

УДК 621.791.92

Влияние термической обработки на трещинообразование лазерно-наплавленных высокоэнтروпийным сплавом Fe–Ni–Co–Cr–В покрытий

Гусев Руслан Юрьевич

gusevry@ex.istu.edu

SPIN-код: 9772-3410

Михайловский Георгий Максимович

SPIN-код: 7577-7222

Гречнева Мария Васильевна

SPIN-код: 6215-6684

ИРНИТУ, Иркутск, Россия

Аннотация. Рассмотрено влияние термической обработки в диапазоне температур 400–800 °С на твердость и трещинообразование лазерно-наплавленных покрытий системы Fe–Ni–Co–Cr–В, полученных на сталях различного типа. Представлены результаты сравнительных исследований покрытий, сформированных на углеродистой стали 45 и аустенитной нержавеющей стали 308. Показано, что материал подложки оказывает определяющее влияние на формирование структуры, уровень твердости и развитие трещин после длительной тепловой выдержки. Установлено, что на нержавеющей стали формируется термостабильная игольчатая структура без трещин, тогда как на углеродистой стали образуется сверхтвердый слой с интенсивным трещинообразованием. Сделаны выводы о необходимости учета материала основного металла при разработке технологий лазерной наплавки борсодержащих покрытий для высокотемпературных условий эксплуатации.

Ключевые слова: лазерная наплавка, сварочные процессы, никель-кобальт-хромовые покрытия, бор, зона термического влияния, трещинообразование

Введение. Лазерная наплавка относится к сварочным и родственным процессам, реализуемым с использованием высококонцентрированных источников энергии, и широко применяется для формирования функциональных покрытий. Существенные температурные градиенты при наплавке приводят к формированию выраженной зоны термического влияния и активному диффузионному взаимодействию наплавленного слоя с основным металлом [1]. Борсодержащие Ni–Co–Cr покрытия характеризуются высокой твердостью, однако их поведение при последующей термической обработке в значительной степени определяется материалом подложки. Высокоэнтропийные сплавы — это новая технология проектирования сплавов, содержащая пять или более основных элементов с содержанием каждого химического элемента от 5 до 35 ат. %. Кроме основных элементов, высокоэнтропийный сплав содержит некоторые минорные элементы с содержанием каждого элемента ниже 5 ат. %. Энтропия смешивания этих сплавов выше из-за случайных или жидкостных растворов. Благодаря синтезу простого твердого раствора, ВЭС уменьшают количество фаз, присутствующих в смеси, и создают простую микроструктуру. Эта характеристика высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) расширяет область их применения в конструкционных металлических материалах. Высокоэнтропийные сплавы обладают превосходными свойствами,

такими как износостойкость, стойкость к окислению, коррозионная стойкость, высокая твердость и прочность, низкая тепло- и электропроводность и низкий коэффициент теплового расширения [1].

Методы и материалы; результаты. Наплавка выполнялась порошковой смесью системы Ni-Co-Cr-B в один проход при мощности лазерного излучения 500 Вт, частоте 20 Гц и ширине дорожки 5 мм с локальной защитой аргоном. В качестве подложек использовались сталь 45 и нержавеющая сталь 308 [2–4]. После наплавки образцы подвергались термической обработке при 400, 600 и 800 °С с выдержкой 4 ч и охлаждением на воздухе. Микротвердость измерялась методом Виккерса. Морфологическая характеристика и химический состав анализировались с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС). Фазовый состав покрытия также анализировался методом рентгеновской дифракции (РД) с использованием излучения медной мишени ($\lambda = 0,154060$ нм).

Показано, что при наплавке на нержавеющую сталь 308 в наплавленном покрытии формируется игольчатая структура без пор и трещин, сохраняющаяся после дальнейшей термической обработки. Твердость покрытия составляет 550–800 HV во всем исследованном диапазоне температур 400–800 °С. При наплавке на сталь 45 формируется сверхтвердый слой с твердостью до 2000 HV в диапазоне температур испытаний 400–800 °С, сопровождающийся интенсивным трещинообразованием. Трещины распространяются от поверхности покрытия и останавливаются в переходной зоне между наплавленным слоем и основным металлом.

Заключение. Результаты работы показали, что термическая обработка лазерно-наплавленных покрытий системы Ni-Co-Cr-B в интервале 400–800 °С приводит к принципиально различному поведению покрытий в зависимости от материала подложки. На аустенитной нержавеющей стали обеспечивается структурная стабильность и отсутствие трещин при нагреве до 800 °С, тогда как на углеродистой стали 45 реализуется механизм формирования сверхтвердого слоя с трещинами. Полученные данные подчеркивают необходимость учета свойств основного металла при разработке технологий лазерной наплавки борсодержающих покрытий деталей машин и механизмов для высокотемпературных условий эксплуатации.

Список источников

- [1] Kumar D. Recent advances in tribology of high entropy alloys: A critical review. *Progress in Materials Science*, 2023, pp. 69–72. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101106>
- [2] Wang H., Ren K., Xie J., Zhang C., Tang W. Friction and wear behavior of single-phase high-entropy alloy FeCoNiCrMn under MoS₂-oil lubrication. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2012, vol. 72, no. 5, pp. 665–672. <https://doi.org/10.1108/ILT-08-2019-0303>
- [3] Li S., Nie F., Ding J., Mao G., Guo Y., Cao T., Xiang C., Dong H. Influence of Laser Power on CoCrFeNiMo High-Entropy Alloy Coating Microstructure and Properties. *Materials*, 2025, vol. 18(11), art. no. 2650. <https://doi.org/10.3390/ma18112650>
- [4] Du M., Liu B., Liu Y., Yang Y. Dynamic Behavior of Additively Manufactured FeCoCrNi High Entropy Alloy. *Metals*, 2023, vol. 13, art. no. 75. <https://doi.org/10.3390/met13010075>