

УДК 621.791  
DOI: 10.12737/article\_5928313a0cf047.54579014

**В.В. Овчинников, д.т.н.,  
Л.П. Андреева, к.т.н.,  
Т.Д. Любимова, к.т.н.**  
(ФГБОУ ВО "Московский политехнический университет",  
105023, Москва, ул. Б. Семеновска, д. 38)  
E-mail: vikov1956@mail.ru

## **Оксидные включения в швах алюминиевых сплавов, полученных методом сварки трением с перемешиванием**

*Представлены результаты влияния различной подготовки поверхности кромок на структуру металла шва и прочностные характеристики сварных соединений, полученных методом сварки трением с перемешиванием. В качестве объектов исследования были выбраны пластины из алюминиевых сплавов 1565, 1201, 1915, В-1341, 1420 и 1460 толщиной 5 мм, с различной обработкой кромок под сварку: зачисткой и обезжириванием; механической обработкой, для снятия поверхностного оксидного слоя; сварочной дугой переменного и постоянного тока, для «наращивания» поверхностного оксидного слоя и дальнейшего изучения его распределения в металле шва после процесса сварки. В статье представлены результаты исследования микроструктуры металла швов, а также результаты испытаний сварных соединений на прочность. Рассмотрено распределение оксида с поверхности кромок внутри металла шва и его влияние на прочностные свойства соединений.*

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы; сварка трением с перемешиванием; оксидные включения; распределение оксидов; прочность соединений.

**V.V. Ovchinnikov, D. Eng.,  
L.P. Andreeva, Can. Eng.,  
T.D. Lyubimova, Can. Eng.**  
(FSBEI HE "Moscow Polytechnic University", 38, B. Semyonovskaya, Moscow 105023)

## **Oxide inclusions in joints of aluminum alloys made by method of friction welding with mixing**

*The paper reports the results of the impact of different edge surfaces preparation upon the structure of a metal joint and strength characteristics of welds made by a method a friction welding with mixing. As objects of investigations there were chosen plates made of aluminum alloys 1565, 1201, 1915, V-1341, 1420 and 1460 with 5 mm thick with different edge machining for welding: by stripping and degreasing; by machining, for surface oxide layer removal; by AC and DC welding arc for "growing" a surface oxide layer and the further analysis of its distribution in a metal joint after welding. In the paper there are shown the results of metal joint micro-structure investigation and also test results of welds for strength. Oxide distribution from the surface of edge surfaces inside joint metal and its influence upon strength properties of joints is analyzed.*

**Keywords:** aluminum alloy; friction welding with mixing; oxide inclusions; oxide distribution; joint strength.

Развитие различных отраслей машиностроения предъявляет все более жесткие требования к надежности, прочности и коррозионной стойкости сварных соединений. При этом возникает потребность использования в сварных конструкциях материалов, разработанных на основе комплексных систем легирования и получаемых с помощью новых технологий. Упомянутые материалы, обладая необходимым комплексом физико-механических характеристик, зачастую имеют низкую свариваемость в условиях традиционных методов сварки плавлением. В этом аспекте повышенный интерес для их соединения представляют методы сварки давлением, при использовании которых формирование шва происходит без образования жидкой сварочной ванны.

Из группы методов сварки давлением для целей формирования соединений материалов с низкой свариваемостью при сварке плавлением, интерес представляет метод сварки трением с перемешиванием, при котором соединение свариваемых элементов осуществляется за счет локализации теплоты и пластической деформации в зоне формирования шва [1, 2]. Этот метод в настоящее время занял одно из ведущих мест для соединения деталей из алюминиевых сплавов при изготовлении летательных аппаратов, объектов космической техники и коммерческого транспорта, железнодорожных вагонов и судов.

Сварные швы алюминиевых сплавов, полученные сваркой трением с перемешиванием, как правило, отличаются высоким качеством, отсутствием дефектов, мелкозернистой структурой. Благодаря формированию деформированной мелкокристаллической структуры швов и меньшему нагреву металла в зоне сварки степень разупрочнения соединений алюминиевых сплавов ниже, а предел прочности выше, чем при их сварке плавлением.

Однако условия формирования и качество швов существенно зависят от параметров процесса сварки и различных технологических факторов.

К основным параметрам относят: радиус бурта  $r_6$  и конструктивные особенности рабочих поверхностей бурта и наконечника инструмента; угол наклона инструмента  $Q$  относительно вертикальной оси; усилие прижатия  $F$  рабочего инструмента к поверхностям свариваемых деталей; глубину погружения  $t$  бурта инструмента в свариваемый металл толщиной  $\delta$  и проникновения наконечника  $l_n$  в стык; частоту вращения  $\omega$  инструмента вокруг верти-

кальной оси; скорость сварки  $v_{св}$  (рис. 1).

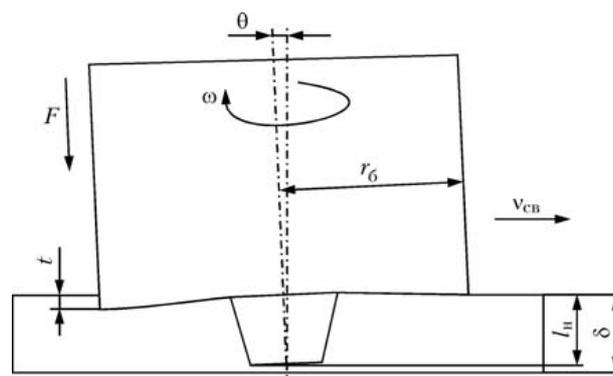


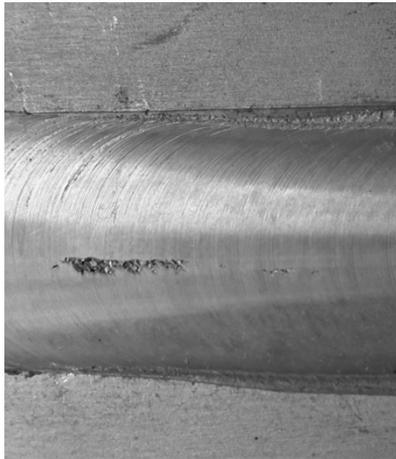
Рис. 1. Схема процесса СТП и его основные параметры

Стабильность процесса формирования швов и качество сварных соединений существенно зависят также от надежности фиксации свариваемых кромок, точности их подгонки и сборки, протяженности швов, конфигурации соединений и др. Эти технологические факторы могут приводить к возникновению чрезмерно больших зазоров в стыке, депланации кромок, смещению оси стыка относительно инструмента, а также к изменению некоторых параметров процесса сварки (усилия прижатия инструмента, глубины погружения бурта или проникновения наконечника). Вследствие неправильного выбора параметров СТП или их отклонения в процессе получения соединений, а также нарушения условий сборки и фиксации кромок в швах, как правило, образуются дефекты.

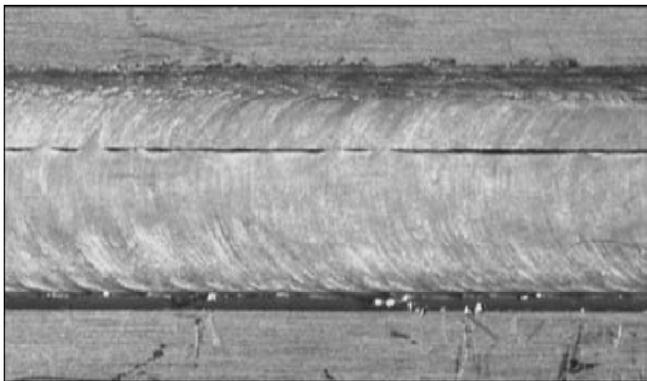
К основным причинам возникновения несплавлений на лицевой поверхности шва (рис. 2) можно отнести малый диаметр бурта инструмента; большой диаметр наконечника инструмента; значительное углубление на рабочей (торцевой) поверхности бурта инструмента в свариваемый металл; недостаточное усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей в процессе сварки; малая частота вращения инструмента; значительная скорость сварки; большой зазор в стыке и смещение оси стыка относительно инструмента; ненадежная фиксация свариваемых кромок [3, 4].

При использовании инструмента с малым диаметром бурта или большим диаметром наконечника, объема пластифицированного металла может быть недостаточно для полного заполнения освобождающегося за инструмен-

том пространства, в результате чего на лицевой поверхности шва образуется дефект в виде несплавления.



а)



б)

**Рис. 2. Вид лицевой поверхности шва с дефектом типа несплавление, выполненного СТП на алюминиевом сплаве 1565СМ толщиной 4 мм:**

а – локальное; б – протяженное

Для стабилизации процесса сварки на торцевой поверхности бурта инструмента делают небольшое кольцевое углубление, обеспечивающее плавное и непрерывное перемещение пластифицированного металла и формирования качественной лицевой поверхности шва.

Недостаточные заглабления бурта инструмента в свариваемый металл или усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей при сварке приводят к увеличению объема, заполняемого пластифицированным металлом при формировании шва, а следовательно, к снижению избыточного давления и образованию несплавления на лицевой поверхности шва протяженного типа.

При определенных соотношениях частоты вращения инструмента и скорости его перемещения по стыку выделяемого при трении

тепла может оказаться недостаточно для пластификации объема металла, необходимого для заполнения образуемой наконечником инструмента полости.

Наличие зазора в стыке также приводит к несплавлению, поскольку объема пластифицированного металла недостаточно для заполнения дополнительного пространства между свариваемыми кромками.

Недостаточная фиксация свариваемых кромок способствует возникновению зазора между ними, смещению оси стыка, депланации кромок и нарушению условий заглабления и прижатия бурта инструмента, в результате чего на лицевой поверхности швов образуются такие дефекты.

Причинами возникновения в швах несплавления в корневой части (рис. 3) являются недостаточные для данной толщины свариваемого металла длина наконечника, погружение бурта инструмента в свариваемый металл и усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей в процессе сварки; большое смещение оси стыка относительно инструмента; износ наконечника инструмента в процессе сварки.



**Рис. 3. Поперечный макрошлиф сварного соединения с несплавлением в корневой части шва (×25), полученного СТП на сплаве АМг5М толщиной 4 мм**

Для обеспечения надежного перемешивания металла по всей толщине свариваемых кромок и формирования качественных швов наконечник инструмента должен иметь определенную для каждой толщины свариваемого металла длину. Если наконечник инструмента проникает практически на всю толщину кромок, то выделяемого при СТП тепла и прикладываемого силового воздействия достаточно, чтобы границы раздела поверхностей свариваемых деталей приближались по размеру к межзеренным границам. Иначе в корневой части шва возникает дефект в виде несплавления.

ления.

Однако даже при правильном выборе длины наконечника инструмента при СТП необходимо обеспечить требуемое погружение бурта инструмента в свариваемый металл и постоянное усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей, поскольку при сварке тонколистовых материалов даже незначительные перемещения инструмента в вертикальной плоскости могут привести к несплавлению в корневой части швов.

Для устранения дефектов типа несплавлений, распространяющихся на большую длину шва используют повторный проход инструмента СТП [5]. В случае же появления локальных несплавлений при СТП алюминиевых сплавов, обладающих хорошей свариваемостью при сварке плавлением, целесообразно использовать аргонодуговую сварку неплавящимся электродом для устранения такого типа дефектов [6].

Опыт применения аргонодуговой сварки неплавящимся электродом для устранения мало протяженных швов, полученных СТП на алюминиевых сплавах, показал, что в этом случае на поверхности подварочного шва появляется достаточно много фрагментов оксидных пленок (рис. 4).

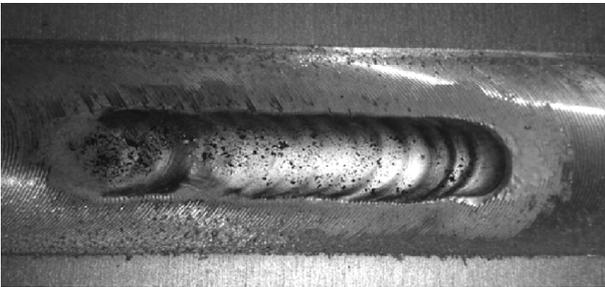


Рис. 4. Внешний вид шва СТП сплава 1565ч после наложения подварочного шва аргонодуговой сваркой

Целью данной работы явилось определение механизма появления оксидных включений в подварочных швах, выполненных аргонодуговой сваркой, и установление требований к подготовке кромок под сварку трением с перемешиванием.

**Методика проведения экспериментов.** В исследовании производили соединение пластин толщиной 5 мм из алюминиевых сплавов 1565чМ (система Al–Mg), 1201 (система Al–Cu), В-1341 (система Al–Mg–Si), 1915 (система Al–Zn–Mg), 1420 (система Al–Mg–Li) и 1460 (система Al–Cu–Li). Сварка осуществлялась как по целой пластине, так и по стыку

двух пластин. Для обеспечения минимального зазора в стыке кромки пластин предварительно фрезеровали.

Сварку трением с перемешиванием осуществляли на лабораторной установке, изготовленной на базе вертикального фрезерного станка с ЧПУ и дополнительно оснащенного индикатором вертикального перемещения фрезерной головки. Для сварки использовался инструмент, выполненный из быстрорежущей стали со штифтом конусообразной формы в двух вариантах: с винтовой линией и без нее [7].

Сварку трением с перемешиванием пластин исследуемых алюминиевых сплавов выполняли на режиме: скорость сварки 28,2...33 м/ч; частота вращения рабочего инструмента 700...1000 об/мин.; осевое усилие на инструмент 9500 Н; угол наклона инструмента в вертикальной плоскости 3...4 °. Рабочий инструмент имел следующие параметры: диаметр заплечика – 14 мм; диаметр штифта 4,2 мм при длине штифта 4,8 мм.

Наличие дефектов и их размеры подтверждались металлографическими исследованиями поперечных микрошлифов сварных соединений, выявление структуры которых производили методом окунания в реактив  $\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{HF}:\text{H}_2\text{O} = 1:1:2:4$  с выдержкой 10...25 с. Оптическую металлографию осуществляли с использованием микроскопа Neophot-21.

Исследования прочностных характеристик проводили методами статического растяжения и изгиба по ГОСТ 6996–66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств» с использованием универсальной разрывной машины UGTTSC-2000.

Фрактографическое изучение поверхности изломов, разрушенных образцов после механических испытаний проводили методами оптической и растровой электронной микроскопии. Электронную микроскопию производили с помощью растрового электронного микроскопа сверхвысокого разрешения evo-50 фирмы Karl Zeiss, укомплектованного системой энергодисперсионного микроанализа, позволяющего производить картирование по элементному составу.

Полученные соединения подвергались рентгеновскому и ультразвуковому неразрушающему контролю. Пространственное расположение дефектов в сварном шве определялось с помощью компьютерной томографии. Для этого использовался рентгеновский томограф высокого разрешения TOLMI–150–10.

Для реконструкции и визуализации томографических данных были использованы продукты компании Bruker-microCT.

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе исследовалось влияние подготовки поверхности при СТП по целой пластине на появление оксидных включений в подварочных швах, получаемых аргонодуговой сваркой.

По полученным результатам выбирался способ подготовки поверхности под СТП, обеспечивающий возможность осуществления бездефектных подварок.

На втором этапе при подготовке поверхности пластин по оптимальному варианту изучалось влияние способа раскроя пластин для получения стыка, а также наличие оксидов на торцевой поверхности стыкуемых кромок на интенсивность формирования оксидных включений в швах СТП.

Оксидные включения в подварочных швах определяли на нетравленных шлифах методом подсчета процента включений по площади поверхности и их удельной протяженности.

Пластины по целому металлу сваривали в состоянии поставки, после травления и химического фрезерования на контролируемую глубину, зачистки металлической щеткой, а также при выдержке в течение 24 ч образца при воздействии нагретого водяного пара.

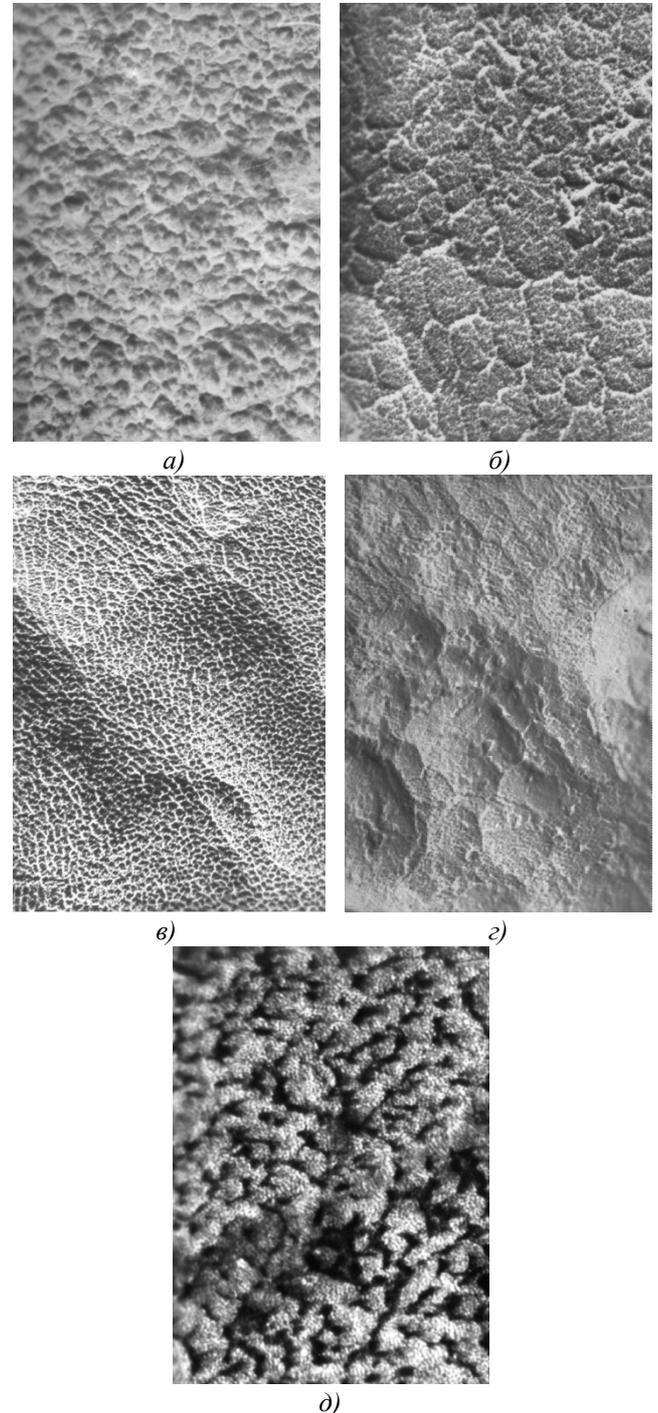
Для определения характеристик поверхности образцов из алюминиевых сплавов применяли термо-десорбционный масс-спектрометрический метод. Процесс газовой выделенности с поверхности исследовали на установке для вакуумного нагрева с индукционной печью, принципиальная схема которой приведена в работе [8], и на установке для нагрева поверхности лучом лазера по методике работы [9]. В процессе нагрева выделяющиеся газы постоянно прокачивали через датчик масс-спектрометра, с помощью которого регистрировали масс-спектр в диапазоне  $m/e = 1 \dots 60$ .

Для получения стыка пластин применяли резку на гильотинных ножницах, раскрой с помощью лазера и гидроабразивной струи, а также получали на торцевых поверхностях кромок утолщенную оксидную пленку за счет выдержки в течение 24 ч образца при воздействии нагретого водяного пара.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** В табл. 1 приведены результаты исследований. Видно, что от метода подготовки поверхности значительно зависит ее микрогеометрия. Особенно резко она ухудшается после зачистки щеткой и химического фрезерования

(так, максимальная высота микровыступов увеличивается в 4–9 раз по сравнению с исходной).

Структура оксидной пленки на поверхности исследуемых алюминиевых сплавов после различных вариантов обработки приведена на рис. 5.



**Рис. 5. Поверхность листов сплава 1565ЧМ после различных видов обработки:**  
*а* – состояние поставки после обезжиривания; *б* – химическое травление; *в* – химическое фрезерование; *з* – химическое полирование; *д* – химическое травление + обработка нагретым водяным паром

1. Влияние метода подготовки поверхности алюминиевых сплавов на высоту микровыступов

Подготовка поверхности	Высота микровыступов, мкм, для сплавов					
	В-1341	1565ч	1201	1420	1460	1915
Состояние поставки после обезжиривания	1,0...1,5	0,9...1,2	0,8...1,5	1,3...2,9	0,9...2,4	1,1...2,6
Химическое травление	2,1...3,5	1,9...2,7	2,0...3,1	2,8...4,4	2,2...3,8	2,5...3,9
Химическое полирование	1,2...1,7	1,1...1,5	0,9...1,6	1,9...3,2	1,5...2,7	1,3...2,6
Химическое фрезерование	4,5...6,0	3,9...5,5	4,9...6,2	6,1...7,5	5,4...7,2	5,1...6,9
Химическое травление + обработка нагретым водяным паром	2,1...3,4	1,9...3,1	2,0...3,0	3,1...4,4	2,6...4,2	2,1...3,7
Зачистка вращающейся металлической щеткой	8,2...16,4	7,5...13,5	6,0...14	7,5...16	6,8...15,4	8,2...12,7

2. Структура и толщина оксидных пленок на алюминиевых сплавах в зависимости от метода подготовки поверхности

Марка сплава	Метод подготовки поверхности	Структура оксидных пленок	Толщина пленки, мм	
			отдельных составляющих	общая
1915	Состояние поставки	MgO MgO + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,005...0,15 0,015...0,03	0,020...0,45
	Химическое травление	MgO MgO + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,003...0,01 0,01...0,025	0,013...0,35
	Зачистка вращающейся щеткой	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MgO	0,015...0,026	0,015...0,026
1565ч	Состояние поставки	MgO (ZnO, MgO) + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,002...0,12 0,018...0,035	0,025...0,40
	Химическое травление	MgO MgO + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,002...0,012 0,01...0,028	0,013...0,38
	Зачистка вращающейся щеткой	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MgO	0,012...0,020	0,012...0,020
1201	Состояние поставки	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,007...0,017	0,007...0,017
	Химическое травление		0,005...0,014	0,005...0,014
	Зачистка вращающейся щеткой		0,003...0,01	0,003...0,01
В-1341	Состояние поставки	MgO MgO + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,002...0,11 0,010...0,02	0,015...0,38
	Химическое травление	MgO MgO + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,002...0,008 0,01...0,020	0,010...0,27
	Зачистка вращающейся щеткой	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MgO	0,011...0,020	0,011...0,020
1420	Состояние поставки	Li <sub>2</sub> O + LiOH	0,004...0,007	0,10...0,36
		MgO MgO + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,009...0,013 0,02...0,05	
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,002...0,005	
	Химическое травление	Li <sub>2</sub> O + LiOH	0,002...0,005	0,070...0,28
		MgO MgO + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01...0,014 0,012...0,05	
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,002...0,006	
	Зачистка вращающейся щеткой	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MgO	0,012...0,024	0,012...0,024
1460	Состояние поставки	Li <sub>2</sub> O + LiOH	0,002...0,005	0,05...0,17
		Li <sub>2</sub> O + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,008...0,012	
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,003...0,009	
	Химическое травление	Li <sub>2</sub> O + LiOH	0,004...0,01	0,03...0,15
		Li <sub>2</sub> O + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,006...0,011	
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,003...0,009	
Зачистка вращающейся щеткой	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01...0,02	0,01...0,02	

Поверхности оксидных слоев на всех сплавах, показанные на рис. 5, после окисления горячим паром в течение 24 ч, в основном, не

очень отличаются. Толщина оксидной пленки, полученная таким образом, составляла примерно 0,5...1,0 мкм. В основном, все оксиды

на алюминиевых сплавах состоят из очень тонкого аморфного слоя  $Al_2O_3$ , который имеет толщину около 5 нм на котором образуется гидрооксидный слой толщиной до 1 мкм.

Из-за очень низкого парциального давления, которого достаточно для создания оксида алюминия, практически, невозможно избежать образования аморфного слоя. Было бы правильно говорить оксидно-гидрооксидный слой, но для простоты продукт окисления будет называться в данной статье оксидной пленкой.

Установлено, что структура и толщина оксидных пленок на поверхности резко отличаются и определяются химическим составом сплавов и методом подготовки (табл. 2).

Экспериментальные данные о влиянии различных методов обработки поверхности алюминиевых сплавов на общее газосодержание и, в частности, на содержание адсорбированной на поверхности влаги приведены на рис. 6–8.

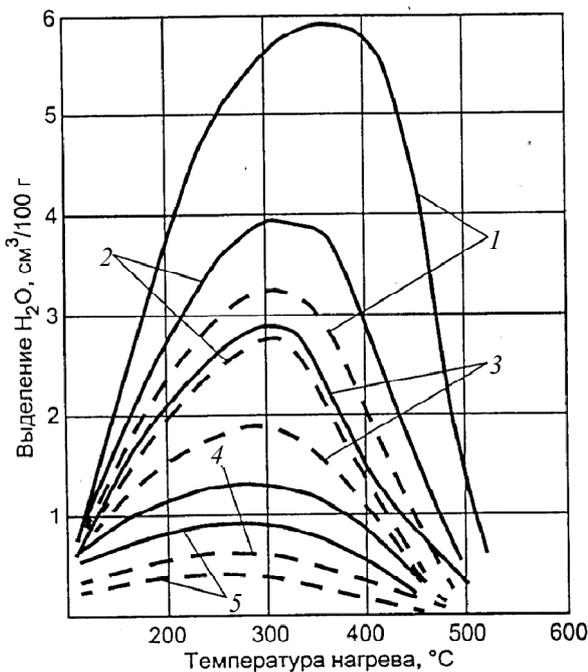


Рис. 6. Характер десорбции влаги с поверхности сплавов 1565ч (сплошная линия) и 1201 (штриховая) после обезжиривания бензином (1), химического травления (2), химического (3) и скоростного (4) фрезерования, химического полирования (5)

Кривые газовыделения с поверхности образцов из сплавов 1565ч и 1201 показывают (рис. 6), что методы подготовки поверхности существенно влияют на общее газосодержание и, в частности, количество адсорбированной влаги. Например, такие методы подготовки поверхности, как химическое травление и химическое фрезерование, зачистка щеткой

снижают количество адсорбированной влаги соответственно в 1,4; 2,2; 3,6 и 9,3 раза по сравнению с состоянием поставки и при обезжиривании ацетоном (бензином).

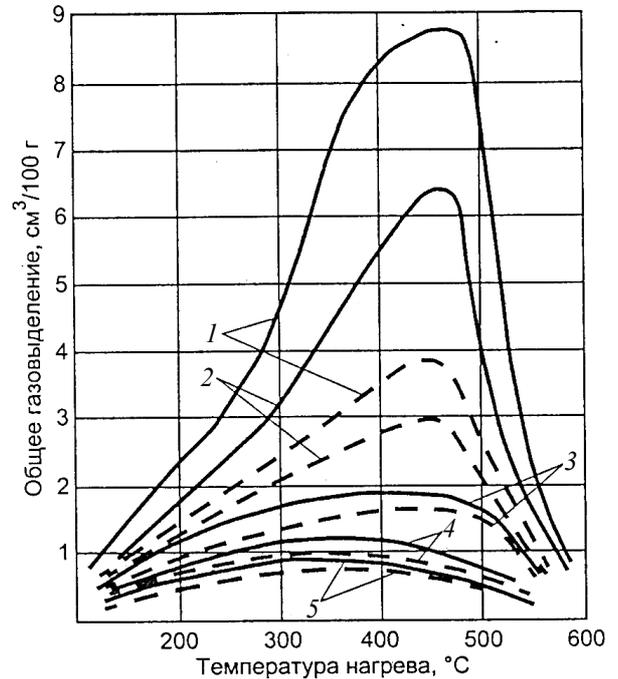


Рис. 7. Характер изменения общего газовыделения с поверхности сплавов 1469 (сплошная линия) и В-1341 (штриховая):

1–5 – см. рис. 6

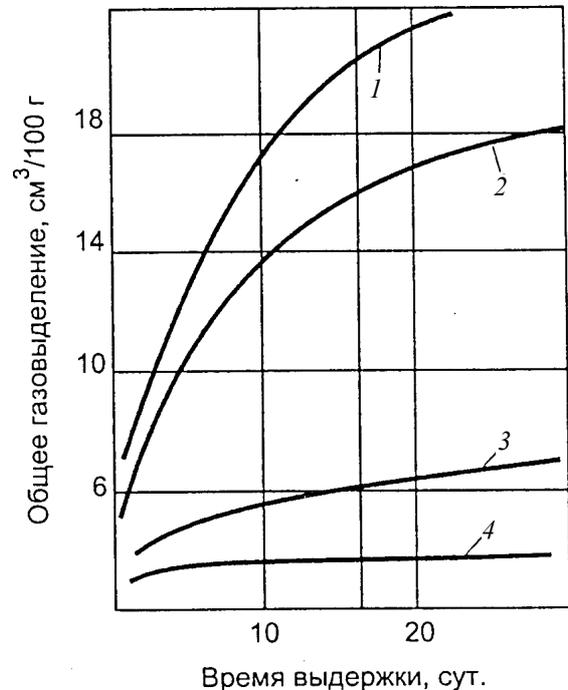


Рис. 8. Зависимость общего газосодержания образцов после химического травления от времени выдержки во влажной атмосфере (100 %-ной относительной влажности):

1 – сплав 1420; 2 – сплав 1565ч; 3 – сплав 1201; 4 – сплав В-1341

Применительно к сплавам В-1341 и 1460 общее газовыделение с поверхности также определяется методом ее подготовки. Скоростное фрезерование и химическое полирование снижают общее газовыделение примерно в 7–10 раз (рис. 7).

Выдержка образцов после различных способов подготовки до сварки также заметно влияет на газовыделение с поверхности. Согласно анализу кривых газовыделения (рис. 8), абсолютные показатели зависят от марки сплава. Так, для сплавов 1420, 1565ч, 1201 и В-1341 после выдержки в течение 10 – 15 суток во влажной атмосфере общее газосодержание увеличивается соответственно в 2,9; 2,3; 1,3 и 1,04 раза. Такое резкое отличие определяется только спецификой структурного строения оксидных пленок и их толщиной на разных сплавах.

Таким образом, методы подготовки поверхности, условия и длительность хранения деталей после подготовки под сварку значительно влияют на газосодержание поверхности.

Анализ фазового состава оксидных пленок на сплаве 1565ч показал, что они состоят из оксида магния. Слои пленки, прилегающие к основе сплава, содержат магниевую шпинель  $MgO \cdot Al_2O_3$ . Толщина данной пленки составляет 0,02...0,045 мм.

Оксидная пленка на сплаве 1201 состоит из  $\gamma$ -модификации  $Al_2O_3$  с увеличенным параметром кристаллической решетки вследствие присутствия двухвалентных катионов меди.

Оксидная пленка на сплавах типа 1420 состоит из  $Li_2O$ , который, взаимодействуя на воздухе с углекислым газом и парами воды, превращается в  $LiOH$  и  $Li_2CO_3$ . Кроме лития окисляются магний и алюминий с образованием  $MgO$  и  $Al_2O_3$ . Толщина оксидной пленки в 7–9 раз больше, чем на сплавах типа 1201 и в 1,5–2 раза больше, чем на сплавах типа 1565ч.

Оксидная пленка на сплаве В-1341 состоит из  $\gamma$ -модификации  $Al_2O_3$  с увеличенным параметром кристаллической решетки вследствие присутствия двухвалентных катионов кремния.

Оксидная пленка на сплавах типа 1460 состоит в основном из  $Li_2O$ , который взаимодействует с углекислым газом и парами воды с образованием  $LiOH$  и  $Li_2CO_3$ . Толщина оксидной пленки в состоянии поставки составляет 0,013...0,03 мм.

В табл. 3 представлены результаты анализа засоренности подварочного шва, выполненного аргонодуговой сваркой по шву СТП на исследуемых сплавах в зависимости от технологии подготовки поверхности заготовок под СТП.

Из полученных данных следует, что засоренность подварочных швов определяется состоянием поверхности заготовки, методом подготовки поверхности алюминиевого сплава к сварке тернием с перемешиванием и системой легирования сплава. Наибольшую склонность к засоренности подварочных швов оксидными включениями проявляют сплавы системы Al–Mg, Al–Mg–Li и Al–Cu–Li.

**3. Влияние метода подготовки поверхности алюминиевых сплавов под СТП на засоренность подварочных швов оксидными включениями**

Подготовка поверхности	Средний процент включений на 1 см <sup>2</sup> поверхности подварочного шва					
	В-1341	1565ч	1201	1420	1460	1915
Состояние поставки после обезжиривания	18	32	15	53	44	28
Химическое травление	4	8	5	25	20	11
Химическое полирование	0	0	0	3	1	0
Химическое фрезерование	0	1	0	2	1	0
Химическое травление + обработка нагретым водяным паром	25	38	15	66	51	35
Зачистка вращающейся металлической щеткой	7	15	3	38	32	12
Подготовка поверхности	Средняя протяженность оксидного включения, мм					
	В-1341	1565ч	1201	1420	1460	1915
Состояние поставки после обезжиривания	0,8	2,1	0,5	2,5	1,7	1,3
Химическое травление	0,2	0,7	0,2	1,8	1,1	0,4
Химическое полирование	0	0,1	0	0,4	0,3	0
Химическое фрезерование	0	0,15	0	0,33	0,24	0,10
Химическое травление + обработка нагретым водяным паром	1,6	2,9	0,9	3,7	2,3	1,8
Зачистка вращающейся металлической щеткой	0,35	1,06	0,25	2,14	1,35	0,67

Механизм образования оксидных включений на поверхности подварочных швов можно представить следующим образом. При наличии толстой оксидной пленки на поверхности заготовки при сварке трением с перемешиванием под действием заплечика рабочего инструмента происходит ее фрагментация. Непосредственно поверхностный слой шва СТП насыщается фрагментами оксидной пленки. При выполнении подварочного шва аргодуговой сваркой образование жидкого расплава сварочной ванны приводит к объединению и всплыванию фрагментов оксидной пленки на поверхность подварочного шва.

На втором этапе исследований изучалось влияние способа раскроя пластин алюминиевых сплавов под СТП на засоренность подварочных швов оксидными включениями.

Исследование макроструктуры соединений СТП, выполненных на пластинах сплава 1565ч, торцевые кромки которых подвергались воздействию водяного пара, показало, что в шве присутствует довольно толстая оксидная пленка (рис. 9).

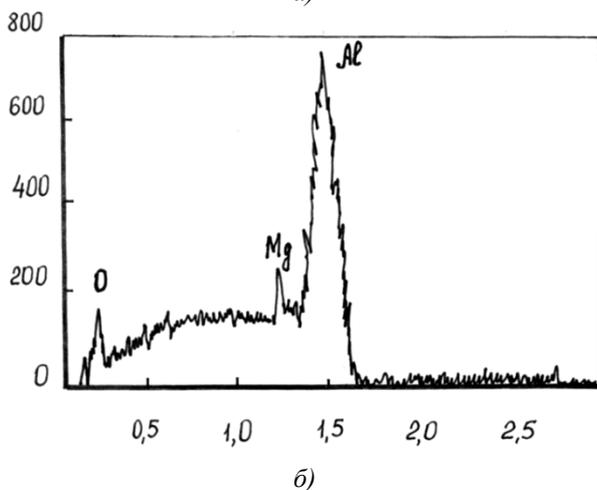
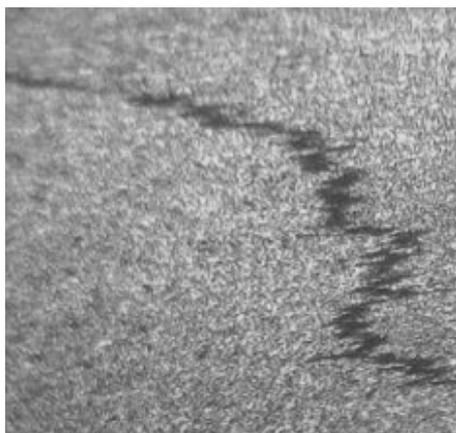


Рис. 9. Оксидное включение в шве СТП сплава 1565ч (а) и результаты анализа элементного состава включения (б)

С помощью анализа элементов можно обнаружить в темных включениях алюминий и большой объем кислорода. Это указывает на оксид-гидрооксид, который ранее находился на торцевых поверхностях свариваемых кромок.

При более сильном увеличении под растровым электронным микроскопом, можно распознать остатки оксидного слоя по их размеру и структуре. Эти остатки находятся около корня сварного шва, на границе между зоной смешивания и простираются до области закручивания на стороне подачи в приблизительном полукруге. Плотность обнаруженных оксидных фрагментов уменьшается по мере увеличения расстояния от корня сварного шва, так как границы поверхностей растягиваются достаточно широко друг от друга, и слой оксидов подвергается деформации сдвига в процессе перемешивания.

На рис. 10 представлены результаты исследования влияния способа подготовки торцевой поверхности кромок пластин сплава 1565чМ под СТП на загрязненность оксидными включениями подварочных швов.

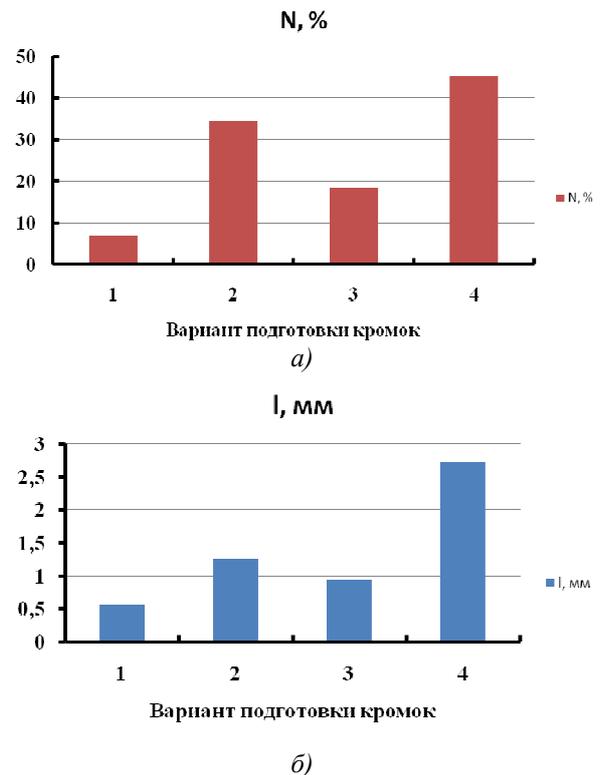


Рис. 10. Влияние способа подготовки торцевой поверхности кромок сплава 1565чМ под СТП на загрязненность подварочных швов оксидными включениями:

а – средний процент включений на 1 см<sup>2</sup> поверхности подварочного шва; б – средняя протяженность оксидного включения, мм

Результаты выполненных исследований показали, что при всех рассмотренных способах подготовки торцевой поверхности свариваемых кромок удается получить качественное сварное соединение при СТП. Состояние торцевой поверхности свариваемых кромок пластин перед СТП оказывает влияние на загрязненность оксидными включениями подварочных швов. При этом наилучшие результаты достигаются при резке листовых заготовок на гильотинных ножницах, а худшие – при обработке кромок водяным паром.

При исследовании влияния толстой оксидной пленки на торцевой поверхности свариваемых кромок пластин, полученной при их обработке водяным паром, на загрязненность оксидными включениями подварочных швов выявлена интересная особенность влияния профиля рабочего инструмента СТП на распределение фрагментов оксидов в шве.

При использовании рабочего инструмента с винтовой канавкой на штыре фрагменты оксидных пленок не обнаруживаются на оптическом микроскопе из-за небольших размеров. Мельчайшие остатки оксидов можно обнаружить только под растровым микроскопом. Они расположены достаточно далеко от начальной точки (корень сварного шва или кромки, образующие соединение), т.е. внутри зоны перемешивания. Эти оксиды были раздроблены до такой степени, что расстояние между граничными поверхностями составляет около 20 мкм. Распределение фрагментов оксидных пленок в зоне перемешивания достаточно равномерное, что объясняется направлением перемещения потоков пластифицированного металла в процессе СТП (рис. 11).

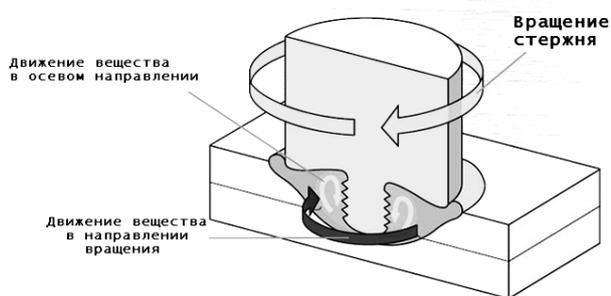


Рис. 11. Направление течения пластифицированного металла при СТП алюминиевых сплавов

В случае использования для сварки пластин рабочего инструмента с гладким штырем диаметром 4 мм имеет место распределение фрагментов оксидных пленок по всему сечению шва, причем их максимальная концен-

трация наблюдается на расстоянии 2,3...3,1 мм от оси стыка.

На соединениях алюминиевых листов, полученных при сварке трением с перемешиванием, предварительно окисленных в горячем водяном паре до сварки, процесс СТП переносит оксиды поверхности на кромки листа в виде фрагментов различной протяженности. Дефекты корня и дефекты ядра сварной точки были вызваны сильно оксидным слоем на граничной поверхности между предельно деформированной зоной перемешивания и менее деформированным металлом в зоне термомеханического влияния. Этот искусственно созданный оксидный слой привел к разрушению соединения по граничной поверхности во время испытания на растяжение.

Даже при оптимальных параметрах СТП, дефекты могут проявиться в шве как результат чрезвычайно окисленных свариваемых кромок листов. В любом случае можно допустить, что негативное влияние оксидных включений на механические свойства соединений алюминиевых сплавов, полученных СТП, не проявляются заметно ниже определенного размера фрагментов остатков оксидов.

Точная характеристика величины этого критического размера имеет принципиальное значение для сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов.

Чтобы понять вопросы, касающиеся того, сколько времени можно допустить для хранения заготовок до СТП и какой толщины оксидный слой должен быть удален до сварки трением с перемешиванием, необходимо провести еще исследования для СТП с уменьшенной толщиной оксидной пленки. Эти исследования становятся более сложными методически, так как распределение оксидов в сварном шве можно зарегистрировать только исключительно с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

Для количественной оценки необходимо помнить, что результаты исследований, полученные с толстыми оксидными слоями, нельзя с легкостью переносить на тонкие оксидные слои. Главное различие между тонкими и толстыми оксидными слоями в этой связи относится к тому, что толстый слой значительно более хрупкий, чем тонкие слои, обладающие большей эластичностью. В результате экструзии пластифицированного металла при СТП, толстые оксидные слои разрываются, а тонкие оксидные слои имеют тенденцию распределяться, как клубки или скопления в металле зоны интенсивного перемешивания.

Для более объективной оценки влияния оксидных включений на механические свойства соединений алюминиевых сплавов, выполненных СТП, целесообразно выполнить исследование выносливости соединений.

Таким образом, в результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для снижения загрязненности подварочных швов, выполняемых сваркой плавлением на швах СТП, подготовку поверхности пластин алюминиевых сплавов к СТП надо осуществлять в соответствии с требованиями технологии подготовки алюминиевых сплавов под сварку плавлением.

2. Наличие на торцевой поверхности свариваемых кромок толстого оксидного слоя может являться причиной не только загрязненности подварочных швов оксидными включениями, но и снижения механических характеристик соединений СТП алюминиевых сплавов при испытаниях на статическое растяжение.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Покляцкий, А.Г., Чайка, А.А., Клочков, И.Н., Яворская, М.Р. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов различных систем легирования // Автоматическая сварка. – 2010. – №10. – С.18 – 22.
2. Овчинников, В.В. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием алюминиевых и магниевых сплавов (обзор) // Машиностроение и инженерное образование. – 2016. – №4. – С. 22–45.
3. Lanciotti A., Vitali F. Characterisation of friction stir welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates // Welding International. – 2003. – № 8. – P. 624–630.
4. Овчинников, В.В., Дриц, А.М., Малов, Д.В. Двухпроходная сварка трением с перемешиванием листов из сплава 1565чМ // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – №6. – С. 36–42.
5. Лукин, В.И., Овчинников, В.В., Йода, Е.Н. и др. Сварка трением с перемешиванием высокопрочных алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469. // Сварочное производство. 2015. – №7. – С. 21–25.
6. Овчинников, В.В. Научно-технические технологии сварки в производстве объектов транспорта из алюминиевых сплавов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – №5. – С. 3–9.
7. Овчинников, В.В., Дриц, А.М., Малов, Д.В. Механические свойства сварных соединений сплавов 1565чМ и

1460Т1 в разноименном сочетании, полученных сваркой трением с перемешиванием // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – №6. – С. 11–17.

8. Рязанцев, В.И., Савостиков, А.И. Исследование газовой выделения при нагреве деформируемых свариваемых алюминиевых сплавов. // Сварочное производство. – 1990. – №12. – С. 32–34.

9. Овчинников, В.В., Рязанцев, В.И., Савостиков, А.И. Исследование газовой выделения при нагреве деформируемых свариваемых алюминиевых сплавов // Сварочное производство. – 1991. – №6. – С.14–19.

## REFERENCES

1. Poklyatsky, A.G., Chaika, A.A., Klochkov, I.N., Yavorskaya, M.R. Friction welding with mixing aluminum alloys of different alloying systems // *Automated Welding*. – 2010. – №10. – pp.18 – 22.
2. Ovchinnikov, V.V. Technological peculiarities in friction welding with mixing aluminum and magnesium alloys (review) // *Mechanical Engineering and Engineering Education*. – 2016. – №4. – pp. 22–45.
3. Lanciotti A., Vitali F. Characterisation of friction stir welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates // *Welding International*. – 2003. – № 8. – P. 624–630.
4. Ovchinnikov, V.V., Drits, A.M., Malov, D.V. Two-pass friction welding with mixing sheets made of alloy 1565chM // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – №6. – pp. 36–42.
5. Lukin, V.I., Ovchinnikov, V.V., Yoda, E.N. et al. Friction welding with mixing high-strength aluminum-lithium alloys V-1461 and V-1469. // *Welding Engineering*. 2015. – №7. – pp. 21–25.
6. Ovchinnikov, V.V. Science intensive technologies of welding in manufacturing transport objects of aluminum alloys // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – №5. – pp. 3–9.
7. Ovchinnikov, V.V., Drits, A.M., Malov, D.V. Mechanical properties in welds of alloys 1565chM and 1460T1 in heterononymous composition made by friction welding with mixing // *Blank Production in Mechanical Engineering*. – 2015. – №6. – pp. 11–17.
8. Ryazantsev, V.I., Savostikov, A.I. Gas evolution analysis at heating deformed welded aluminum alloys. // *Welding Engineering*. – 1990. – №12. – pp. 32–34.
9. Ovchinnikov, V.V., Ryazantsev, V.I., Savostikov, A.I. Gas evolution analysis at heating deformed welded aluminum alloys // *Welding Engineering*. – 1991. – №6. – pp.14–19.

Рецензент акад. РАН В.И. Лысак