

ВЛИЯНИЕ НИКЕЛЕВОГО СЛОЯ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СТАЛЬ-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, никелевое покрытие.

Аннотация. Для повышения прочности сцепления углеродистой стали с магнием при жидкофазном формировании композиционных материалов с пористой магниевой матрицей предложено использовать промежуточный никелевый слой. На основании проведенных исследований установлено влияние никелевого покрытия на прочность сцепления магния со сталью при формировании композиционных материалов сталь-магний. Для повышения прочности сцепления предложено использовать хлоридные и хлоридно-фтористые паяльные активирующие флюсы. Показано влияние активирующих флюсов на прочность сцепления магния со сталью при наличии промежуточного никелевого слоя.

THE INFLUENCE OF NICKEL LAYER ON THE ADHESION STRENGTH OF STEEL-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, nickel coating.

Abstract. To improve the adhesion strength of carbon steel to magnesium during liquid-phase formation of composite materials with a porous magnesium matrix, it is proposed to use an intermediate nickel layer. Based on the conducted studies, the influence of the nickel coating on the adhesion strength of magnesium to steel during the formation of steel-magnesium composite materials has been established. To improve adhesion strength, it is proposed to use chloride and chloride-fluoride soldering activating fluxes. The effect of activating fluxes on the adhesion strength of magnesium to steel in the presence of an intermediate nickel layer is demonstrated.

Введение

Композитные материалы играют все более значимую роль в промышленности, сочетая преимущества компонентов, используемых для формирования композитов. Прочность изделий из магниевых сплавов и пористых магниевых сплавов могут быть повышены армированием металлами и сплавами с более высоким комплексом механических свойств, в качестве которых успешно применяют сплавы на основе переходных металлов (Cu, Ti, Ni), в числе которых используются углеродистые и высоколегированные хромоникелевые стали [1-3]. Композиционные материалы с магниевой матрицей и арматурой из углеродистых сталей, сочетающие в себе низкую плотность и повышенные прочностные свойства, являются перспективными материалами в машиностроении.

Основной проблемой при жидкофазных способах получения композиционных материалов сталь-магний является создание физико-химических условий для формирования адгезионной связи между компонентами. С железом магний образует диаграмму состояния с практически нерастворимыми

компонентами. Применение активирующих флюсов не обеспечивает стабильной адгезионной связи компонентов композита, и прочность сцепления стали и магния в композите невысокая [4].

Для обеспечения смачивания и образования адгезионной связи между компонентами композита с магниевой матрицей предложено применять промежуточные слои между магнием и железом. В качестве такого слоя можно использовать никелевое покрытие, предварительно нанесенное на сталь.

Максимальная растворимость никеля в δ -Fe составляет 3,24% (ат.), перитектическая точка расположена при 4,3% (ат.) Ni, а концентрация этого элемента в жидкой фазе равна 5,9% (ат.) [5-7]. γ -Fe и никель образуют между собой непрерывный ряд твердых растворов. Равновесная концентрация никеля в α -твердом растворе на основе железа при понижении температуры возрастает и при 300°C достигает ~7,5% (ат.). С понижением температуры значительно расширяется двухфазная область $\alpha+\gamma$, и при 300°C граница $(\alpha+\gamma)/\gamma$ располагается при 56% (ат.) Ni [5-7].

В системе Mg-Ni определено существование двух соединений Mg_2Ni и $MgNi_2$ [8,9]. Для соединения Mg_2Ni установлен инконгруэнтный характер плавления при температуре 768°C. В системе протекают два невариантных превращения эвтектического типа при температурах 512 и 1082°C и невариантное превращение перитектического типа при 768°C; определено, что соединение $MgNi_2$ плавится конгруэнтно. Растворимость Ni в (Mg) очень мала и составляет при 500°C менее 0,04% (ат.). Растворимость Mg в (Ni) также незначительна и составляет при 1100°C менее 0,24% (ат.) [8,9].

Неограниченная растворимость никеля в железе, растворимость никеля в магнии и образование с ним низкотемпературных эвтектик, а также широко освоенные технологии никелерования стали позволяют применять никель в качестве промежуточного слоя при формировании композитов магний-сталь.

Целью работы является повышение прочности сцепления магния со сталью при жидкофазных способах формировании композиционных материалов за счет применения промежуточных металлических слоев из никеля.

Методика исследования

Смачивание магнием стали оценивали по качеству покрытия при окунании стальных образцов толщиной 2 мм с гальваническим никелевым покрытием толщиной 20-30 мкм. Стальные образцы с промежуточным слоем размером 75×20×2 мм предварительно обезжиривали, покрывали водным раствором флюса и просушивали. Для активации поверхности образцов использовали флюсы на основе хлористых и хлористо-фтористых солей, применяемых при пайке магния и магниевых сплавов [10, 11].

В качестве активирующих флюсов использовали хлористые и хлористо-фтористые флюсы, которые широко применяются при пайке магния и магниевых сплавов [10, 11]. Применяли флюсы для высокотемпературной пайки с температурным интервалом активности 420-600°C, содержащие в основном хлориды и фториды щелочных и щелочноземельных металлов. Также использовали флюсы для низкотемпературной пайки с температурным интервалом

активности 390-420°C, содержащие хлориды тяжелых цветных металлов (свинца, кадмия) [10, 11].

Прочность сцепления магния и стали оценивали и по усилию вырывания стального образца из магниевого слитка (рис. 1). Стальные образцы готовили по описанной выше технологии, наносили активирующий флюс и устанавливали в стальную цилиндрическую форму. Форму и пластину нагревали в печи сопротивления до температуры 150-500°C в течение 15-30 минут и заливали расплавленным магнием. Максимальная температура нагрева формы со стальным никелированным образцом обусловлена температурой начала протекания реакции взаимодействия никелевого покрытия с кислородом с образованием оксида никеля [12]. Температура заливки расплава обусловлена максимальной температурой плавки и перегрева магниевого расплава [13]. Площадь контакта стали и магния определяли методами визуально-измерительного контроля разрушенных поверхностей образцов с помощью программы Universal Desktop Ruler (рис. 2).

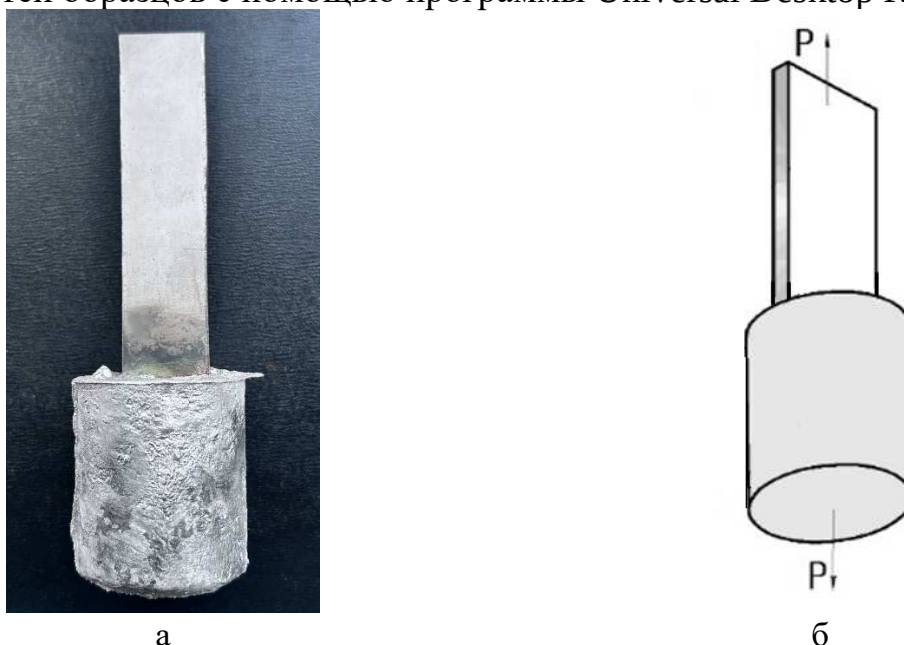


Рис. 1. Испытания прочности сцепления компонентов композиционного материала:
а) образец для испытания; б) схема испытания

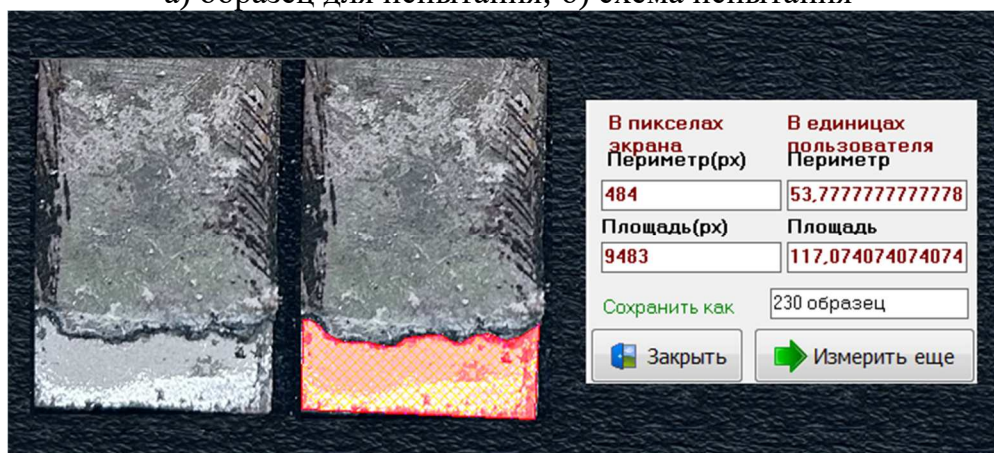


Рис. 2. Определение площади контакта испытуемых образцов

Результаты и обсуждение результатов исследования

Проведенные исследования показали, что сталь с никелевым слоем смачивается магнием при окутании в магниевый расплав с температурой выше

750°C при времени выдержки более 3 с. Смачивание и формирование магниевого слоя на стали наблюдаются при окунании как без применения флюсов, так и при активации никелированной стали паяльными высокотемпературными и низкотемпературными флюсами.

Прочность сцепления при испытаниях образцов зависела от наличия промежуточного никелевого слоя на стали и природы активирующего флюса. Прочность сцепления образцов, залитых без активирующего флюса и промежуточного слоя, составляла 6,1-7,8 МПа. При этом на поверхности пластин не наблюдалось следов адгезионного взаимодействия стали и магния.

Наличие никелевого слоя на стали позволило повысить прочность сцепления до 16-45 МПа (рис. 3, 4). При подогреве стального никелированного образца до 150°C на границе контакта в результате взаимодействия магния с никелем формируется эвтектический слой, содержащий фазы Mg и Mg₂Ni. Средние значения прочности сцепления составляют 16 МПа. Максимальная прочность сцепления наблюдается при подогреве пластины до 300°C. При этом никелевый слой растворяется в магнии. Поверхность разрушения образцов, проходящая по границе контакта, светлая, неокисленная (рис. 2). При более высокой температуре прочность снижается, что связано с окислением никеля при подогреве до 500°C.

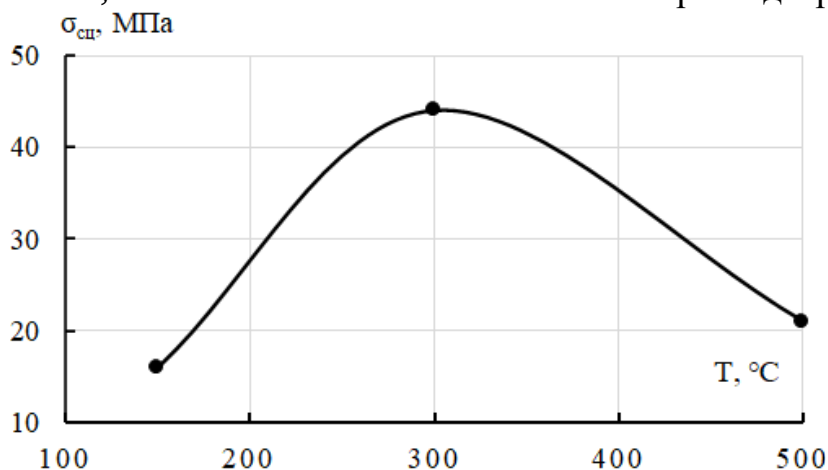


Рис. 3. Зависимость прочности сцепления слоев композита от температуры предварительного подогрева стали с никелевым слоем

При активации никелированной поверхности стали низкотемпературными флюсами, содержащими хлорид свинца или хлорид кадмия, прочность сцепления составляла 40-50 МПа. При этом на поверхности разрушения образцов практически не наблюдались флюсовые включения (рис. 5). Нагрев образцов с активирующими низкотемпературными флюсами до 500°C приводит к активному взаимодействию флюсов в атмосферных условиях с никелевым слоем, продукты которого препятствуют образованию адгезионной связи магния и стали. Прочность сцепления при этом не превышает 10 МПа (рис. 4).

Хлористые и хлористо-фтористые флюсы, применяемые при высокотемпературной пайке магния и магниевых сплавов, обеспечивают прочность сцепления 15-40 МПа при предварительном подогреве до 150°C. Подогрев до 300°C приводит к повышению прочности сцепления до 23-45 МПа. Значения прочности сцепления при нагреве до 500°C составляют 5-27 МПа (рис. 4).

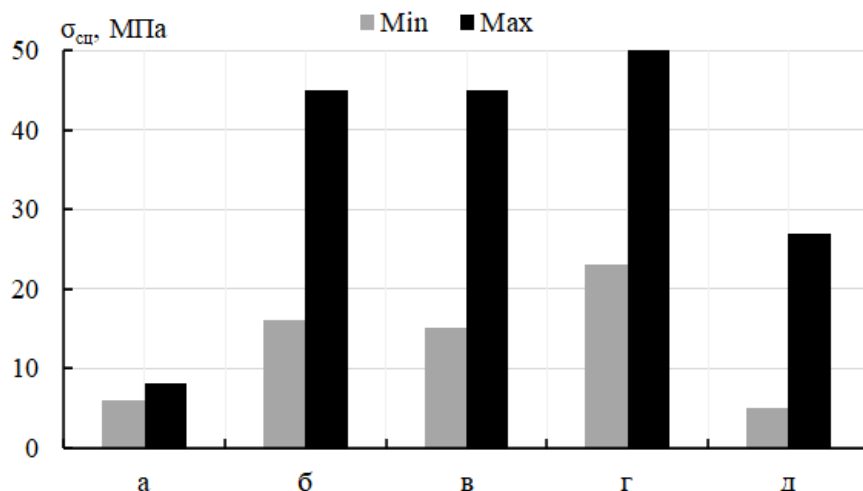


Рис. 4. Значения прочности сцепления слоев композита при предварительном подогреве стальных образцов до: а) 150-300°C, без промежуточного слоя и без флюсовой активации поверхности стали; б) 150-300°C, с промежуточным никелевым слоем, без флюсовой активации поверхности стали; в) 150°C, с промежуточным никелевым слоем и флюсовой активацией поверхности стали; г) 300°C, с промежуточным никелевым слоем и флюсовой активацией поверхности стали; д) 500°C, с промежуточным никелевым слоем и флюсовой активацией поверхности стали



Рис. 5. Внешний вид образцов после испытания при активации поверхности низкотемпературными флюсами: а) на основе хлористого свинца; б) содержащими хлористый кадмий

Выводы

1. Наличие никелевого слоя обеспечивает формирование адгезионной связи в композиционных материалах сталь-магний вследствие образования низкотемпературной эвтектики магния с никелем и неограниченной растворимости никеля в железе.

2. Активация поверхности никелерованной стали паяльными флюсами незначительно повышает прочность сцепления компонентов композиционного материала сталь-магний с промежуточным никелевым слоем.

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. Вишняков Л.Р., Грудина Т.В., Кадыров В.Х. и др. Композиционные материалы: справочник под ред. Д. М. Карпиноса. – Киев: Наукова думка, 1985. –592 с.
2. Сазонов М.А., Чернышова Т.А., Рохлин Л.Л. Композиционные материалы на магниевой основе, армированной частицами: изготовление и свойства (Обзор) // Конструкции из композиционных материалов. – 2010. – №2. – С. 3-22.

3. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Мямин С.В. Исследование процессов формирования композиционных материалов с магниевой матрицей, армированной титаном // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2022. – №3(801). – С. 34-37.
4. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Селянин П.Н., Пудовкин А.А. Влияние состава активирующих флюсов на смачивание и растекание магния по стали // Цветные металлы. – 2025. – №1. – С. 40-45.
5. Кубашевски О. Диаграммы состояния систем на основе железа. – М.: Металлургия, 1985. – 184 с.
6. Банных О.А., Будберг П.Б., Алисова С.П. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. – М.: Металлургия, 1986. – 439 с.
7. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. – М.: Машиностроение, 1997. – Т. 2. – 1023 с.
8. Абрикосов Н.Х. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справочник. – М.: Наука, 1979. – 248 с.
9. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т. – М.: Машиностроение, 1999. – Т. 3, кн. 1. – 872 с.
10. Петрунин И.Е., Березников Ю.И., Бунькина Р.Р. Справочник по пайке. – М.: Машиностроение, 2003. – 479 с.
11. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Селянин П.Н., Бочкарев А.Г. Особенности формирования покрытий системы Mg-Cu на меди // Металловедение. – 2026. – №5. – С. 22-29.
12. Лидин Р.А., Молочко В.А., Андреева Л.Л. Неорганическая химия в реакциях: справочник / под ред. Р.А. Лидина. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Дрофа, 2007. – 637 с.
13. Ян Полмеар. Лёгкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов / пер. с англ. Ю.Л. Цвирко. – М.: Техносфера, 2008. – 463 с.

Сведения об авторах:

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

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

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

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