

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СТАЛЬ - ПОРИСТЫЙ МАГНИЙ

*Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Селянин П.Н., Бочкарев А.Г.
Тольяттинский государственный университет», Тольятти*

Ключевые слова: композиционный материал, пористый магний, сталь, активирующие флюсы, прочность сцепления, цинковое покрытие.

Аннотация. Для повышения прочности сцепления стали с магнием при жидкофазном формировании композиционных материалов с пористой магниевой матрицей предложено использовать оцинкованную сталь. На основании проведенных исследований установлено влияние природы флюсов и наличия цинкового покрытия на стали на прочность сцепления магния со сталью.

STUDY OF THE PROCESSES OF FORMATION OF STEEL-POROUS MAGNESIUM COMPOSITE MATERIALS

*Kovtunov A.I., Khokhlov Yu.Yu., Selyanin P.N., Bochkarev A.G.
Togliatti State University, Togliatti*

Keywords: composite material, porous magnesium, steel, activating fluxes, adhesion strength, zinc coating.

Abstract. To improve the adhesion strength of steel to magnesium during liquid-phase formation of composite materials with a porous magnesium matrix, it is proposed to use galvanized steel. Based on the conducted research, the influence of the nature of the fluxes and the presence of a zinc coating on the adhesion strength of magnesium to steel has been established.

Введение

Пористые металлы находят применение для изготовления деталей машин и механизмов, строительных конструкций благодаря малому удельному весу, низкому коэффициенту теплопроводности, способности поглощать акустические и электромагнитные колебания, возможности деформироваться при постоянной нагрузке. Они перспективны для изготовления различных поглотителей механической, звуковой, электромагнитной энергии [1-4]. Пористые металлы используются не только для демпфирования ударов, но и для повышения жесткости полых профилей, изготовления негорючих, легких огне- и теплостойких материалов [5]. Такие материалы представляют собой композиционную конструкцию, состоящую из сплошной оболочки и пористого слоя.

С учетом физико-механических свойств для изготовления таких конструкций целесообразно применять стальной профиль и пористый магниевый слой [6]. Технология, предложенная в Тольяттинском государственном университете, основывается на одновременном формировании композита и пористой структуры при заливке литейной формы расплавом металла [7, 8]. При этом для формирования композиционной структуры в литейную форму предварительно предложено устанавливать стальной профиль, а для формирования пористой структуры форма заполняется гранулами из водорастворимых солей. После затвердевания полученную отливку извлекают из

формы и помещают в воду для растворения соли. Размер пор магниевого слоя определяется размером гранул, а пористость находится в пределах 45-70% [7, 8].

Основной проблемой при этом является создание условий для формирования адгезионной связи между компонентами композиционного материала. Применение активирующих флюсов не обеспечивает стабильной адгезионной связи компонентов композита, и прочность сцепления стали и магния в композите невысокая.

Для обеспечения смачивания и образования адгезионной связи между компонентами композита с магниевой матрицей предложено применять предварительное цинкование стали.

Целью работы является повышение прочности сцепления магния со сталью при формировании композиционных материалов за счет применения предварительного цинкования стали.

Методика исследования

Смачивание магнием стали оценивали по качеству покрытия при окунании промышленно выпускаемых оцинкованных пластин из стали Ст3, покрытых активирующим флюсом, в магниевый расплав. Стальные образцы с цинковым слоем размером 75x20x2 мм предварительно обезжиривали, покрывали водным раствором флюса и просушивали. В качестве активирующих флюсов использовали хлористые и хлористо-фтористые флюсы, которые широко применяются при пайке магния и магниевых сплавов (табл. 1) [9].

Табл. 1. Состав активирующих флюсов [9]

№ п/п	Компоненты	Содержание (массовые доли), %	№ п/п	Компоненты	Содержание (массовые доли), %
1	Хлорид калия-	89	7	Хлорид магния	30...40
	Хлорид магния			Хлорид калия	25...36
	Фторид натрия-	8		Хлорид натрия	7
	Трифторид			Хлорид кальция	7
	алюминия	3		Фторид кальция	15...20
2	Оксид цинка		8	Оксид магния	7...10
	Фторид натрия	7-9		Фторид калия	45
	Оксид алюминия	3-5		Трифторид	55
	Хлорид калия-	ост.		алюминия	
3	Хлорид магния		9	Хлорид свинца	95...97
	Хлорид лития	49,5		Хлорид калия	1,5...2,5
	Хлорид калия	31,5		Хлорид кобальта	1,5...2,5
	Хлорид натрия	9			
	Фторид натрия	8			
4	Гексафтороалюминат	2	10	Хлорид калия	35
	натрия			Хлорид лития	30
	Хлорид калия	42,5		Фторид цинка	10
	Хлорид лития	37		Хлорид кадмия	15
	Хлорид натрия	10		Хлорид цинка	10
	Фторид натрия	10			
	Гексафтороалюминат	0,5			
	натрия				

Табл. 1. Продолжение

№ п/п	Компоненты	Содержание (массовые доли), %	№ п/п	Компоненты	Содержание (массовые доли), %
5	Хлорид калия	46	11	Хлорид калия	35
	Хлорид лития	26		Хлорид лития	20
	Хлорид натрия	24		Фторид калия	5
	Фторид натрия	4		Хлорид натрия	35
				Хлорид стронция	5
6	Хлорид калия	42	12	Хлорид магния	38...46
	Хлорид лития	23		Хлорид калия	32...42
	Хлорид натрия	21		Хлорид бария	5...8
	Фтористый литий	10		Хлорид кальция	4
	Фторид натрия	4		Хлорид натрия	4
				Фторид кальция	3...5
				Оксид магния	До 1,5

Прочность сцепления магния и стали оценивали и по усилию вырыва стального образца из магниевого слитка. Стальные образцы готовили по описанной выше технологии, наносили активирующий флюс и устанавливали в стальную цилиндрическую форму. Форму и пластину нагревали до температуры 150-300°C (рис. 1) и заливали расплавленным магнием. Исходя из технологии литья пористых магниевых отливок, температуру заливки выбрали максимально допустимую – 850°C. Площадь контакта стали и магния определяли методами визуально-измерительного контроля разрушенных поверхностей образцов с помощью программы Universal Desktop Ruler.

Исследование химического состава и микроструктуры наплавленного металла проводили методами растровой электронной микроскопии на комплексе сканирующего электронного микроскопа LEO 1455 VP (ZEISS, Германия) с блоками рентгеновского энергетического спектрометра INCA Energy-300 и рентгеновского волнового спектрометра INCA Wave-500.



Рис. 1. Испытания прочности сцепления компонентов композиционного материала:
а) образцы для испытания; б) схема испытания

Результаты и обсуждение результатов исследования

Проведенная серия экспериментов показала, что при активации образцов все флюсы в соответствии с нумерацией в таблице 1 обеспечивали смачивание оцинкованной стали магнием МГ90 (рис. 2). Наблюдалось смачивание и при

использовании в качестве активирующего флюса ВИ2 (образец 12) (рис. 2). Смачивание наблюдалось при температуре расплава выше 750°C и времени выдержки более 3 с.

Прочность сцепления при испытаниях образцов на отрыв стальной пластины зависела от наличия цинкового покрытия на стали и природы активирующего флюса. Прочность сцепления образцов, залитых без активирующего флюса и цинкового покрытия, составляла 6-8 МПа, при этом на поверхности пластин не наблюдалось следов адгезионного взаимодействия стали и магния. Наличие цинкового покрытия позволило повысить прочность сцепления до 22-28 МПа (табл. 2). Повышение температуры формы и пластины до 300°C позволяет повысить прочность сцепления стали с магнием, особенно это заметно на оцинкованных образцах. Поэтому дальнейшие исследования проводили при температуре оснастки 300°C. Применение активирующих флюсов позволило значительно повысить прочность сцепления стали с магнием. Прочность сцепления более 40 МПа обеспечили флюсы №1, №3, №4, №9, №10, №11. Наиболее высокую прочность сцепления обеспечил флюс №4 (табл. 2).



Рис. 2. Смачивание магнием оцинкованной стали и формирование магниевого покрытия при температуре окунания в магниевый расплав 750°C

Табл. 2. Прочность сцепления стали и магния в зависимости от условий литья и природы активирующих флюсов

Влияние природы активизирующих флюсов				
№ п/п	Наличие флюса / Номер флюса	Технологические условия литья	Наличие цинкового покрытия	Прочность сцепления, МПа
1	Без флюса	Подогрев оснастки и пластины 150°С	–	6
2	Без флюса	Подогрев оснастки и пластины 300°С	–	8
3	Без флюса	Подогрев оснастки и пластины 150°С	+	22
4	Без флюса	Подогрев оснастки и пластины 300° С		28
5	Флюс №1			42
6	Флюс №2			28
7	Флюс №3			47
8	Флюс №4			54
9	Флюс №5			34
10	Флюс №6			32
11	Флюс №7			9
12	Флюс №8			7
13	Флюс №9			52
14	Флюс №10			43
15	Флюс №11			43
16	Флюс №12			27

Металлографические исследования образцов, залитых при температуре 300°C с наличием цинкового покрытия с активирующими флюсами и без них, показали наличие адгезионной связи между сталью и магнием (рис. 3). Отсутствие адгезионной связи наблюдалось при активации флюсом №8. При активации флюсами разрушение образцов проходило частично по слою магния, содержащего цинк, и по поверхности стали, легированной цинком (рис. 4, табл. 3).

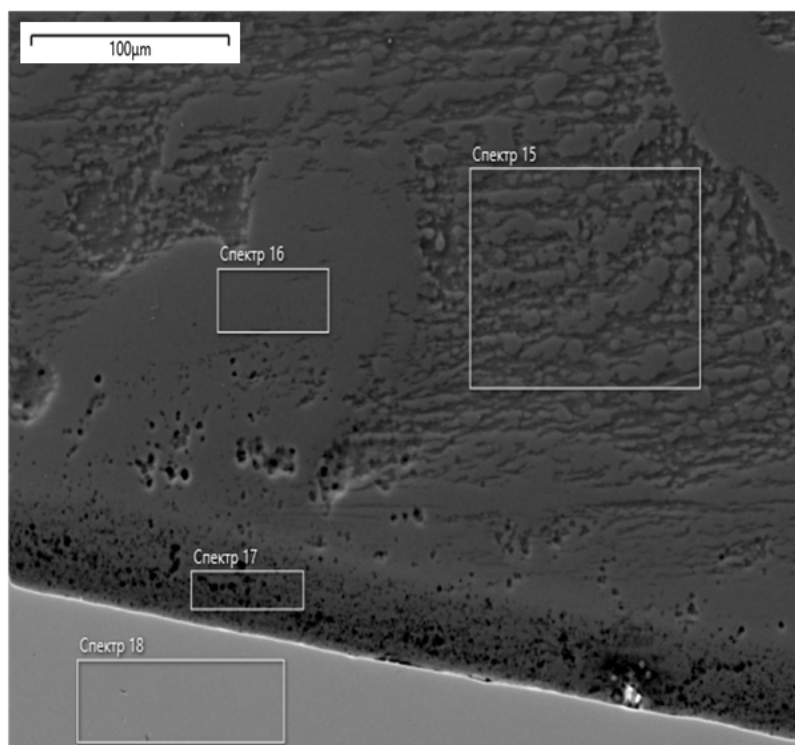


Рис. 3. Граница композиционного материала магний-сталь

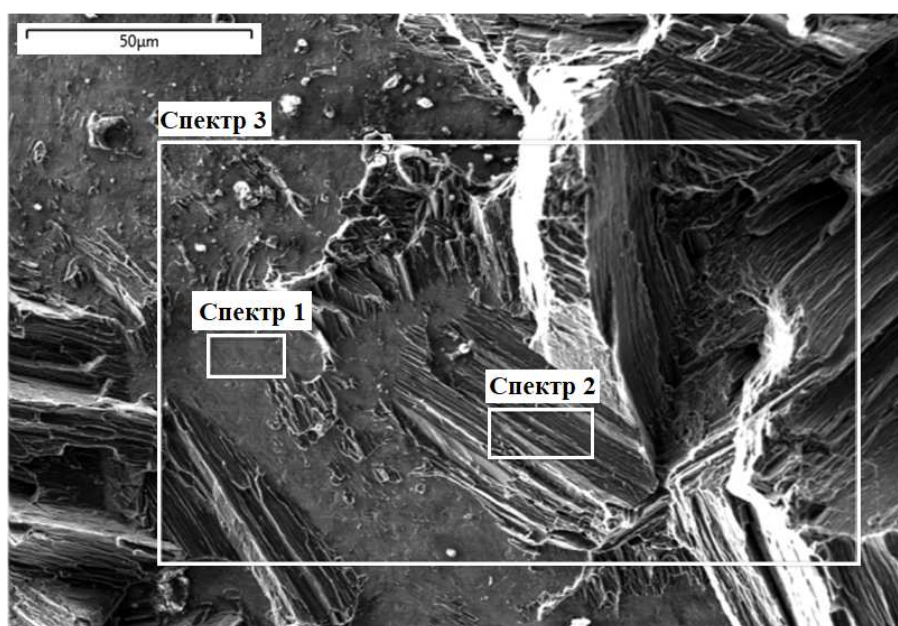


Рис. 4. Структура поверхности разрушения композиционного материала с оцинкованной углеродистой сталью

Табл. 3. Химический состав выделенных областей на поверхности разрушения (рис. 4)

Область химического анализа	Среднее содержание элементов, % (по массе)					
	Al	Zn	Mg	Mn	Si	Fe
Спектр 1	1,2	0,78	16,2	0,31	1,1	80,41
Спектр 2	-	2,3	97,08	-	-	0,37
Спектр 3	-	0,39	65,02	-	-	34,59

Выводы

1. Наличие цинкового покрытия на сталях и активация поверхности паяльными хлористо-фтористыми флюсами обеспечивают образование адгезионной связи между магнием и сталью при формировании композиционных материалов.

2. Активация поверхности флюсами позволяет повысить прочность сцепления оцинкованной стали в 1,5-2 раза.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания №075-03-2026-535 (FEMR-2026-0003).

Список литературы

1. Леушин И.О., Грачев А.Н., Назаров В.Н., Горохов П.А. Пеноалюминий – перспективный материал для производства литых изделий ответственного назначения // Теория и технология металлургического производства. – 2020. – №4 (35). – С. 35-38.
2. Воронин С.В., Лобод П.С. Способы получения пористых материалов на основе алюминия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, №4(6). – С. 1068-1074.
3. Mahshid Mahbod, Masoud Asgari. Elastic and plastic characterization of a new developed additively manufactured functionally graded porous lattice structure: analytical and numerical models // International Journal of Mechanical Sciences. 2019, vol. 155, pp. 248-266.
4. Si-yuan He, Yi-nan Lv, Shi-ting Chen, Ge Dai, Jia-gui Liu, Meng-ke Huo. Gradient regulation and compressive properties of densitygraded aluminum foam // Materials Science and Engineering: A. 2020, vol. 772, pp. 501-511.
5. Хохлов М.А., Ищенко Д.А. Конструкционные сверхлегкие пористые металлы (обзор) // Автоматическая сварка. – 2015. – №3-4 (741). – С. 60-65.
6. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Новский И.В. Перспективы использования магния для производства пеноматериалов // Металлургия машиностроения. – 2013. – №4. – С. 9-11.
7. Kovtunov A.I., Khokhlov Y.Y., Myamin S.V. Production and properties of aluminum foam/titanium composite materials // Tsvetnye Metally. 2020, no.2, pp. 62-66.
8. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Мямин С.В. Технология формирования слоистых композиционных материалов системы титан-пеноалюминий // Металлург. – 2015. – №4. – С. 60-61.
9. Петрунин И.Е., Маркова И.Ю., Березников Ю.И., Бунькина Р.Р., Ильина И.И., Киселев И.И. Справочник по пайке. – М.: Машиностроение, 2003. – 479 с.

Сведения об авторах:

Ковтунов Александр Иванович – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»;

Хохлов Юрий Юрьевич – младший научный сотрудник, заведующий лабораторией кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»;

Селянин Павел Николаевич – старший преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»;

Бочкарев Александр Геннадьевич – к.т.н., доцент кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».