

УДК 669.017.15

## МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕЭКВИАТОМНЫХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ CONIFEMNCR

Владислав Константинович Дробышев<sup>(1)</sup>, Ирина Алексеевна Панченко<sup>(2)</sup>

*аспирант 3 года<sup>(1)</sup>, кандидат технических наук<sup>(2)</sup>,  
кафедра «Обработка металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК»  
Сибирский государственный индустриальный университет*

*Научный руководитель: С.В. Коновалов,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Обработка металлов давлением и  
материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК»*

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) на основе системы CoNiFeMnCr привлекают внимание исследователей благодаря сочетанию прочности, пластичности и износостойкости, что делает их перспективными для применения в деталях оборудования обработки давлением - штампах и направляющих узлах трения. Управление составом в эквипотомных и неэквипотомных системах позволяет целенаправленно регулировать механические характеристики через механизмы твёрдорастворного упрочнения [1]. Деформационная обработка, включая прокатку и интенсивную пластическую деформацию, в сочетании с оптимизацией элементного состава открывает возможности для создания ВЭС с программируемыми трибологическими свойствами, необходимыми при эксплуатации в условиях высоких контактных нагрузок [2]. Применение таких материалов в технологиях обработки давлением позволит повысить долговечность дорогостоящего оборудования и снизить затраты на его замену и ремонт.

Пять составов системы CoNiFeMnCr с фиксированным содержанием Ni (20 ат. %) и варьированием Co (15 – 25 ат. %), Cr (15 – 25 ат. %), Fe (10 – 30 ат. %) и Mn (10 – 30 ат. %) были получены вакуумной индукционной плавкой в печи ВИП-010. Исходные материалы – высокочистые металлы: Co (марка K1Au), Cr (марка ЭХМд-УЛЬТРА), Fe (марка ARMC0 TYPE-1), Ni (марка ДНК-0) и Mn (Mn998). Образцы после плавки подвергались исследованиям.

Комплексное исследование механических и трибологических характеристик пяти составов показало определяющее влияние элементного состава на все исследуемые параметры. Максимальная нанотвёрдость 2,06 ГПа и модуль Юнга 109 ГПа зафиксированы для эквипотомного состава Co<sub>20</sub>Cr<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Ni<sub>20</sub>, что обусловлено синергетическим действием твёрдорастворного упрочнения и высокой плотности дислокаций в ГЦК-матрице. Наибольшая микротвёрдость 146 HV достигнута в сплаве Co<sub>20</sub>Cr<sub>20</sub>Fe<sub>10</sub>Mn<sub>30</sub>Ni<sub>20</sub> вследствие барьерного упрочнения вторичными фазами MnNi, локализованными по границам зёрен и в междендритных областях. Вместе с тем для данного состава характерен минимальный модуль упругости 60 ГПа – следствие формирования хрупких интерметаллидов при содержании Mn свыше 25 ат. %, что ограничивает его применение в условиях динамических нагрузок.

Наилучшая износостойкость достигнута для состава Co<sub>25</sub>Cr<sub>25</sub>Fe<sub>15</sub>Mn<sub>15</sub>Ni<sub>20</sub>: скорость изнашивания составила  $5,8 \times 10^{-5}$  мм<sup>3</sup>/Н·м при коэффициенте трения 0,663 – минимальных значениях среди всех исследованных сплавов. Снижение глубины канавки износа на 38 % и площади поперечного сечения на 15 % по сравнению с эквипотомным составом свидетельствует о повышенном сопротивлении пластической деформации, обусловленном оптимальным соотношением Cr/Co (1:1) и формированием защитных оксидных слоёв Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MnO<sub>2</sub>. Установлена прямая

корреляция между коэффициентом трения и скоростью изнашивания, что указывает на преобладание адгезионно-абразивных механизмов разрушения. Наибольший износ зафиксирован для  $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{30}\text{Mn}_{10}\text{Ni}_{20}$  ( $8,7 \times 10^{-5}$  мм<sup>3</sup>/Н·м), где дефицит марганца нарушает структурную однородность и активизирует интенсивное изнашивание.

Установлено, что состав  $\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{15}\text{Mn}_{15}\text{Ni}_{20}$  обладает наилучшим комплексом трибологических характеристик с минимальной скоростью изнашивания  $5,8 \times 10^{-5}$  мм<sup>3</sup>/Н·м и коэффициентом трения 0,663 и рекомендован для применения в износостойких узлах оборудования обработки давлением, включая штампы для горячей объёмной штамповки и направляющие узлы.

### Литература

1. *Shahmir H., Mehranpour M., Shams S., Langdon T. Twenty years of the CoCrFeNiMn high-entropy alloy: Achieving exceptional mechanical properties through microstructure engineering. Journal of Materials Research and Technology, 2023. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.01.181.*
  2. *Cheng Z., Wang S., Wu G., Gao J., Yang X., Wu H. Tribological properties of high-entropy alloys: A review. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, vol. 29, pp. 389–403. DOI: 10.1007/s12613-021-2373-4.*
-