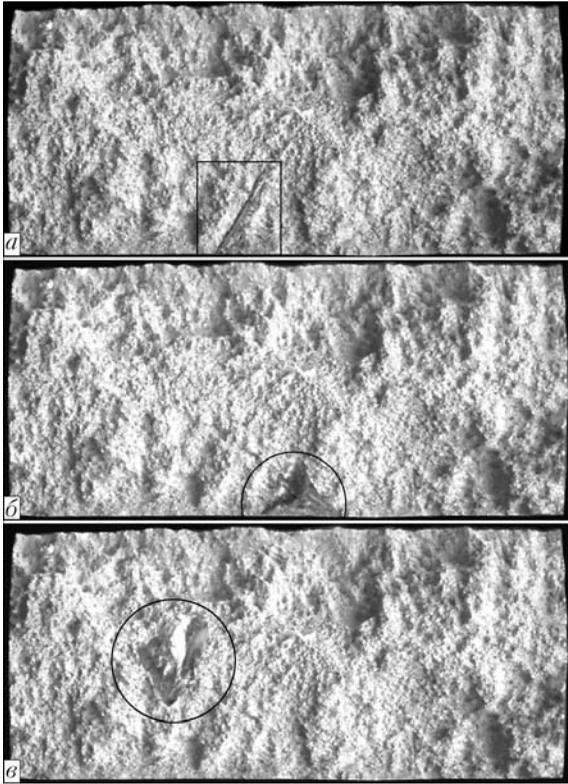


Рис. 1. Макровключения оксидной пленки в изломах разрывных образцов металла швов, выполненных АДСНЭ на алюминиевом сплаве АМг6 толщиной 12 мм: а, б — открытые, соответственно тонкие протяженные и сосредоточенные; в — закрытые

чений оксидной пленки. Для расчетов использовали средние значения показателей, полученных по результатам испытаний 10...15 образцов.

Чтобы выяснить, в какой степени такие макровключения проявляют себя как концентраторы напряжений при растяжении образцов толщиной 6 мм, вычисляли площадь рабочего сечения шва $F_p = F_{ш} - F_{о.п}$ без учета площади дефекта. Затем исходя из предела прочности бездефектных швов

находили расчетное значение нагрузки P_p , при котором происходило бы разрушение качественных образцов с различной площадью сечения шва. Кроме того, на отдельных образцах оценивали ударную вязкость и угол загиба швов, металл которых содержит макровключения оксидной пленки.

Анализ изломов образцов показал, что в большинстве случаев макровключения оксидной пленки находятся в нижней (корневой) части шва, составляющей примерно 25 % толщины свариваемого металла. Все они имеют различную форму и протяженность, но по общему виду могут быть условно разделены на две группы — тонкие (0,30...0,45 мм) протяженные (рис. 1, а) и сосредоточенные, близкие по форме к треугольнику (рис. 1, б). Как правило, после снятия проплава шва основное количество таких дефектов оказывается открытым и может быть легко обнаружено визуально. Незначительная часть дефектов остается внутри шва и необходимо применение рентгеновского или ультразвукового контроля для комплексной оценки качества сварных соединений толстолистового сплава АМг6, полученных АДСНЭ.

Все исследованные с помощью сканирующего микроскопа макровключения оксидной пленки были очень тонкими (от $6 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-2}$ мм) и имели различные цветовые оттенки. Наиболее тонкие пленки — блестящие, под их поверхностью четко просматриваются фрагменты структуры металла шва (рис. 2, а). Черные по цвету пленки имели большую толщину, отличались хрупкостью, о чем свидетельствует наличие микротрещин в их структуре (рис. 2, б).

Для оценки влияния макровключений оксидной пленки на прочность швов, выполненных АДСНЭ на листе сплава АМг6 толщиной 6...12 мм, построены кривые (рис. 3). Полученные резуль-

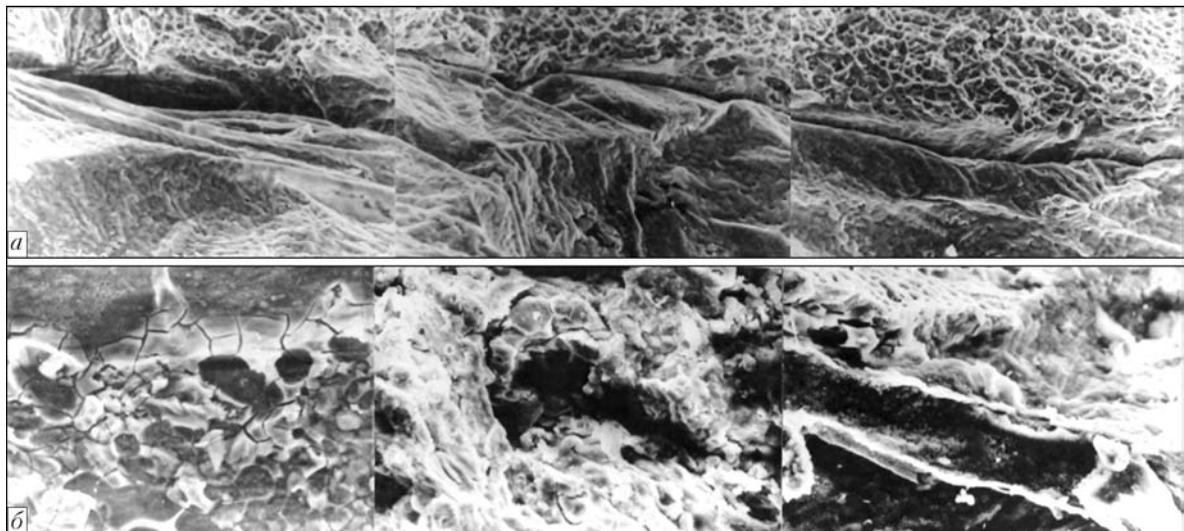


Рис. 2. Фрактограммы (X500) поверхности разрушенных швов, выполненных на сплаве АМг6, в области макровключений оксидной пленки: а, б — см. в тексте



таты свидетельствуют о существенном влиянии на прочность швов даже незначительных по площади дефектов. Так, наличие закрытого дефекта, составляющего всего 1 % площади шва, снижает его временное сопротивление σ_b с 315 до 300 МПа, а такого же по площади открытого дефекта — до 285 МПа. При увеличении относительной площади макровключений оксидной пленки до 2 % временное сопротивление швов уменьшается до 285 МПа при расположении их внутри шва и до 248 МПа при выходе их на поверхность. Если относительная площадь дефектов составляет 6 % площади шва, то в зависимости от их расположения временное сопротивление металла швов может снизиться на 20...30 %.

По-видимому, открытые дефекты не только уменьшают рабочее сечение шва из-за отсутствия прочного адгезионного взаимодействия между поверхностями макровключений оксидной пленки и металла шва, но и служат концентраторами напряжений при нагрузке. Это полностью подтверждается при сравнении расчетных значений нагрузок, при которых бы бездефектные образцы с различной площадью сечения швов разрушались, и реальных нагрузок, при которых происходит разрушение образцов с дефектами (рис. 4). Расчетные значения нагрузок при любой площади дефекта превосходят реальные, но с ее повышением разница между ними увеличивается.

Следовательно, продольные макровключения оксидной пленки могут представлять наибольшую опасность для продольных швов цилиндрических сосудов, кольцевых и круговых швов сферических сосудов, поскольку в этих соединениях при нагружении наибольшие главные напряжения действуют перпендикулярно шву. В сварных конструкциях ответственного назначения предъявляются высокие требования к прочности швов. Поэтому исходя из назначения и условий их эксплуатации отраслевыми стандартами и производственными инструкциями устанавливаются размеры допускаемых макровключений оксидной пленки в металле швов.

Определить протяженность допускаемых дефектов в швах можно исходя из полученных зависимостей (рис. 3). Например, для конструкции ответственного назначения временное сопротивление швов должно обеспечиваться на уровне 280 МПа. Как видно из графика, площадь открытых дефектов в швах при этом может составлять примерно 1 % площади поперечного сечения образца, т. е. около 1 мм² для металла толщиной 6 мм. Поскольку максимальная глубина залегания сосредоточенных дефектов не превышает 1/4 высоты шва (1,5 мм), а форма близка к треугольной, то длина их на испытуемом образце не должна быть более 1,3 мм. Для металла толщиной 12 мм площадь поперечного сечения разрывного образ-

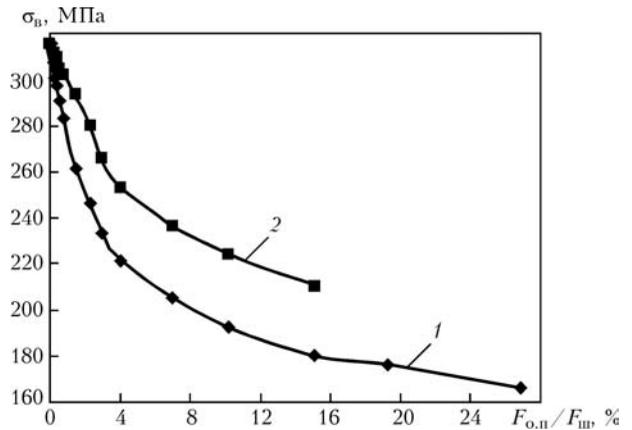


Рис. 3. Зависимость временного сопротивления σ_b металла швов, выполненных АДСНЭ на алюминиевом сплаве АМг6 толщиной 6...12 мм, от относительной площади макровключений оксидной пленки при открытых (1) и закрытых (2) дефектах

ца составляет 300 мм², а следовательно, допустимая площадь макровключений оксидной пленки составляет 3 мм², а максимальная длина дефектов — 2 мм. Но среди общего количества дефектов примерно половину составляют тонкие (0,30...0,45 мм) протяженные. Если считать такие дефекты прямоугольными, то допустимая их длина для образцов из металла толщиной 6 мм не должна превышать 3,5 мм, а из металла толщиной 12,0 – 6,7 мм. Усредняя полученные расчетным путем значения их протяженности, устанавливаем, что при изготовлении конструкций из сплава АМг6 толщиной 6 мм длина допустимых макровключений оксидной пленки, выходящих на поверхность со стороны проплава, составляет 2,4 мм. С увеличением толщины свариваемого металла до 12 мм допустимая длина таких дефектов в швах повышается до 4,3 мм. Полученные резуль-

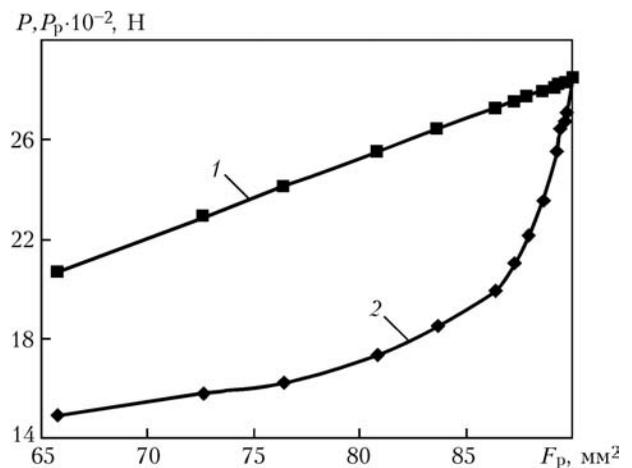


Рис. 4. Зависимость реальной P (1) и расчетной P_p (2) нагрузки, приводящей к разрушению образцов швов, выполненных АДСНЭ на алюминиевом сплаве АМг6 толщиной 6 мм, от площади рабочего сечения шва F_p



таты согласуются с требованиями, предъявляемыми существующими отраслевыми стандартами к качеству сварных соединений. Так, например, при изготовлении корпусных изделий космической техники из сплава АМг6 допускается наличие в швах макровключений оксидной пленки протяженностью не более 2,5 мм при толщине свариваемого металла 6 мм и не более 4,0 мм при толщине свариваемого металла 12 мм. Для закрытых дефектов может допускаться двукратное увеличение их длины, поскольку они в меньшей степени снижают прочность швов.

Ударная вязкость и угол загиба швов при увеличении площади макровключений оксидной пленки снижаются более резко, чем их прочность. Если прочность швов, содержащих открытые дефекты площадью 1 % площади шва, снижается примерно на 10 %, то ударная вязкость и угол загиба швов, содержащих такие же по площади макровключения оксидной пленки, уменьшаются в среднем на 20 %. Это свидетельствует о более высокой чувствительности указанных показателей к концентрации напряжений под воздействием нагрузок при испытаниях. Поэтому при АДСНЭ изделий из алюминиевого сплава АМг6 необходимо обеспечивать требуемую точность подготовки, сборки и фиксации кромок, а также строго соблюдать технологические параметры процесса сварки во избежание образования макровключений оксидной пленки в металле швов. В случае последующего деформирования или ударного нагружения швов в процессе изготовления конструкций целесообразнее выполнять их плазменно-дуговой сваркой, позволяющей за счет высокой концентрации плазменной струи избежать образования в корневой части швов дефектов, характерных для АДСНЭ, и обеспечить высокие механические свойства сварных соединений.

Таким образом, можно заключить, что макровключения оксидной пленки в металле швов, являющиеся наиболее характерным дефектом при АДСНЭ алюминиевого сплава АМг6, существенно снижают механические свойства швов. Наиболее опасны дефекты, выходящие на поверхность со стороны проплава, поскольку они не только уменьшают рабочее сечение шва, но и являются концентраторами напряжений при нагрузках. При наличии в образце открытого дефекта, занимающего 1 % площади сечения шва, выполненного АДСНЭ на алюминиевом сплаве АМг6 толщиной 6...12 мм, временное сопротивление швов снижается на 10 %, а их ударная вязкость и угол загиба — на 20 %. С помощью полученной зависимости временного сопротивления от относительной площади макровключений оксидной пленки в металле швов можно определять размеры допустимых дефектов исходя из требований, предъявляемых к сварным конструкциям.

1. *Машин В. С., Покляцкий А. Г., Федорчук В. Е.* Механические свойства соединений алюминиевых сплавов при сварке плавящимся и неплавящимся электродом // Автомат. сварка. — 2005. — № 9. — С. 43–49.
2. *Рабкин Д. М.* Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.
3. *Покляцкий А. Г.* Особенности образования макровключений оксидной пленки в металле швов алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2001. — № 39. — С. 38–40.
4. *Воропай Н. М., Манжелей Г. П.* Выявление окисных включений в швах на алюминиевых сплавах // Там же. — 1969. — № 3. — С. 71–72.
5. *Макаров И. И., Волынский В. Н., Прохоров Н. Н.* Влияние пор и окисных включений на прочность сварных соединений сплава АМг6 // Там же. — 1976. — № 4. — С. 27–30.
6. *Ищенко А. Я., Покляцкий А. Г., Яворская М. Р.* Предотвращение включений оксидной пленки в швах при аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов // Там же. — 1989. — № 6. — С. 38–41.

Effect of macro oxide film inclusions on mechanical properties of welds made on aluminium alloy AMg 6, 6...12 mm thick, by TIG welding in argon atmosphere has been investigated. Relationships between strength of the welds and surface area of such defects escaping to the surface on the side of penetration and located inside the weld have been derived. The relationships can be used to estimate admissibility of macro oxide film inclusions in the welds in fabrication of welded structures.

Поступила в редакцию 10.04.2008