

УДК 669.715

Д-р техн. наук Калинина Н. Е.¹, Давидюк А. В.¹, д-р техн. наук Калинин В. Т.²,
канд. техн. наук Носова Т. В.¹, д-р техн. наук Носенко О. П.³, Савченко И. С.¹

¹ Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара,

² Национальная металлургическая академия Украины,

³ Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры; г. Днепр

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРИВАЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ ДИСПЕРСНЫМИ КОМПОЗИЦИЯМИ

Цель работы. Повышение комплекса технологических свойств свариваемых конструкционных алюминиевых сплавов за счёт металлургических методов – обработки расплавов дисперсными модификаторами.

Методы исследования. Деформируемые алюминиевые сплавы системы Al-Cu-Mn выплавляли в промышленной индукционной печи емкостью 50 кг. Модификатор – порошковый карбид кремния в таблетированном виде вводили после расплавления шихты при механическом перемешивании.

Полученные результаты. Разработана методика приготовления порошкового модификатора на основе карбида кремния в таблетированном виде. Проведен ряд опытных плавок сплавов 1201 и 2219. Проведен анализ технологических свойств алюминиевых сплавов до и после модифицирования: жидкотекучести, склонности к образованию горячих трещин, герметичности.

Модифицированные сплавы показали высокую стойкость к образованию горячих трещин. Проведен анализ состояния проблемы образования кристаллизационных трещин при сварке алюминиевых сплавов. Достигнуто повышение механических свойств модифицированных алюминиевых сплавов в металле шва.

Достигнуто повышение жидкотекучести модифицированных сплавов на 6 %. Получена однородная дисперсная структура переходной зоны сварных соединений, что подтверждает эффект модифицирования.

Научная новизна. Установлен механизм действия дисперсного модификатора на алюминиевый расплав. Разработана методика изготовления дисперсного модификатора карбида кремния фракцией расплавы до 2 мкм в таблетированном виде. Этим способом возможно изготовление таблеток с широкими интервалами размеров, что обеспечивается сменной матрицей и пуансоном пресс-автомата.

Практическая ценность. Отработана технология ввода дисперсного модификатора в алюминиевые расплавы.

В результате модифицирования достигнуто повышение жидкотекучести, герметичности механических свойств свариваемых алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, модификатор, дисперсная композиция, технологические свойства, жидкотекучесть, трещиностойкость, свариваемость.

Введение

Деформируемые алюминиевые сплавы являются основным конструкционным материалом изделий машиностроения, авиационной и космической техники, благодаря удачному сочетанию высокой удельной прочности, коррозионной стойкости, широкому диапазону прочности и пластичности, а также технологических свойств [1], [2]. Высокопрочные и технологичные алюминиевые сплавы системы Al-Cu-Mn применяют для изготовления баков жидкого топлива, трубопроводов и силовых элементов космических аппаратов. Одним из основных технологических свойств при разработке ответственных конструкций является свариваемость. Деформируемые алюминиевые сплавы различных систем легирования свариваются сваркой плавлением и сваркой в твёрдой фазе (давлением). Наиболее распространена дуговая сварка вольфрамо-

вым электродом. Перспективным направлением является аргонодуговая сварка плавящимся и неплавящимся электродом, а также плазменодуговая и лазерная технология сварки. Выбор способа сварки зависит от свойства сплавов, системы легирования, комплекса механических и технологических свойств [3–5].

Постановка задачи

Целью данной работы является повышение комплекса технологических свойств свариваемых конструкционных алюминиевых сплавов за счёт металлургических методов – обработки расплавов дисперсными модификаторами.

Материалы и методика исследования

Материалом исследования служили деформируемые алюминиевые сплавы системы легирования: Al-Cu-Mn. Химический состав исследуемых сплавов приведен в табл.1

Таблица 1 – Химический состав исследуемых алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Mn

Сплав	Содержание элементов, % масс.						
	Cu	Mn	Fe	Si	Zn	Mg	Al
1201	6,8	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	основа
2219	6,8	0,4	0,3	0,2	0,1	0,02	основа

Выплавку алюминиевых сплавов проводили в индукционной плавильной печи САН емкостью 50 кг. Модификатор в таблетированном виде вводили в конце расплавления шихты при механическом перемешивании. Температура расплава составляла 760 °С. время действия модификатора 10 мин. Разливку металла производили в металлические формы для изготовления образцов на механические испытания. Проводили испытания технологических, механических свойств и металлографический анализ.

Анализ полученных результатов

В работе определяли следующие технологические свойства алюминиевых сплавов: жидкотекучесть, склонность к образованию горячих трещин при сварке, газосодержание и герметичность. Жидкотекучесть характеризует степень подвижности расплава в процессе заполнения формы. Чем выше жидкотекучесть, тем легче получить сложную фасонную отливку с тонким сечением [4]. Жидкотекучесть алюминиевых сплавов 1201 и 2219 до и после модифицирования определяли методом прутковой пробы.

Температура заливки алюминиевых сплавов превышала температуру плавления исследуемых сплавов на 100 °С и составила ~ 840 °С. Значения жидкотекучести сплавов 1201 и 2219 до и после модифицирования приведены в (таблице 2).

Таблица 2 – Результаты определения жидкотекучести алюминиевых сплавов

Состояние сплава	Жидкотекучесть, мм
1201, исходный	280
1201 Модифицированный SiC	290
2219, исходный	360
2219 модифицированный SiC	382

Из таблицы следует, что модифицирование повышает жидкотекучесть исследуемых сплавов 1201 и 2219 на 3 и 6 % соответственно.

С целью улучшения технологических свойств сплавов проведено модифицирование расплавов дисперсными позициями на основе карбида кремния SiC. Как показано в работах [2, 6, 7], этот модификатор является наиболее эффективным для сплавов на основе алюми-

ния по схожести кристаллического строения и атомных радиусов.

Разработана методика изготовления порошкового модификатора. На пресс-автомате ударного действия изготовили прессованные таблетки из смеси порошков SiC фракцией 1...5 мкм и порошков алюминия фракцией 20 мкм в соотношении 1:3 (масс.). Таблетки диаметром 10 мм толщиной 4 мм имели предел прочности на сжатие 8 МПа. Этим способом возможно изготовление таблеток с широкими интервалами размеров, что обеспечивается сменными матрицей и пуансоном пресс-автомата. В промышленных условиях проведен ряд опытных плавов сплавов 1201 и 2219 в исходном состоянии и модифицированием таблетированным модификатором.

Определение склонности к образованию горячих трещин сплавов 1201 и 2219 до и после модифицирования проводили по следующей методике. В форму из песчано-глинистой смеси формовали две пробы в виде колец наружным диаметром 100 мм. Внутренний диаметр колец выполняли за счет простановки стержней из стали 12Х18Н10Т, предварительно окрашенных литейной краской для исключения насыщения алюминиевых сплавов железом, хромом и никелем. Одновременно в форму устанавливали холодильники. Толщину кольца изменяли путем установки в форму стальных стержней различных диаметров. Чем больше диаметр стержня и чем меньше толщина кольца, тем больше усадочные напряжения, возникающие в кольце при остывании. Толщину кольца изменяли с интервалом 2,5 мм. Такая методика позволяет отводить трещины в дальнюю часть отливки, где сплав кристаллизуется в последнюю очередь.

Результаты проведенных экспериментов показали, что сплавы, модифицированные дисперсными частицами карбида кремния, имеют высокую стойкость к образованию горячих трещин. При толщине кольца 10 мм в исходных сплавах отмечены трещины в дальней части от питателя; в модифицированных сплавах таких трещин не наблюдали.

Свариваемость многокомпонентных алюминиевых сплавов зависит от особенностей протекания первичной кристаллизации металла шва и формирования химической и структурной неоднородности. Именно неоднородность определяет условия образования горячих

(кристаллизационных) трещин и физико-механические свойства сварных соединений.

Существует два подхода к решению проблемы горячих трещин в алюминиевых сплавах. Первый подход – термомеханический, основан на прогнозировании уровня напряжений в переходной зоне в процессе кристаллизации [4, 8]. Недостатком метода является большое количество различных параметров, оказывающих влияние на результаты прогноза, которые часто приводят к прямо противоположным выводам. Второй подход базируется на теории кристаллизации алюминиевых сплавов [9]. Используются пробы различных систем легирования на склонность к образованию кристаллизационных трещин в сплавах. В результате можно управлять данным процессом путем изменения химического состава сплава. Однако с развитием номенклатуры алюминиевых сплавов и ужесточением требований по химическому составу, особенно для изделий аэрокосмической техники, возможности управления горячеломкостью легированием сузились. В настоящее время получены данные только для бинарных алюминиевых сплавов и низколегированных сплавов систем Al-Mg, Al-Si [10].

В связи с периодичностью кристаллизации шва горячие трещины могут возникать и исчезать в пределах одного или нескольких слоев кристаллизации. В некоторых случаях, связанных с неблагоприятным выбором присадочного материала, горячие трещины образуются в околошовной зоне, так как именно здесь оказывается зона слабости из-за скопления легкоплавких фаз из основного металла. При образовании крупной магистральной трещины она может распространиться и в зону затвердевшего металла.

Существуют три фактора, которые могут существенно влиять на вероятность образования горячих трещин алюминиевых сплавов в сварных конструкциях: химический состав основного материала, выбор присадочного материала, выбор оптимальной геометрии сварного соединения. Известна зависимость склонности к образованию трещин и от условий сварки [11–13].

При сварке с высоким эффектом тепловложения возможен эффект ликвационного растрескивания как вдоль границы зерна, так и внутри зерен. Зернограничная ликвация способствует наличию оплавленных зерен основного металла в зоне сплавления, что делает ее чувствительной к ликвационному растрескиванию. Образование горячих трещин относится к механизму высокотемпературного растрескивания, который зависит от условий затвердевания алюминиевых сплавов.

На ликвационное растрескивание влияет содержание легирующих элементов и примесей [10]. Во многих свариваемых алюминиевых сплавах обнаруживается неравномерность распределения вредных примесей кремния и железа среди структурных составляющих

шва и зоны сплавления. При этом образуются эвтектики сложного состава, более легкоплавкие, чем в сплавах высокой чистоты. Это приводит к расширению температурного интервала кристаллизации и, как следствие, к повышению склонности металла шва к образованию горячих трещин. При модифицировании расплавов дисперсные частицы SiC служат центрами кристаллизации, что способствует получению мелкозернистой структуры и уменьшению ликвации. Так, в сплаве 1201 (Al – 6% Cu) показатель горячеломкости по результатам испытания образцов Хоулдрокфта снизился от 38 до 19 % по сравнению с исходным состоянием. Склонность к трещинообразованию в швах при сварке плавлением высокопрочных алюминиевых сплавов может быть снижена также за счет применения присадочных проволок с высоким содержанием основных легирующих компонентов (магний, медь, кремний) или дисперсных тугоплавких соединений, в частности карбида кремния.

Изучение механических свойств исследуемых сплавов (табл. 3) показало значительный прирост прочностных параметров модифицированных образцов по сравнению с исходными.

Таблица 3 – Механические свойства исследуемых сплавов в исходном состоянии и после модифицирования

Сплав	σ_b , МПа	σ_t , МПа	δ_5 , %
1201, исходный	440	350	8,0
1201, модифициров.	458	360	7,8
2219, исходный	450	315	9,0
2219, модифициров.	470	328	8,6

Выводы

Проведен анализ технологических свойств конструкционных алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Mn в зависимости от модифицирования. В качестве эффективного модификатора предложен дисперсный карбид кремния SiC фракции до 2 мкм. Предложена технология модифицирования расплавов.

В результате модифицирование сплавов 1201 и 2219 кристаллизационных трещин не обнаружено; достигнуто также увеличение жидкотекучести (до 6 %) и повышение прочностных свойств металла шва. В модифицированных сплавах получена однородная, мелкодисперсная структура переходной зоны сварных соединений, что подтверждает эффективность дисперсного модифицирования.

Список литературы

1. Каблов Е. Н. Основные направления развития материалов для авиационной техники XXI века / Каблов Е. Н. //

- перспективні матеріали. – 2000. – №3. – С. 27–36.
2. Авіаційно-космічні матеріали і технології / Богуслаєв В. О., Качан О. Я., Калинин Н. Е. і др. – Запоріжжя : Мотор Сич, 2009. – 385 с.
 3. Белецкий В. М. Алюминиевые сплавы: Справочник / Белецкий В. М., Кривов Г. А.; под ред. И. Н. Фридляндера. – К. : Коминтех, 2005. – 365 с.
 4. Ищенко А. Я. Алюминиевые высокопрочные сплавы для сварных конструкций // Прогресивні матеріали та технології / Ищенко А. Я. – К. : Академперіодика, 2003. – Т. 1. – С. 50–82.
 5. Мильман Ю. В. Алюминий и его сплавы / Мильман Ю. В., Коржова Н. П., Сирко А. Ч. // Неорганическое материаловедение. – К. : Наук. Думка, 2008. – Т. 2. – С. 52–68.
 6. Калинин Н. Е. Влияние модифицирования на фазовый состав высокопрочных алюминиевых сплавов / Калинин Н. Е., Вилищук З. В. // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Дн-ск : ПСАСА. – 2010. – Вып. 55. – С. 40–44.
 7. Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів : монографія / Калініна Н. Є., Никифорчин Г. М., Калінін О. В. та ін. – Львів : Простір-М. – 2017. – 300 с.
 8. Ищенко А. Я. Кинетика превращений при сварке термически упрочненного алюминиевого сплава 1201 / Ищенко А. Я. // Автоматическая сварка. – 1980. – №1. – С. 29–31.
 9. Рабкин Д. М. Материаловедение сварки алюминия и его сплавов / Рабкин Д. М., Лозовская А. В., Склабинская И. Е. – К. : Наук. думка, 2008. – 158 с.
 10. Влияние способа сварки на сопротивление разрушению соединений алюминий-литиевых сплавов 1420 и 1460 / Лабура Т. М., Бондарев А. А., Лозовская А. В. и др. // Автоматическая сварка. – 2001. – № 7. – С. 12–16.
 11. Кононенко В. Я. Сварка алюминиевых сплавов : справочник / Кононенко В. Я. – К. : Экотехнология. – 2010. – 215 с.
 12. Давыдов В. Г. Исследования ВИЛС в области повышения свойств, качества и технологичности полуфабрикатов из алюминиевых сплавов / Давыдов В. Г., Елагин В. И., Захаров В. В. // Технология легких сплавов. – 2001. – № 516. – С. 6–16.
 13. Dilthey U/ Behr W/ Elektronen – strahschweiben im Atmosphäre // Schweissen and Schneiden. – 2000. – № 8. – P. 461–465.

Одержано 05.06.2018

Калініна Н.Є., Давидюк А.В., Калінін В.Т., Носова Т.В., Носенко О.П., Савченко І.С. Підвищення технологічних властивостей зварювальних алюмінієвих сплавів модифікуванням дисперсними композиціями

Мета роботи. Підвищення комплексу технологічних властивостей зварювальних конструкційних алюмінієвих сплавів за рахунок металургійних методів – обробки розплавів дисперсними модифікаторами.

Методи дослідження. Деформовані алюмінієві сплави системи Al-Cu-Mn виплавляли в промисловій індукційній печі ємністю 50 кг. Модифікатор – порошковий карбід кремнію в таблетованій вигляді вводили після розплавлення шихти при механічному перемішуванні.

Отримані результати. Розроблено методику приготування порошкового модифікатора на основі карбиду кремнію в таблетованому вигляді. Проведено низку дослідних плавок сплавів 1201 і 2219. Проведено аналіз технологічних властивостей алюмінієвих сплавів до і після модифікування: рідкотекучості, схильності до утворення гарячих тріщин, герметичності.

Модифіковані сплави показали високу стійкість до утворення гарячих тріщин. Проведено аналіз стану проблеми утворення кристалізаційних тріщин при зварюванні алюмінієвих сплавів. Досягнуто підвищення механічних властивостей модифікованих алюмінієвих сплавів у металі шва.

Досягнуто підвищення рідкотекучості модифікованих сплавів на 6 %. Отримано однорідну дисперсну структуру перехідної зони зварних з'єднань, що підтверджує ефект модифікування.

Наукова новизна. Встановлено механізм дії дисперсного модифікатора на алюмінієвій розплав. Розроблено методику виготовлення дисперсного модифікатора карбиду кремнію фракцією розплави до 2 мкм в таблетованій формі. Цим способом можливо виготовлення таблеток з широкими інтервалами розмірів, що забезпечується змінними матрицею і пуансоном прес-автомата.

Практична цінність. Відпрацьовано технологію введення дисперсного модифікатора в алюмінієві розплави.

Внаслідок модифікування досягнуто підвищення жидкотекучості, герметичності механічних властивостей зварюваних алюмінієвих сплавів.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, модифікатор, дисперсна композиція, технологічні властивості, вологотекучість, тріщиностійкість, зварюваність.

Kalinina N., Davyduc A., Kalinin V., Nosova T., Nosenko O., Savchenko I. Increase of technological properties of welded aluminium alloys by nanodispersie compositions modifying

Purpose. Increase the complex technological properties of welded structural aluminum alloys due to metallurgical methods - processing of melts with dispersed modifiers.

Methods of research. Wrought aluminum alloys of the Al-Cu-Mn system were melted in an industrial induction furnace with a capacity of 50 kg. The modifier – powdered silicon carbide in tablet form was introduced after melting the mixture using mechanical stirring.

Results. The method of preparation of the powder modifier based on silicon carbide in tablet form has been developed. A number of experimental melts of alloys 1201 and 2219 were carried out. The technological properties of aluminum alloys were analyzed before and after modifying: fluidity, tendency to hot cracking, tightness.

Modified alloys showed high resistance to hot cracking. The analysis of the state of the problem of the formation of crystallization cracks during welding of aluminum alloys has been carried out. An increase in the mechanical properties of modified aluminum alloys in the weld metal has been achieved.

Modified alloys fluidity increase by 6% was achieved. A homogeneous dispersed structure of the transition zone of welded joints was obtained, which confirms the effect of modification.

Scientific novelty. The mechanism of the action of the dispersed modifier on the aluminum melt is established. A method has been developed for manufacturing a dispersed modifier of silicon carbide with a fraction of melts up to 2 mm in tablet form. This method makes it possible to manufacture tablets with wide intervals of sizes, which is ensured by a replaceable die and punch of the press machine.

Practical value. A technology has been developed to introduce a dispersion modifier into aluminum melts.

As a result of the modification, an increase in the fluidity and tightness of the mechanical properties of the welded aluminum alloys was achieved.

Key words: aluminium alloy, modifier, dispersive compositions, technological properties, cracks.
