УДК 669

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ АДДИТИВНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

Аносов М.С. – доцент кафедры технологии и оборудования машиностроения,
Лайша А.К. – ассистент кафедры автоматизации машиностроения,
Пьянзин А.М. – ассистент кафедры автоматизации машиностроения, Аносова Е.С. – ассистент кафедры автоматизации машиностроения,
Едакин А.А. – инженер-робототехник
Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева
Россия, г. Нижний Новгород

Аддитивное электродуговое выращивание (WAAM) является высокопроизводительным методом для оперативного изготовления изделий машиностроения, в том числе для работы в экстремально низкотемпературных условиях Арктики [1, 2]. Перспективным материалом для таких применений служит хладостойкий алюминиевый сплав АМг5, однако его механические свойства при аддитивном выращивании уступают характеристикам деформированного проката [2, 3].

Для решения этой проблемы перспективен метод наномодифицирования материала легирующими элементами в процессе аддитивного выращивания, который, как показали исследования в области сварки, позволяет добиться мелкозернистой структуры и, как следствие, повысить прочность и ударную вязкость материала [4, 5]. Однако его применение в контексте WAAM изучено недостаточно. Цель данной работы — исследовать эффективность наномодифицирования сплава АМг5 в процессе WAAM для повышения его механических свойств на основе комплексного анализа, включая квантово-механическое моделирование и разработку экспериментальной методики.

1. Методология исследований

Для изучения влияния легирующих элементов на прочностные характеристики алюминия были проведены квантово-механические расчеты в приближении теории функционала плотности (DFT) с использованием программного пакета FHI96md [6]. Моделирование межзеренной границы проводилось на системе двух тонких нанопластин гранецентрированной кубической решетки алюминия с параметром a=4,040. На контактирующих поверхностях создавались точечные дефекты (вакансии) для большего соответствия реальной структуре. Исследовалось влияние единичных атомов примесей (Ti, Zr, Mg, Sc, P), вводимых в граничный слой в режиме замещения или внедрения (для фосфора). Прочность границ оценивалась путем расчета зависимости напряжения от величины растяжения системы [7].

Экспериментальная часть работы по аддитивному выращиванию и наномодифицированию проводилась на специально разработанном стенде, включающем портальный фрезерный станок с ЧПУ, систему электродуговой наплавки, печатающую головку оригинальной конструкции и комплекс систем мониторинга. Для регистрации параметров процесса использовались датчики силы тока и напряжения, а также датчик акустической эмиссии. Сбор и обработка данных осуществлялись с применением специализированного программного обеспечения и облачного сервиса Microsoft Azure.

Заготовки из проволоки АМг5 изготавливались в виде стенок шириной в один наплавочный валик. Погонная энергия наплавки варьировалась в диапазоне 150–1200 Дж/мм. Из полученных заготовок вырезались образцы для механических испытаний и металлографических исследований.

2. Результаты и их обсуждение

Проведенные механические испытания образцов из сплава АМг5, полученных методом WAAM, подтвердили их более низкие прочностные характеристики по сравнению с прокатом (Табл. 1). Предел прочности и предел текучести при комнатной температуре для аддитивно полученного материала составили 210 МПа и 110 МПа против 235 МПа и 150 МПа для проката соответственно. Аналогичная тенденция наблюдалась и для ударной вязкости (KCV), значения которой для образцов, полученных 3D-печатью, были на 15–30% ниже в диапазоне температур от –80°C до +20°C. Микроструктурный анализ выявил существенное влияние погонной энергии процесса на размер зерна и структурную однородность, при этом оптимальное значение составило около 420 Дж/мм.

Таблица 1. – механические свойства алюминиевого сплава Амг5

Материал	Температура	Предел текучести, МПа	Предел прочности, Мпа	Относительное удлинение, %
Амг5, прокат	+20	150	235	12,5
Амг5, 3D-печать	+20	110	210	12,5

Для преодоления выявленного отставания в свойствах было предложено наномодифицирование расплава. Результаты квантово-механического моделирования продемонстрировали значительный потенциал легирования титаном и цирконием. Как видно из Табл. 2, присутствие единичного атома титана на границе зерен алюминия увеличивает теоретический предел прочности с 4,5 ГПа до 9,0 ГПа, а пластичность (критическое удлинение) – с 4% до 10%. Цирконий показал еще более значительное упрочняющее действие (13,3 ГПа), в то время как скандий повышал в основном пластичность (13%).

Таблица 2 – Влияние примесей на предел прочности (P) и предельное удлинение (L) межзеренных границ в алюминии.

Система	P, ГПа	L, %
Al (без примесей)	4,5	4
Al-Ti	9,0	10
Al-Zr	13,3	7,5
Al-Sc	4,5	13

Дальнейшее моделирование интерметаллидных фаз на основе системы Ti-Al показало, что с ростом содержания титана (от Al_3Ti к Ti_3Al) предел прочности монотонно возрастает до 29,0 ГПа, однако пластичность при этом снижается. Наиболее сбалансированным сочетанием прочности и пластичности обладает фаза Al_3Ti.

На основе результатов моделирования была разработана принципиальная схема стенда для наномодифицирования сплава АМг5 в процессе WAAM. Ключевыми элементами системы являются: устройство подачи нанопорошков, основанное на принципе электростатического распыления и псевдоожижения; система вибро- и ультразвуковой обработки для обеспечения равномерного распределения наночастиц в объеме расплава; комплекс датчиков (сила тока, напряжение, акустическая эмиссия) и система сбора данных для интеллектуального управления процессом в реальном времени. Предложенная технология позволяет вводить в сварочную ванну дозированные количества нанопорошков циркония или интерметаллида Al_3Ti. Ожидается, что данные добавки, выступая центрами кристаллизации, будут способствовать формированию мелкозернистой и однородной структуры, что, в свою очередь, приведет к повышению прочности и хладостойкости конечного продукта.

Проведенные исследования подтвердили, что аддитивное электродуговое выращивание заготовок из сплава АМг5 сопровождается снижением механических свойств и ударной вязкости по сравнению с традиционным прокатом. В качестве эффективного пути устранения данного недостатка предложено наномодифицирование расплава.

Квантово-механическое моделирование позволило теоретически обосновать выбор легирующих элементов – титана и циркония, которые значительно повышают прочность межзеренных границ алюминия. Для практической реализации процесса разработан комплексный экспериментальный стенд, обеспечивающий дозированную подачу наночастиц, их равномерное распределение в объеме наплавляемого материала и комплексный контроль параметров процесса.

Дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальную апробацию предложенной методики, изучение микроструктуры и механических свойств наномодифицированного сплава АМг5, а также оптимизацию режимов наплавки для достижения максимального уровня свойств, необходимых для работы в условиях низкотемпературной Арктики.

Исследование выполнено в рамках гранта РНФ № 25-19-00534 "Разработка научных основ усталостного разрушения послойно модифицированных композиционных материалов, полученных аддитивной электродуговой наплавкой".

Список литературы:

1. Kabaldin, Y.G. Digital Twin for 3D Printing on CNC Machines / Y.G. Kabaldin, P.V.Kolchin, D.A. Shatagin, M.S. Anosov // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39. – Issue 10. – P. 848-851.

2. Кабалдин Ю.Г. и др. Пути повышения механических свойств алюминиевых сплавов, получаемых методом 3D-печати электродуговой наплавкой // Научная статья. – 2021.

3. Карташов М.Ф. и др. Исследования влияния деформационного упрочнения на механические свойства образцов из сплава АМг5, полученных способом многослойной наплавки // Вестник МГТУ им. Носова. – 2019. – Т. 17. – № 3. – С. 38-45.

4. Kumar, R. et al. Enhancement of weld strength using SiC nanoparticle reinforcement in steel welds // Materials Science and Engineering A. – 2019. – Vol. 753. – P. 218-225.

5. Chen, J. et al. Influence of TiO_2 nanoparticles on fatigue behavior of aluminum alloy welds // International Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 144. – Article 106033.

6. Заводинский В.Г. Компьютерное моделирование наночастиц и наносистем. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 176 с.

7. Кабалдин Ю.Г., Заводинский В.Г. Квантово-механическое исследование влияния примесей на прочностные характеристики феррита (α-Fe) // Computational nanotechnology. – 2017. – № 1. – С. 36-38.