

УДК 620.22

**А. О. Семенюк<sup>\*</sup>, М. В. Климова**Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
г. Белгород<sup>\*</sup> *Semenyuk@bsu.edu.ru*

## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ $\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMnC}_x$ ( $x = 0; 0,5; 1; 2$ ат. %)

Сплавы  $\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMnC}_x$  были подвергнуты прокатке до степени деформации 80 % с последующим отжигом в интервале температур 600–1000 °С в течение 1 часа. Легирование сплава углеродом приводит к выделению карбидов типа  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ , что обеспечивает значительное упрочнение сплава после деформационно-термической обработки.

*Ключевые слова:* высокоэнтропийные сплавы, микроструктура, электронная микроскопия, деформационно-термическая обработка, механические свойства

**A. O. Semenyuk, M. V. Klimova**

## INFLUENCE OF THERMOMECHANICAL TREATMENT ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF $\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMnC}_x$ ( $x = 0; 0,5; 1; 2$ ) HIGH ENTROPY ALLOYS

$\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMnC}_x$  alloys were rolled to a degree of deformation of 80 %, followed by annealing in the temperature range of 600–1000 °C for 1 hour. Alloying the alloy with carbon leads to the precipitation of carbides of the  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  type, which provides significant hardening of the alloy after the application of heat treatment.

*Key words:* high entropy alloys, microstructure, electron microscopy, thermo-mechanical processing, mechanical properties

**В**ысокоэнтропийные сплавы (ВЭСы) с гранцентрированной кубической (ГЦК) структурой в настоящее время рассматриваются как перспективные конструкционные материалы. Эквиатомный ВЭС

CoCrFeMnNi демонстрирует высокую пластичность, ударную вязкость и вязкость разрушения при комнатной и криогенных температурах, однако обладает низкими прочностными характеристиками [1; 2]. Было установлено, что легирование углеродом является одним из наиболее эффективных способов повышения прочности сплава CoCrFeMnNi [3]. Однако равновесная растворимость углерода в ГЦК твердом растворе мала из-за наличия сильного карбидообразующего элемента — Cr. Результаты моделирования равновесных фазовых диаграмм показали, что уменьшение содержания хрома может повысить содержание углерода в твердом растворе и улучшить механические свойства.

Сплавы  $\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMnC}_x$  ( $x = 0; 0,5; 1; 2$ ) были получены методом вакуумной индукционной плавки. Подвергнуты деформации прокаткой до 80 % с последующим отжигом в интервале температур 600–1000 °С в течение 1 часа. Исследование структуры и фазового состава осуществлялось с помощью сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Для определения механических свойств были проведены испытания на растяжение и измерения микротвердости.

Таблица

Химический состав сплавов в ат. %

Сплав	Элементы					
	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	C
$\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMn}$	23,29	6,22	23,90	23,09	23,46	0,03
$\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMnC}_{0,5}$	23,17	6,42	23,97	23,67	22,24	0,53
$\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMnC}_1$	23,14	6,31	23,13	23,14	23,34	0,95
$\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMnC}_2$	23,42	6,23	22,41	22,02	23,82	2,11

В литом состоянии сплавы  $\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMnC}_x$  имели крупнозернистую структуру с матричной ГЦК фазой; при  $x = 2$  ат. %C наблюдается выделение небольшого количества карбидов  $\text{Me}_7\text{C}_3$ , преимущественно по границам зерен. Предел текучести сплава в исходном состоянии возрастал с 185 до 320 МПа при изменении концентрации углерода от 0 до 2 %, пластичность при этом составляет 52 и 48 % соответственно.

На начальных этапах прокатки основным механизмом деформации сплавов  $\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMnC}_x$  является планарное скольжение дислока-

ций. Увеличение степени деформации приводит к формированию субструктуры и активации механического двойникования. При достижении степени деформации 80 % наблюдается сильнодеформированная двойникованная структура с большой плотностью дислокаций.

Для всех сплавов характерно повышение предела текучести как при увеличении степени деформации, так и при повышении концентрации углерода. Деформация обеспечивает существенное упрочнение сплавов: например, после прокатки на 80 % предел текучести повышается от 983 до 1485 МПа в сплавах с  $x = 0$  и  $x = 2$  ат. % соответственно. При этом пластичность сплавов после 80 % деформации уменьшается с 14 до 5 % по мере повышения концентрации углерода.

Показано, что постдеформационные отжиги сплавов в интервале температур 600–1000 °С приводят к развитию рекристаллизации ГЦК матрицы и выделению частиц второй фазы в легированных состояниях. Отжиг сплава  $\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMn}$ , не содержащего углерода, при температуре 600 °С обеспечивает формирование частично рекристаллизованной структуры. Увеличение содержания углерода в сплавах с  $x = 0,5$  и  $x = 2$  ат. % ведет к повышению температуры начала рекристаллизации до 700 °С. Кроме того, установлено, что легирование углеродом приводит к выделению карбидов типа  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ , обогащенных хромом, после отжига в интервале температур 700–1000 °С. Объемная доля частиц карбидов возрастает с увеличением количества углерода и уменьшается с повышением температуры отжига. Например, изменение концентрации углерода от 0,5 до 2 ат. % ведет к увеличению объемной доли карбидов с 4 % до 12 % при 800 °С, при этом размер самих карбидов растет от 80 до 114 нм. Присутствие частиц второй фазы в значительной мере влияет на изменение размеров зерен, являясь сдерживающим фактором для их роста. Так, в сплаве с 2 ат. % С наблюдалось незначительное увеличение среднего размера рекристаллизованных зерен с 1,2 мкм до 2 мкм при повышении температуры отжига с 800 до 1000 °С. Для сравнения, в однофазном сплаве без углерода ( $x = 0$ ) размер зерен после отжига при температуре 1000 °С составил 26 мкм.

Повышение температуры отжига ведет к разупрочнению и увеличению пластичности сплавов по сравнению с деформированным состоянием. При изменении температуры отжига от 600 до 1000 °С в сплаве  $\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMn}$  предел прочности снижается с 1135 до 212 МПа, при этом пластичность изменяется от 15 до 55 %. Легирование сплава

№ 2 ат. % углерода обеспечивает хорошее сочетание прочности и пластичности. Сплав  $\text{CoCr}_{0,25}\text{FeNiMnC}_2$  после прокатки и отжига при температуре 800 °С демонстрирует пределы прочности и текучести 933 и 643 МПа соответственно при пластичности 38 %.

### **Литература**

1. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications / B. Gludovatz [et al.] // *Science* (80). 2014. 345. P. 1153–1158.
2. Effect of cryo-deformation on structure and properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy / N. D. Stepanov [et al.] // *Intermetallics* 59. 2015. P. 8–17.
3. Effect of carbon content and annealing on structure and hardness of the Co-CrFeNiMn-based high entropy alloys / N. D. Stepanov [et. al.] // *J. Alloys Compd.* 2016. 687. P. 59–71.