

УДК 620.186

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 08X18H10T
НА ФОРМИРОВАНИЕ ПРИГРАНИЧНОЙ ОБЛАСТИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА
FE-CU, СФОРМИРОВАННОГО МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ
АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

К.С. Осипович

Научный руководитель: профессор, д.т.н. Е.А. Колубаев
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055
E-mail: Osipovich_k@ispms.tsc.ru

**THE INFLUENCE OF ALLOYING ELEMENTS OF STAINLESS STEEL AISI 321 ON THE
FORMATION OF THE INTERFACIAL OF A FE-CU BIMETALLIC SAMPLE PRODUCED
BY WIRE-FEED ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING**

K.S. Osipovich

Scientific Supervisor: Prof., Dr. E.A. Kolubaev
Institute for Physics of Strength and Material Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Russia, Tomsk, 2/4 Akademicheskii ave., 634055
E-mail: Osipovich_k@ispms.tsc.ru

***Abstract.** In the present work microstructural analysis of the boundary area of bimetallic sample Fe-Cu was carried out. The sample in the form of a vertical "wall" of heterogeneous materials - stainless steel AISI 321 and copper C11000 was obtained by wire-feed electron-beam additive manufacturing. The presence of sharp boundaries between inclusions and matrix of these immiscible materials was shown. The steel inclusions had intraphase delamination. Neither between the basic elements of the bimetallic compound Fe and Cu nor between the alloying elements included in the stainless steel, the formation of intermetallic compounds was detected.*

Введение. Разнородные изделия изготавливаются с использованием двух (биметаллические) и более металлов или сплавов (полиметаллические). Это связано с тем, что многие промышленные проблемы не могут быть решены с использованием только отдельного материала на основе металла или сплава (монометаллических материалов). Например, в определенных условиях эксплуатации материал должен иметь высокую скорость теплопередачи с минимальными тепловыми потерями, а также противостоять любой форме коррозии в рабочей среде. Медь обладает высокими характеристиками теплопроводности, но при этом имеет меньшую коррозионную стойкость по сравнению с нержавеющей сталью. Таким образом, соединения «медь – нержавеющая сталь» требуются в атомной энергетике в качестве одного из важных компонентов вакуумных камер для ускорителей частиц, а также в криогенной технике, обеспечивающих высокую электрическую проводимость меди и высокой механической прочности стали. Чтобы объединить преимущества нержавеющей стали с медью, необходимо применить подходящий процесс изготовления. Но, нержавеющая сталь и медь являются разнородными материалами с сильно различными тепловыми, физическими и химическими свойствами. Медь может проводить

тепловую энергию в 10 раз быстрее, чем сталь, которая имеет тенденцию быстро рассеивать тепло, что затрудняет достижение точки плавления во время изготовления. Это объясняется различием в значениях температуры плавления (Cu – 1085° C, SS – 1400÷1500° C) и теплопроводности (Cu – 401 Вт/мК, SS – 17÷19 Вт/мК), что затрудняет задачу соединения для любых процессов сварки плавлением. В дополнение к этому, медь имеет очень ограниченную растворимость со сталью в жидком состоянии, а также проникновение меди вдоль зоны теплового воздействия стали может привести к горячему растрескиванию [1]. При этом, на диаграмме состояния системы Fe-Cu не содержится интерметаллидных фаз, за исключением малой области ограниченной растворимости между Cu и Fe [2]. Водород легко растворяется в жидкой меди и способствует образованию пор в области соединения биметалла [3]. Жидкофазное разделение между Cu и Fe обычно наблюдается в процессах лазерной, электронно-лучевой и дуговой сварки [4]. В этом случае наличие жидкофазного разделения приводит к формированию пор или трещин, что негативно сказывается на механических свойствах готового изделия. Во избежание данных проблем при изготовлении биметаллического изделия из разнородных материалов, которые приводят к потере качества и надежности готовых конструкций, необходимо исследовать закономерности формирования структуры. Поэтому целью данной работы является изучение формирования приграничной области биметаллического образца на основе разнородных материалов нержавеющей стали 12X18H10T и чистой меди М1, сформированных методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии.

Экспериментальная часть. Образцы были получены на экспериментальной установке для аддитивного электронно-лучевого производства металлических изделий. Для 3D-печати образцов использовали проволоку из нержавеющей стали 12X18H10T и проволоку технической чистой меди марки М1. Диаметр проволоки из стали составлял 1.2 мм, диаметр медной проволоки – 1 мм. Стальную подложку закрепляли на трехкоординатном водоохлаждаемом столе. Электронным лучом формировалась ванна расплава. В нее подавали проволоку и осуществляли 3D-печать вертикальной стенки методом послойного нанесения материала. Для изготовления вертикальной стенки была выбрана поочередная стратегия нанесения разнородных проволок. При использовании разнородных материалов с различными теплофизическими свойствами в качестве филаментов для печати необходимо варьировать низкими и высокими значениями тепловложений в зависимости от материала. Из образцов в виде вертикальных «стенок» с помощью электроэрозионного станка DK7750 вырезались образцы для изучения микроструктурных исследований. Анализ элементного состава биметаллического образца проводили с помощью растрового электронного микроскопа Zeiss LEO EVO 50 с приставкой для энергодисперсионного элементного микроанализа.

Результаты. Макроструктура аддитивного биметаллического изделия из нержавеющей стали и меди показала наличие ярко выраженной границы при смене подачи проволочного филамента стали на медь. В медной области наблюдаются включения Fe-Cr-Ni произвольной формы, в стальной области – медные включения круглой формы. Различие форм включений напрямую зависит от термофизических свойств стали и меди, так как устанавливается конвективными процессами, а именно термокапиллярной конвекцией. Так как электронно-лучевое аддитивное производство подразумевает под собой быстрое затвердевание уже нанесенного слоя, то скорость передачи тепла от нанесенного слоя к первому слою высока. За счет высокой теплопроводности меди λ_{Cu} , которая почти в 25 раз превышает

теплопроводность стали λ_{ss} . Поэтому система претерпела переохлаждение и вошла в широкий зазор смешиваемости. В зазоре смешиваемости переохлажденная жидкость разделилась на жидкое железо и жидкую медь. Кроме того, обе разделенные жидкие фазы были затвердевшие, одна в виде частиц, а другая в виде матрицы. Необходимо отметить, что в таком случае на формирование частиц на поверхности матрицы влияние оказывает не только эффект поверхностного натяжения между жидкостью меди и расплавом стали, но и термосиловые поля. Причем межфазные границы включений стали и частиц меди являются резкими без наличия переходных областей. В области формирования частиц из меди и стали происходит образование вторичных фаз, контрастно выделяющихся на фоне меди и аустенитной стали. Включения стали имеют области, которые обогащены Cr и обеднены Ni, как показывают результаты картирования. Подробный анализ микроструктуры показал, что при этом нет образования интерметаллидов ни между Fe и Cu, что согласуется литературными данными [2], ни между легирующими элементами, входящими в состав нержавеющей стали. Наблюдается лишь расслоение, которое происходит во время нанесения проволочного филамента в ванну расплава в жидком состоянии.

Заключение. Биметаллическое изделие Fe-Cu, сформированное методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии, имеет граничную область с резким структурным градиентом. Вблизи данной области наблюдаются различной формы и размера включения стали и меди. При формировании включений выделяется ярко-выраженная граница с основным металлом и, как следствие, отсутствие условий для формирования интерметаллидных соединений. При этом, включения стали имеют неоднородный по площади состав – в некоторых областях происходит обогащение по Cr и обеднение по Ni, что объясняется наличием фазового расслоения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90173.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mai T.A., Spowage A.C. Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminium // Mater. Sci. Eng. A. – 2004. – V. 374. – P. 224–233.
2. Tan C., Zhou K., Ma W., Min L. Interfacial characteristic and mechanical performance of maraging steel-copper functional bimetal produced by selective laser melting based hybrid manufacture // Mater. Des. – 2018. – V. 155. – P. 77–85.
3. Chen S., Huang J., Xia J., Zhao X., Lin S. Influence of processing parameters on the characteristics of stainless steel/copper laser welding // J. Mater. Process. Technol. – 2015. – V. 222. – P. 43–51.
4. Le T.N., Lo Y.L. Effects of sulfur concentration and Marangoni convection on melt-pool formation in transition mode of selective laser melting process // Mater. Des. – 2019. – V. 179. – P. 107866.