

**Александр Анатольевич Хлыбов¹, Дмитрий Александрович Рябов¹,
Александр Александрович Соловьев^{1*}, Анна Алексеевна Шуянова¹**

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

*solovev.aa@nntu.ru

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТОГО БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА СВ-08Г2С – СВ-07Х25Н13, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ WAAM

Целью представленной работы является исследование влияния технологических параметров WAAM на структуру и механические свойства слоистого биметаллического композита СВ-08Г2С – СВ-07Х25Н13. Экспериментальные образцы для исследований изготавливались методом WAAM при различных стратегиях и удельных энергиях печати. Проводились исследования геометрии образцов, микроструктуры шлифов и механические испытания. Показано, что режимы WAAM и стратегия наплавки во многом определяют структуру основных слоев и переходных зон биметаллического композита, а также его механические характеристики.

Ключевые слова: аддитивное производство, WAAM, биметаллы, слоистые композиты, СВ-08Г2С, СВ-07Х25Н13, микроструктура, механические характеристики.

Alexander A. Khlybov, Dmitriy A. Ryabov, Alexander A. Solovyov, Anna A. Shuyanova

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE LAYERED BIMETALLIC COMPOSITE WELD-08MN2SI – WELD-07CR25NI13 OBTAINED BY THE WAAM METHOD

The purpose of the presented work is to study the effect of WAAM technological parameters on the structure and mechanical properties of the layered bimetallic composite *Weld-08Mn2Si - Weld-07Cr25Ni13*. Experimental samples for research were produced using the WAAM method with various printing strategies and specific energies. The geometry of the samples, the microstructure of the grinds and mechanical tests were carried out. It is shown that the WAAM modes and the surfacing strategy largely determine the structure of the main layers and transition zones of a bimetallic composite, as well as its mechanical characteristics.

Keywords: additive manufacturing, WAAM; bimetals; layered composites, Weld-08Mn2Si, Weld-07Cr25Ni13, microstructure, mechanical characteristics.

Особое внимание уделяется созданию изделий из слоистых композиционных биметаллических материалов методом 3D-печати. Традиционно выделяют две аддитивные технологии изготовления изделий,

которые различны по способу подачи материала в формообразующую зону: печать в порошковом слое (PBS) и направленное осаждение (DED). Первая технология основана на поэтапном расплавлении находящегося на поверхности стола порошка сфокусированным источником энергии. Вторая технология (DED) реализуется при непосредственной подаче материала в зону печати с одновременным образованием расплава в защитной атмосфере [1].

Наиболее производительным и простым с точки зрения реализации является метод 3D-печати электродуговой наплавкой – технология WAAM. Это обусловлено относительно малой стоимостью оборудования и наплавляемого материала (сравнивая с лазерным или электронно-лучевым оборудованием), а также достаточным уровнем изучения сварочных процессов [2].

К наиболее востребованным системам материалов относятся биметаллы типа «низколегированная углеродистая сталь – нержавеющая хромоникелевая сталь», получившие широкое распространение в энергетической, военной и аэрокосмической промышленности [3]. Однако несмотря на большой научный задел в области аддитивных технологий, структура и механические свойства биметаллической системы Св-08Г2С – Св-07Х25Н13 изучены недостаточно.

Таким образом, исследование влияния технологических параметров WAAM на структуру и механические свойства слоистого биметаллического композита Св-08Г2С – Св-07Х25Н13 является актуальной задачей.

Экспериментальные образцы из слоистого композита были получены с использованием лабораторной экспериментальной установки WAAM. В качестве защитной атмосферы при наплавке сварочной проволокой Св-08Г2С применялась сварочная смесь состава CO_2 - 80% и Ar - 20%, а при наплавке Св-07Х25Н13 - смесь Ar - 98% и CO_2 - 2%.

Образцы для микроструктурного анализа подготавливались по стандартной методике. Изображения микроструктур получали с применением оптического металлографического микроскопа «KEYENCE VHX-1000».

Для исследования механических характеристик полученного биметаллического композита дополнительно были изготовлены экспериментальные плоские образцы на растяжение согласно ГОСТ 1497-84. При изготовлении образцов использовали две стратегии 3D-печати, обеспечивающие различную ориентацию слоев в слоистом композите. Испытания на растяжение производили на разрывной машине Tinius Olsen 600SL при скорости нагружения 5 мм/мин и температуре 20°C.

На рис. 1 показан общий вид вертикальных стенок из сталей Св-08Г2С и Св-07Х25Н13, при этом для проволоки Св-08Г2С использован режим «Double Pulse» а для проволоки Св-07Х25Н13 применены различные технологические режимы WAAM.

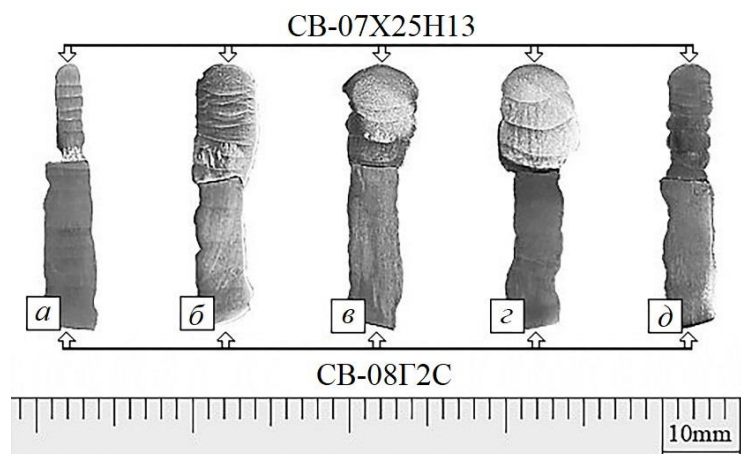


Рис. 1. Геометрия полученных методом WAAM образцов:
а, б – режим короткого замыкания с $Q=0,5$ кДж/мм (а) и $Q=0,86$ кДж/мм (б) и температурой термического цикла (T_c) 80°C ; в – д – импульсный капельный режим ($Q=0,6$ кДж/мм) с $T_c=350^\circ\text{C}$ (в), 750°C (г) и 80°C (д)

Рис. 1 отражает формообразование слоистой биметаллической заготовки при различных удельных энергиях (рис. 1а, б), различных межслойных термических циклах T_c (рис. 1в, г, д), а также при различных режимах переноса наплавочного материала в сварочную ванну (рис. 1б, д).

Следует отметить экономическое и временное (с точки зрения получения готового изделия) превосходство режима Double Pulse с управляемым капельным переносом наплавочного материала в сварочную ванну, удельной затрачиваемой энергией $Q=0,6$ кДж/мм и термическим циклом с остыванием наплавленного слоя ($T_c=80^\circ\text{C}$) (рис. 1д). Для снижения времени охлаждения наплавленного слоя предпочтительно применение внешне охлаждаемой подложки из углеродистой стали.

Механические свойства биметаллического композита ER70S-6 – ER309LSI существенно зависят от стратегии построения композита при наплавке и режимов последующей термической обработки. Значения прочностных свойств композита после WAAM формируются в зоне усредненных значений прочностных характеристик применяемых материалов по отдельности. При этом для всех образцов не наблюдается разрушения по границе раздела двух материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Herzog D. Additive manufacturing of metals / D. Herzog [et al.] // *Acta Materialia*. 2016. V. 117. P. 371–392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
2. Ziętała M. Microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping / M. Ziętała [et. al] // *Material Science and Engineering*. 2016. V. 677. P. 1–10. DOI: 10.1016/J.MSEA.2016.09.028.
3. Wu B. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement / B. Wu [et. al] // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. V. 35. P. 127–139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.

REFERENCES

1. Herzog D. Additive manufacturing of metals / D. Herzog [et al.] // *Acta Materialia*. 2016. V. 117. P. 371–392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
2. Ziętała M. Microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping / M. Ziętała [et. al] // *Material Science and Engineering*. 2016. V. 677. P. 1–10. DOI: 10.1016/J.MSEA.2016.09.028.
3. Wu B. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement / B. Wu [et. al] // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. V. 35. P. 127–139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.