

УДК 621.791/052.4/1/754*293+620.194.22: 669.715

СТОЙКОСТЬ К КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА АМg5M, ПОЛУЧЕННЫХ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКОЙ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ И ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, В. Е. ФЕДОРЧУК, М. Р. ЯВОРСКАЯ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Исследована стойкость к коррозии под напряжением сварных соединений сплава АМg5M толщиной 2 мм. Испытаниями образцов на коррозионное растрескивание при заданной деформации выявлено, что в сварных соединениях, полученных в твердой фазе трением с перемешиванием, как и в основном материале, трещины не образуются в течение 90 суток при напряжениях на уровне предела текучести основного материала. Однако после длительного пребывания их в растворе наблюдается общая коррозия, интенсивность которой увеличивается с повышением создаваемых напряжений при нагрузке. Установлено, что при одноосном растяжении образцы как в исходном состоянии, так и после коррозионного воздействия при напряжениях, составляющих 50...100% от условного предела текучести свариваемых листов, разрушаются по основному материалу и предел их прочности снижается на 12...25%. В образцах сварных соединений, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, вследствие протекающей под воздействием агрессивной среды коррозии возникают визуально обнаруживаемые трещины в зоне сплавления шва с основным материалом. Построены зависимости накопленной вероятности разрушения образцов таких соединений от создаваемых в них напряжений и определены уровни безопасных напряжений при накопленной вероятности разрушения.

Ключевые слова: *коррозионная стойкость, сплав АМg5M, сварка трением с перемешиванием, аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, накопленная вероятность разрушения, уровень безопасных напряжений.*

Алюминиевые сплавы широко применяют для изготовления различных сварных конструкций, многие из которых подвергаются коррозионному воздействию. Наиболее агрессивной средой, в которой, как правило, находятся такие изделия, является морская вода. При коррозионных испытаниях ее обычно заменяют 3%-ным раствором хлористого натрия с различными добавками. В морской воде возможно протекание общей и локальной (питтинговой) коррозии, а также межкристаллитной, в том числе под напряжением. Механизм последней связан с выделением вторичных фаз и обеднением твердого раствора. При этом возможно растворение границ зерен в результате образования местных гальванических элементов, где эти выделения служат анодами или катодами. Сплавы системы Al–Mg достаточно стойки к межкристаллитной коррозии под напряжением в морской воде. При изготовлении из них конструкций различного назначения используют аргонодуговую сварку неплавящимся электродом, обеспечивающую высокие механические характеристики сварных соединений. Этот способ получения неразъемных соединений относится к сварке плавлением, поскольку шов образуется в результате расплавления свариваемых кромок с последующей их кристаллизацией в среде защитного инертного газа. Однако в зоне соединений возникают значительные

Контактная особа: А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, e-mail: vicf@ukr.net

фазово-структурные изменения и формируются внутренние остаточные напряжения, снижающие их стойкость к воздействию агрессивной среды [1].

Эффективным методом получения неразъемных соединений алюминиевых сплавов в твердой фазе без расплавления основного материала является сварка трением с перемешиванием, изобретенная в СССР в 1965 г. [2]. Шов здесь формируется вследствие нагревания при трении определенного объема соединяемых материалов в зоне их контакта до пластического состояния и перемешивания его специальным инструментом, что дает возможность получать различные типы соединений (стыковые, угловые, тавровые, нахлесточные, а также замковые, прорезные и т. п.) [3, 4]. Благодаря выполненным в Британском институте сварки (TWI) исследованиям разработаны специальные промышленные установки, позволившие реализовать этот способ при производстве узлов ракетно-космической техники, кораблей, воздушного и наземного транспорта, оборудования для химической промышленности, строительных конструкций и т. п. [5–9]. Результаты зарубежных специалистов свидетельствуют о перспективности такой сварки при изготовлении конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах, поскольку полученные так сварные соединения некоторых алюминиевых сплавов выявили достаточно высокую коррозионную стойкость [10–13].

Цель настоящей работы – оценить стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением сварных соединений сплава АМг5М, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом и трением с перемешиванием.

Методика исследований. Листы сплава толщиной 2 мм сваривали автоматической аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом (АДСНЭ) со скоростью 20 м/ч от установки MW-450 (“Fronius”, Австрия) при токе сварки 145 А, используя в качестве присадки полосу основного материала. Сварку трением с перемешиванием (СТП) осуществляли на лабораторной установке, сконструированной в ИЭС им. Е. О. Патона. Для получения стыковых соединений применяли специальный инструмент с коническим наконечником и буртом диаметром 12 мм [14]. Скорость вращения инструмента 1420 rot/min, а линейного перемещения его вдоль стыка 8 м/ч. Для испытаний на коррозионное растрескивание при заданной деформации (ГОСТ 9.909-86) изготавливали образцы размером 110×15×2 мм из основного материала (в долевом и поперечном направлениях проката) и сварных соединений. При этом шов располагался в середине образцов. С образцов, полученных сваркой плавлением, снимали проплавы и усиления швов. Шероховатость R_a механически обработанных поверхностей образцов соответствовала 1,25 μm (ГОСТ 2789-73). Образцы обезжиривали органическим растворителем и травили в 10%-ном растворе едкого натра при 50°C в течение 2 min. После осветления в 30%-ном растворе азотной кислоты в течение 5 min, промывания и сушения их фиксировали с помощью электроизоляционных прокладок и вкладышей в скобах из нержавеющей стали, создавая напряжения растяжения путем изгиба. Необходимую стрелу прогиба (f) образцов вычисляли по формуле

$$f = \sigma' / (12 \cdot E \cdot \delta) \cdot [8l_1^2 + 3l_2(4l_1 + l_2)], \quad (1)$$

где σ' – расчетное напряжение при нагрузке, МПа; E – модуль упругости сплава, МПа; δ – толщина образца, мм; l_1 и l_2 – расстояния между опорами скобы и вкладыша, мм.

После протирания тампоном, смоченным этиловым спиртом, образцы погружали в раствор, содержащий 30 г NaCl и 10 мл HCl в 1 л дистиллированной воды (ГОСТ 6707-72). При этом объем раствора составлял около 20 мл на 1 см² поверхности погруженных образцов. Каждый образец размещали таким образом, чтобы поверхность, находящаяся под растягивающим напряжением, была обращена вверх. Общая продолжительность экспериментов при постоянном погруже-

нии образцов в раствор 90 суток. Критерием оценки их коррозионного растрескивания было время до появления первой визуально обнаруживаемой трещины при испытании на одном уровне напряжений.

Основной материал и сварные соединения исследовали при расчетных напряжениях σ' , составляющих некоторую часть K (1,0; 0,9; 0,75 и 0,5) от предела текучести $\sigma_{0,2}$ сплава, равного 161 МПа. При этом для всех образцов сварных соединений и основного материала при $K = 0,5$ и $0,75$ в соответствии с ГОСТ 9.019-74 расчетные напряжения вычисляли как

$$\sigma' = \sigma_{0,2} \cdot K. \quad (2)$$

Это значение для образцов основного материала при K , равном 0,9 и 1,0, определяли по формуле

$$\sigma' = \frac{3}{2} \sigma_{0,2} \cdot K \cdot \left(1 - \frac{1}{3} A^2\right), \quad (3)$$

где при $K = 0,9$

$$A = \sigma_{0,2} \cdot K / (\sigma_{0,2} \cdot K + 0,04 \cdot 10^{-2} \cdot E), \quad (4)$$

а при $K = 1,0$

$$A = \sigma_{0,2} / (\sigma_{0,2} + 0,2 \cdot 10^{-2} \cdot E). \quad (5)$$

Значения расчетных напряжений при нагрузке и соответствующих им прогибах образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные напряжения и прогибы образцов

Показатели	Основной материал				Сварные соединения			
	$K = 1,0$	$K = 0,9$	$K = 0,75$	$K = 0,5$	$K = 1,0$	$K = 0,9$	$K = 0,75$	$K = 0,5$
A	0,53135	0,83612	–	–	–	–	–	–
σ' , МПа	218,8	166,7	120,8	80,5	161,0	144,9	120,8	80,5
f , мм	2,47	1,88	1,36	0,91	1,82	1,63	1,36	0,91

Полную математическую обработку данных, полученных при испытании на коррозионное растрескивание, осуществляли в соответствии с “Приложением 7” к ГОСТ 9.019-74 следующим образом. Для каждого образца определяли время x (сутки) до появления трещины. Затем находили среднее арифметическое его значение x_m для каждого варианта испытаний, включающего серию образцов n из 10 штук:

$$x_m = \sum_{i=1}^n x_i / n, \quad (6)$$

где x_i – время до разрушения каждого образца, сутки.

Дисперсию S^2 вычисляли по формуле

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 / (n - 1), \quad (7)$$

а ее среднее квадратичное из выражения

$$S_m = \sqrt{S^2}. \quad (8)$$

Коэффициент вариации V (%)

$$V = \frac{S_m}{x_m} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Вероятность разрушения P каждого образца

$$P = (n_i - 0,5) / n \cdot 100\%, \quad (10)$$

где n_i – порядковый номер испытанного образца в ряду последовательности разрушения образцов. Данные математической обработки результатов после испытания образцов соединений, выполненных АДСНЭ, при $K = 0,9$ приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные данные для оценки стойкости образцов к коррозионному растрескиванию под напряжением

Номер образца	P, %	x_i	x_m	$x_i - x_m$	$(x_i - x_m)^2$	S^2	S_m	V, %
		Days						
1	5	13	38	25	625	287,9	17	45,3
2	15	14		24	576			
3	25	28		10	100			
4	35	34		4	16			
5	45	36		2	4			
6	55	37		1	1			
7	65	41		3	9			
8	75	48		10	100			
9	85	60		22	484			
10	95	64		26	676			

По расчетным данным строили вероятностные кривые, где по оси ординат откладывали накопленную вероятность разрушения, а по оси абсцисс – время до разрушения. Прямую линию, характеризующую эмпирическую функцию распределения, проводили через две точки с координатами $(x_m; P_m = 50\%)$, $(x_m + S_m; P_m = 84,15\%)$. Чтобы найти уровень безопасных напряжений, строили зависимость “время до разрушения–напряжение”. При этом время до разрушения определяли при накопленной вероятности разрушения 5 и 50%.

Дополнительно микроскопически исследовали шлифы, чтобы проанализировать влияние агрессивной среды на их коррозию. При этом плоскость шлифов, изготовленных по ГОСТ 1778-70, была перпендикулярна их рабочей поверхности и параллельна направлению растягивающих напряжений. Кроме того, определяли изменение предела прочности (Q) образцов, не подвергшихся коррозионному растрескиванию, по сравнению с исходными:

$$Q = \frac{\sigma_B - \sigma_{B\text{сог}}}{\sigma_B} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где σ_B – исходный предел прочности образцов, МПа; $\sigma_{B\text{сог}}$ – предел прочности образцов после коррозионного воздействия, МПа.

Результаты и их обсуждение. Установили, что в образцах основного материала и полученных СТП сварных соединений при постоянном пребывании их в растворе в течение 90 суток коррозионные трещины не образуются даже при напряжениях на уровне предела текучести основного материала (рис. 1).

Анализ поперечных шлифов образцов сварных соединений, выполненных трением с перемешиванием, свидетельствует, что после длительного пребывания в агрессивной коррозионной среде они подверглись общему коррозионному воздействию (рис. 2а). Причем в зоне сварки коррозия металла менее интенсивна, чем основного материала. По-видимому, это обусловлено особенностями образования неразъемного соединения. Во-первых, сваривали в твердой фазе при нагревании металла только до пластического состояния ($\leq 0,8T_s$), поэтому удалось избежать существенных фазово-структурных изменений, обусловленных расплавлением и последующей кристаллизацией металла. Во-вторых, вследствие интенсивной пластической деформации металла, перемещаемого рабочими поверхностями сварочного инструмента, в шве и зоне термомеханического воздействия (ЗТМВ) происходит уплотнение и 5–7-кратное уменьшение размера его зерен и находящихся в сплаве интерметаллидных включений.

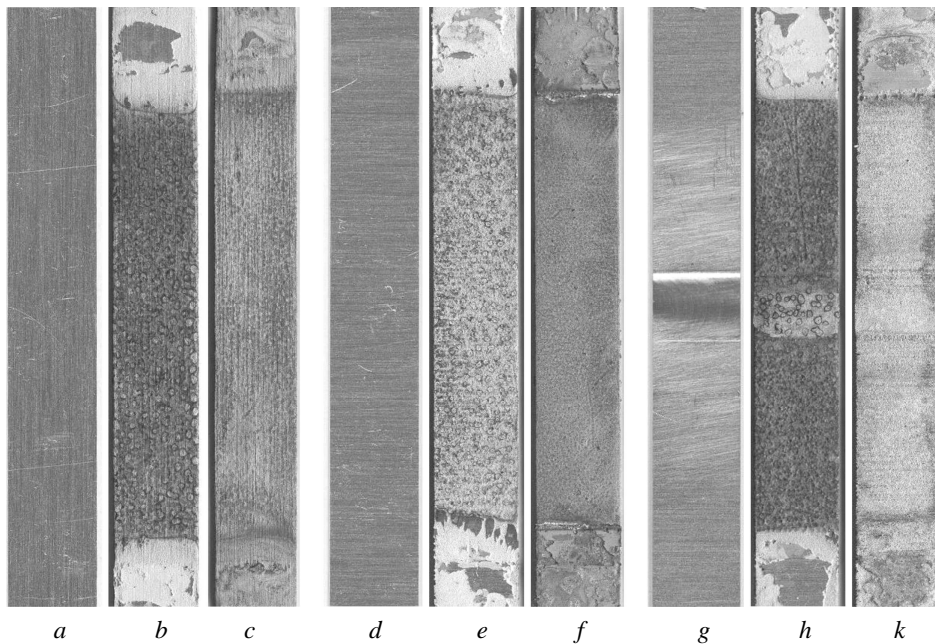


Рис. 1. Внешний вид образцов основного материала в долевом (*a–c*) и поперечном (*d–f*) направлениях и полученных СТП соединений (*g–k*) в исходном состоянии (*a, d, g*) и после коррозионных испытаний в течение 90 суток при $K = 0,75$ (*b, e, h*) и $1,0$ (*c, f, k*).

Fig. 1. Appearance of basic material specimens rolled in the longitudinal (*a–c*) and transverse directions (*d–f*) and received by friction and stir welding (FSW) joints (*g–k*) in the initial state (*a, d, g*) and after corrosion testing during 90 days at $K = 0.75$ (*b, e, h*) and 1.0 (*c, f, k*).

Чтобы проанализировать такое общее коррозионное воздействие на основной материал и полученные СТП соединения, оценивали их предел прочности (σ_B) при одноосном статическом растяжении. Выявили, что предел прочности образцов основного материала, вырезанных вдоль проката, находится на уровне 338 МПа, а вырезанных в поперечном направлении составлял 320 МПа. Образцы сварных соединений, полученные трением с перемешиванием, также разрушаются по основному материалу за пределами ЗТМВ и имеют такой же (320 МПа) предел прочности.

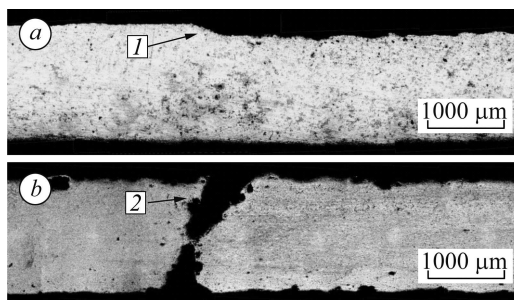


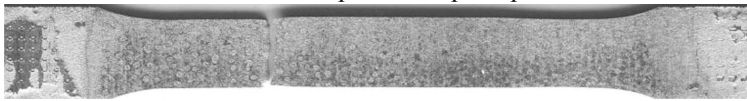
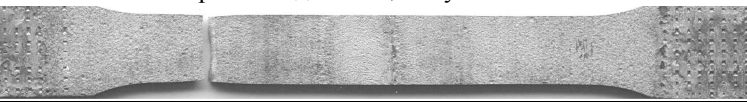
Рис. 2. Поперечные макрошлифы образцов сварных соединений, полученных трением с перемешиванием (*a*) и неплавящимся электродом (*b*), после коррозионных испытаний в течение 90 суток при $K = 1,0$: 1, 2 – границы ЗТМВ и шва с основным материалом.

Fig. 2. Transverse macrosections of welding joints samples produced by FSW (*a*) and non-consumable electrode (*b*) after corrosion testing during 90 days at $K = 1.0$: 1, 2 – boundary of thermomechanical affected zone (TMAZ) and a weld with the basic material.

При аналогичном статическом одноосном растяжении образцов таких соединений, подвергавшихся коррозионным испытаниям в течение 90 суток, место разрушения не изменилось, но предел прочности их снизился до 281 МПа при $K = 0,5$ и до 239 МПа при $K = 1,0$, как и образцов основного материала, вырезанных поперек проката (табл. 3). А предел прочности образцов основного материала

ла, вырезанных вдоль проката, после коррозионных испытаний при $K = 1$ уменьшился на 20%.

Таблица 3. Предел прочности образцов после коррозионных испытаний

K	σ_B , МПа	Q , %	Внешний вид разрушенного образца
0,5	$\frac{289 - 275}{281}$	12	Основной материал поперек проката 
			Сварное соединение, полученное СТП 
1,0	$\frac{257 - 224}{239}$	25	Основной материал поперек проката 
			Сварное соединение, полученное СТП 
	$\frac{278 - 265}{270}$	20	Основной материал вдоль проката 

Примечание. В числителе – максимальные и минимальные, а в знаменателе – средние значения предела прочности.

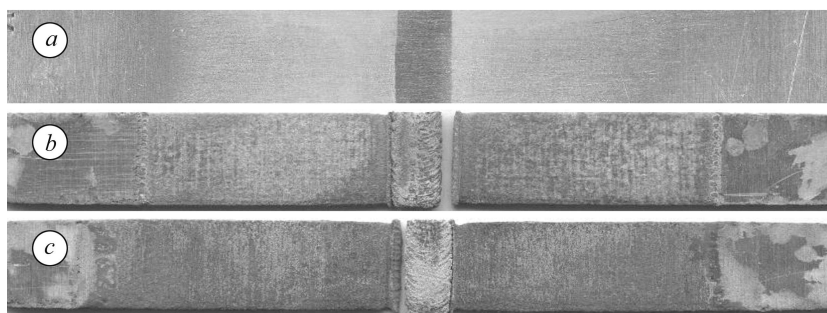


Рис. 3. Внешний вид образцов сварных соединений, полученных АДСНЭ, в исходном состоянии (а) и после растрескивания при коррозионных испытаниях при $K = 0,75$ (b) и 0,9 (c).

Fig. 3. Appearance of samples of welded joints obtained by argon-arc non-melting electrode welding (TIG) in the initial state (a) and after cracking in corrosion tests at $K = 0.75$ (b) and 0.9 (c).

Исследования образцов сварных соединений, полученных АДСНЭ, выявили, что под воздействием агрессивной среды зарождаются визуально обнаруживаемые трещины в зоне сплавления шва с основным материалом (рис. 3). Очевидно, именно на этом участке сварного соединения (см. рис. 2b) выделения β' -фазы, выпадающей по границам зерен в результате распада твердого раствора магния в алюминии, образуют непрерывную сетку, которая интенсивно разрушается при

наличии электролита вследствие существенной разности потенциалов между β' -фазой и прилегающими участками металла [1]. Время, когда появляются такие трещины, для каждого образца разное, но вероятность их возникновения зависит от создаваемого вследствие прогиба напряжения (рис. 4).

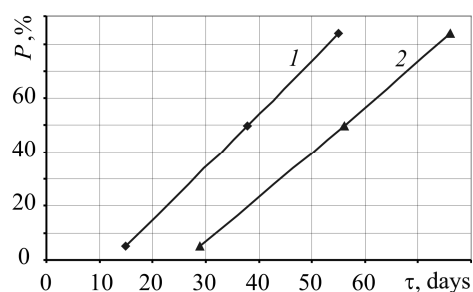


Рис. 4. Fig. 4.

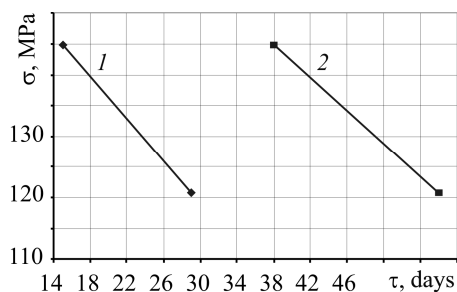


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 4. Зависимости накопленной вероятности разрушения образцов сварных соединений, полученных АДСНЭ, от создаваемых в них напряжений при коррозионных испытаниях: 1 – $K = 0,9$; 2 – $0,75$.

Fig. 4. Dependences of cumulative failure probability of samples of the welded joints produced by TIG on the level of stresses created in them in corrosion tests: 1 – $K = 0.9$; 2 – 0.75 .

Рис. 5. Уровень безопасных напряжений для образцов сварных соединений, созданных АДСНЭ, в зависимости от накопленной вероятности разрушения: 1 – $P = 5\%$; 2 – 50% .

Fig. 5. Stress safe level for welded joints samples obtained by TIG depending on the cumulative probability of failure: 1 – $P = 5\%$; 2 – 50% .

Следовательно, сварные соединения сплава АМг5М, полученные АДСНЭ, имеют относительно низкий уровень безопасных напряжений. Так, при напряжениях, составляющих 75% от предела текучести основного материала, образование коррозионных трещин с вероятностью 5% может произойти уже на 29 суток, а с вероятностью 50% – на 56. С увеличением стрелы прогиба образцов до 1,63 мм, при котором возникающие в них напряжения достигают 90% от предела текучести основного материала, это время сокращается до 15 и 38 суток соответственно (рис. 5).

ВЫВОДЫ

Испытания образцов на коррозионное растрескивание при заданной деформации выявили, что в соединениях сплава АМг5М, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, визуально обнаруживаемые трещины возникают в зоне сплавления шва с основным материалом. Построенные зависимости вероятности образования коррозионных трещин в образцах от напряжений, создаваемых в них вследствие прогиба, свидетельствуют об относительно низких безопасных напряжениях для соединений, сформированных АДСНЭ. В частности, при напряжениях 121 МПа, составляющих 75% от предела текучести основного материала, зарождение коррозионных трещин с вероятностью 5% может произойти уже на 29 суток, а с вероятностью 50% – на 56. После интенсивной пластической деформации металла в зоне образования шва и формирования неразъемного соединения в твердой фазе без расплавления основного материала в образцах, полученных сваркой трением с перемешиванием, коррозионные трещины не возникают в течение 90 суток при напряжениях на уровне предела текучести основного материала.

РЕЗЮМЕ. Досліджено тривкість до корозії під напруженням зварних з'єднань сплаву АМг5М товщиною 2 мм. Випробуванням зразків на корозійне розтріскування, коли задана деформація, виявлено, що в зварних з'єднаннях, отриманих у твердій фазі тертям з перемішуванням, як і в основному матеріалі, тріщини не утворюються упродовж 90 діб

під напруженнями на рівні границі текучості основного матеріалу. Проте після тривалого перебування їх у розчині зафіксовано загальну корозію, інтенсивність якої зростає зі збільшенням створюваних напружень під навантаженням. Встановлено, що за одновісного розтягу зразки і у вихідному стані, і після корозійного впливу за напружень, які становлять 50...100% від умовної границі текучості зварюваних листів, руйнуються по основному матеріалу і границя їх міцності знижується на 12...25%. У зразках зварних з'єднань, отриманих аргонодуговим зварюванням неплавким електродом, внаслідок інтенсивної корозії під впливом агресивного середовища утворюються тріщини, які візуально виявляють у зоні сплавлення шва з основним матеріалом. Побудовано залежності накопиченої ймовірності руйнування зразків таких з'єднань від створюваних у них напружень та визначено безпечні напруження за накопиченої ймовірності руйнування.

SUMMARY. The resistance to stress corrosion cracking of welded joints of AMg5M alloy 2 mm thick obtained by TIG and friction stir welding was investigated. Corrosion cracking testing of the specimens for a given deformation showed that in the welded joints, obtained in the solid phase by friction stir similar to the basic material, cracks are not formed during testing for 90 days at stress on the level of the yield strength of the basic material. However, their long stay in the solution leads to general corrosion, the intensity of which increases with the increase of the generated stress under loading. It was found that during uniaxial tensile fracture the samples, both in the initial state and exposed to the corrosive effect at stresses constituting 50...100% of the yield strength of welding sheets, fracture on the basic material and the tensile strength of the latter is reduced by 12...25%. It has been shown that in samples of welded joints obtained by TIG welding because of intensive corrosion, the cracks are formed under the influence of an aggressive environment leading to the formation of visually detectable cracks in the weld fusion zone with the basic material. The dependences of the cumulative failure probability samples of these joints on the value of created stresses in them were found and the safe stress levels at cumulative failure probability were determined.

1. Рабкин Д. М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. – К.: Наук. думка, 1986. – 256 с.
2. А. с. 195846 СССР, МПК В 23к 35/02. Способ сварки металлов трением / Ю. В. Клименко. – Опубл. 04.05.67; Бюл. № 10.
3. Dawes C. J. and Thomas W. M. Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys // *Welding J.* – 1996. – № 3. – P. 41–45.
4. Pietras A., Zadroga L., and Lomozik M. Characteristics of welds formed by pressure welding incorporating stirring of the weld material (FSW) // *Welding Int.* – 2004. – № 1. – P. 5–10.
5. Johnsen M. R. Friction Stir Welding Takes Off at Boeing // *Welding J.* – 1999. – № 2. – P. 35–39.
6. Okamura H., Aota K., and Ezumi M. Friction Stir Welding of Aluminum Alloy and Application to Structure // *J. of Japan Institute of Light Metals.* – 2000. – № 4. – P. 166–172.
7. Lahti K. FSW – possibilities in Shipbuilding // *Svetsaren.* – 2003. – № 1. – P. 6–8.
8. Arbegast W. J. Friction Stir Welding After a Decade of Development // *Welding J.* – 2006. – № 3. – P. 28–35.
9. Friction Stir Welding Flies High at NASA / J. Ding, R. Carter, K. Lawless, A. Nunes, C. Russell, M. Suits, J. Schneider // *Welding J.* – 2006. – № 3. – P. 54–59.
10. Midling O. T., Oosterkamp L. D., and Bersaas J. Friction Stir Welding Aluminium – process and applications // *Proc. 7th Int. Conf. on Joints in Aluminium (INALCO'98), TWI.* – Cambridge, UK, 1998, 15–17 April.
11. Enomoto M. Friction Stir Welding: research and industrial applications // *Welding Int.* – 2003. – № 5. – P. 341–345.
12. Lanciotti A. and Vitali F. Characterization of friction welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates // *Welding Int.* – 2003. – № 8. – P. 624–630.
13. Фрикционная сварка листовых конструкций из алюминиевых сплавов 1201 и АМг6 / М. М. Штрикман, В. А. Половцев, Г. В. Шилло, Н. В. Макаров, А. Н. Сабанцев // *Сварочное производство.* – 2004. – № 4. – С. 41–47.
14. Патент 54096 Україна, МПК В23К 20/12. Інструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів / А. Я. Іщенко, А. Г. Покляцький. – Опубл. 25.10.2010; Бюл. № 20.

Получено 05.09.2014