

ОБЗОР ПРИГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛОВ МЕДЬ-СТАЛЬ

Чжан Ц.¹, Козлов В.Н.², Пань М.², Клименов В.А.⁴

¹НИ ТПУ, ИШНПТ, аспирант гр. А3-21,

E-mail: cinzhun1@tpu.ru;

²НИ ТПУ, ИШНПТ, доцент ОмШ,

E-mail: kovn@tpu.ru;

³НИ ТПУ, ИШНПТ, аспирант гр. А3-21,

E-mail: menhua1@tpu.ru;

⁴НИ ТПУ, ИШНПТ, профессор Ом,

E-mail: klimenov@tpu.ru;

С развитием современной промышленности одному металлу или сплаву становится трудно соответствовать определенным конкретным случаям из-за ограничений присущих характеристик. Биметаллы привлекают все большее внимание благодаря сохранению преимуществ каждого и преодолению недостатков другого. Одним из них является медно-стальной сплав, который сохраняет превосходную износостойкость, коррозионную стойкость, электро- и теплопроводность меди, и высокую прочность и сравнительно невысокую стоимость стали. Такой сплав широко используется для передачи энергии и в высокотехнологичном производстве [1].

В настоящее время для приготовления биметаллов медь-сталь в основном используются порошковая металлургия, пластическая формовка, сварка [2] и 3D-печать [3].

Порошковая металлургия является стандартным методом приготовления биметаллов медь-сталь. Как правило в качестве плакирующего слоя используется порошок медного сплава, который спекается в восстановительном газе из-за окисления меди. Как один из самых передовых методов, искрово-плазменное спекание (ИПС), являющееся технологией быстрого спекания в мгновенном высокотемпературном поле, становятся все более распространенными благодаря низкой температуре спекания, высокой скорости нагрева и короткому времени спекания [4]. При изготовлении направляющей пластины в качестве ключевого направления при её формовании используется метод порошковой металлургии. Это позволяет уменьшить расход медного сплава при обеспечении износостойкости и повышении механических свойств. Медная часть обычно изготавливается из бронзы, свинцовой бронзы, алюминиевой бронзы и других материалов; стальная составляющая изготавливается из низкоуглеродистой стали [5].

Методы пластической формовки в основном включают прокатку, экструзию и волочение, механизм которых заключается в том, что соединяемые друг к другу медная и стальная пластины подвергаются пластической деформации под огромным давлением. После этого по соединительной поверхности пластины отрываются, в результате чего обнажается активированная поверхность. Высокое качество металлургического соединения достигается за счет высокого давления при прокатке [6]. Из-за механической связи на некоторых участках подготовленного сплава

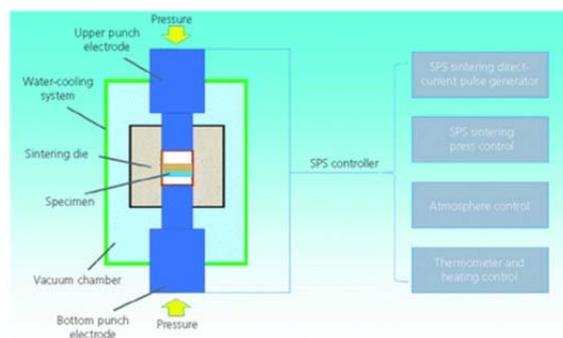


Рис. 1. Принципиальная схема метода SPS

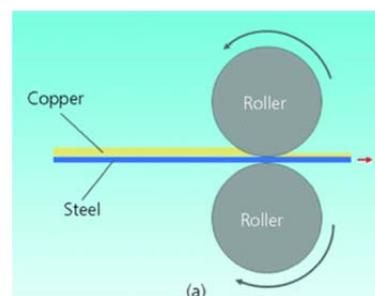


Рис. 2. Принципиальная схема метода пластической формовки прокаткой

медь-сталь после пластической формовки обычно требуется диффузионный отжиг для улучшения состояния связи на поверхности, упрочнения заготовки в процессе восстановления, рекристаллизации и устранения остаточных напряжений [7]. Температура отжига обычно находится в диапазоне 823–873 К, время выдержки около 1,5 ч [8]. Используя процесс волочения, исследователем Guo L. (Го Л.) были успешно изготовлены гильзы из биметалла гетерогенного сплава меди и стали, значительно экономящие сырье при сохранении первоначальных характеристик [9].

Литьё биметаллов гетерогенных сплавов меди и стали в основном включает в себя традиционный метод литья, метод обратного затвердевания, метод непрерывного литья/прокатки, метод литьевого преобразования и метод двойного расплавления металла [10].

Традиционный метод литья и метод обратного затвердевания относятся к твердожидкостному методу, заключающемуся в нанесении расплавленной меди к стальной форме или стальной проволоке без оксидного слоя или с гальванической медью для увеличения атомной активности на поверхности стали [11–12].

При методе непрерывного литья/прокатки выполняется прокатка после заливки расплавленного медного сплава на стальную полосу [13]. Используя метод обратной затвердевания, ученые Ю и Ван [13, 14] успешно подготовили медную проволоку со стальным сердечником, применённую в качестве проводящих проводов в электронных коммуникациях. Их исследования показывают, что толщина плакирующего слоя связана со временем выдержки стальной проволоки, а температура расплавленной медного сплава должна быть обратно пропорциональна толщине плакирующего слоя, при этом толщина плакирующего слоя будет наибольшая при тепловом равновесии на поверхности соединения [14].

Обычно, используя традиционные литые биметаллы меди и стали, изготавливают охлаждаемые планки. Метод литьевого преобразования и метод двойного расплавления металла относятся к методу жидкость-жидкость, обеспечивающий металлургическое соединение при затвердевании. При приготовлении сплавов методом литейного преобразования верхний разливочный ящик заменяют и, соответственно, выплавляют сталь и медь [15]. При использовании метода двойного расплавления металла сила Лоренца препятствует конвективному смешиванию двух расплавленных металлов [16].

Сварка в основном включает в себя сварку плавлением (дуговая сварка, лазерная сварка и электронно-лучевая сварка). К подобным методам можно отнести пайку (пайку плавлением), твердофазную сварку, такую как диффузионная сварка, сварка взрывом, сварка трением и сварка трением с перемешиванием.

Сварка плавлением обеспечивает лучшее соединение меди и стали за счет контроля состава присадочного металла и смещения лазерного и электронного лучей для предотвращения сегрегации стали, размягчения меди и образования проникающих трещин на стальной стороне.

При пайке припой на основе серебра способствует взаимной диффузии меди и железа, в который добавляют никель для улучшения смачиваемости [17]. При пайке плавлением контролируется присадочный металл и одновременно контролируется место подвода тепла.

Твердофазная сварка реализует соединение разнородных металлов путем сильной пластической деформации. Получаемые структура и механические свойства являются результатом конкуренции между наклепом и рекристаллизационным размягчением.

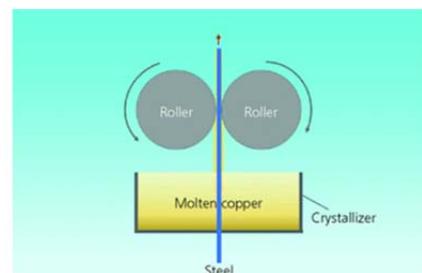


Рис. 3. Принципиальная схема метода обратной затвердевания

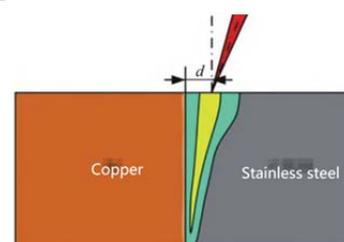


Рис. 4. Принципиальная схема лазерной плавки меди и нержавеющей стали

Целью исследований диффузионной сварки является уменьшение образования интерметаллических соединений на переходной поверхности. Целью исследований сварки взрывом является уменьшение изогнутых крупных зерен на медной стороне.

Аддитивное производство является относительно новым методом приготовления биметаллов медь-сталь. Электронные лучи, дуги и лазеры используются в качестве источников тепла для аддитивного производства биметаллов меди и стали. Соединение на переходной поверхности Cu и Fe, осажденных электронным лучом, не идеальное [18]. Хотя медь имеет высокую отражательную способность для лазера, за счет многократного лазерного сканирования также можно получить хорошую металлургическую связь и измельченные зерна [19]. Используя ввод более высокой энергии дуги, можно получить на переходной поверхности металлургическую связь с высокой прочностью, однако, соответственно, граница раздела будет сегрегирована и медные зерна станут большими. Частоту появления трещин можно снизить добавлением Ni, Al и Cr [20]; добавлением армирующих фаз, таких как наночастицы, можно подавить укрупнение зерен [21].

Биметаллы медь-сталь заменили многие материалы в различных областях благодаря отличным свойствам и относительно невысокой стоимостью. Применение аддитивного производства открывает новые возможности для оптимизации биметаллов медь-сталь. Однако при приготовлении биметаллов медь-сталь по-прежнему возникают такие проблемы, как низкая прочность металлургической связи и большие внутренние напряжения на переходной поверхности, сегрегация компонентов и множество проникающих трещин на стальной стороне.

В настоящее время необходимо глубокое исследование механизма соединения на переходной поверхности медь-сталь и оптимизировать процесс формования, тем самым улучшая условия соединения на переходной поверхности и реализуя более широкое применение биметаллов медь-сталь.

В работе применялось оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

Список литературы

1. Yiran Wang, Yimin Gao, et al. Review of preparation and application of copper-steel bimetal composites. *Emerging Materials Research*. 8 (4) (2019) 538–551.
2. Du Zhengyong, Li Yuxuan, Liu Yuchun, et al. Research status of copper/steel dissimilar metal welding [J]. *Welding & Joining* 2023(9):1–23.
3. Yang Yongqiang, Jiang Menglong, Deng Cheng. Research progress of copper–steel functional materials prepared by additive manufacturing [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(4):14–24.
4. Masahashi N, Semboshi S, Watanabe K et al. (2013) Solid-state bonding of alloy-designed Cu–Zn brass and steel associated with phase transformation by spark plasma sintering. *Journal of Materials Science* 48(17):5801–5809.
5. Zhang P, Qin J, Li X, Zhang Y and Chang Q (2012) Bonding mechanism of the high strength copper/steel bimetal interface of composite guide plate. *Special Cast and Non-ferrous Alloys* 8:768–770.
6. Lin D, Shi Q, Yu Q and Guo C (1998) Bi Metal cladding rolling process and their development. *Yunnan Metallurgy* 27.6):32–36.
7. Liu D, Liu S, Chen R and Wang X (2007) Microstructure and mechanical properties of diffusion bonding brass steel bimetal. *Transactions of Materials and Heat Treatment* 28 (1): 110–113.

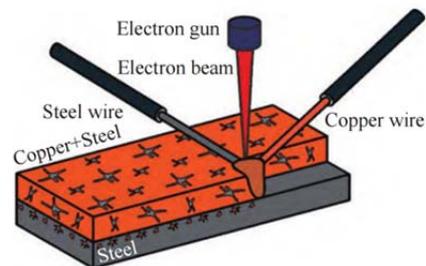


Рис. 5. Принципиальная схема аддитивного производства электронно-лучевой проволоки для функциональных материалов из меди и стали

8. Liu H, Wang J, Liu K and Zhang H (2007) Compounding techniques of cold-rolled composite steels. *Journal of Iron and Steel Research*19(8):42–45.
9. Guo L (2009) Study on forming technology of cartridge case made of bimetal Cu/Fe. *Journal of Plasticity Engineering* 16(6):45–49.
10. Wu J and Ma X (1996) Research and development of fabrication metal matrix composite by casting process. *Materials Science and Engineering*2:15–20.
11. Liu X and Shen S (2003) A study on connection mechanism of highspeed steel–carbon cast steel cast-in process. *Foundry Technology* 24(1): 67–68.
12. Pleschiutchnigg FP (1995) Inversion casting of steel strip. *Steel Time* 223(6): 228–229.
13. Wang H (2008) Bimetal composite of copper and steel continuous casting and rolling technology and equipment. *Research Studies on Foundry Equipment* 3:1–4.
14. Yu J, Wang Q, Xiao Y et al. (1999) Experimental study of inversion casting of copper clad steel. *Chinese Journal of Nonferrous Metals* 9(3):464–476.
15. He B, Wu X and Yang J (2005) Investigation of the preparation and properties of the bimetal composite by the electrocasting. *China Foundry Machinery & Technology*6:10–12.
16. Guan P, Ma Q, Hu Z and Du Y (2006) Research and application of metal casting process used for abrasion resistance parts. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery* 37(7): 174–177.
17. Kumar A, Ganesh P, Kaul R, et al. Study on requirement of nickel electroplating in OFE copper-316L stainless steel brazed joints [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 8 (9) : 639–2651.
18. Zykova A, Chumaevsky A, Vorontsov A, et al. Evolution of microstructure and properties of Fe–Cu, manufactured by electron beam additive manufacturing with subsequent friction stir processing [J]. *Materials Letters*, 2022, 307: 131023.
19. Zafari A, Xia K. Nano/Ultrafine grained immiscible Fe–Cu alloy with ultrahigh strength produced by selective laser melting [J]. *Materials Research Letters*, 2021, 9(6): 247–254.
20. Zhang M, Zhang Y L, DU M K, et al. Experimental characterization and microstructural evaluation of silicon bronze alloy steel bimetallic structures by additive manufacturing [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2021, 52(10): 4664–4674.
21. Xie M, Zhou S F, Zhao S Z, et al. In-situ Fe₂P reinforced bulk Cu–Fe immiscible alloy with nanotwins Cu produced by selective laser melting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 838: 155592.