

ЛЮ ЮАНЬСЮНЬ, аспирант гр. А2-48
ДМИТРИЕНКО А.Н., магистрант гр. 4АМ31, II курс
ХУАН ЦЗИНЖУЙ, аспирант гр. А2-08
Научный руководитель: КОВАЛЕВСКАЯ Ж.Г., д.т.н., профессор
Томский политехнический университет
г. Томск

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОШКА СПЛАВА AlCoCrFeNi ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Высокоэнтропийный сплав AlCoCrFeNi – одна из наиболее интенсивно изучаемых систем сплавов, обладающая однородной микроструктурой в литом состоянии, а также отличной высокотемпературной износостойкостью и хорошими механическими свойствами [1-3]. Хотя высокоэнтропийные сплавы, полученные методом литья, обладают хорошими механическими свойствами, они все еще ограничены для некоторых специальных применений. Поэтому для получения высокоэнтропийных сплавов используются такие методы, как дуговая плавка, порошковая металлургия, механическое легирование и т.д. По сравнению с традиционной технологией литья с ликвацией компонентов сплава порошковая металлургия может дать материал с однородным составом и малым размером зерна, а также с лучшей прочностью и вязкостью. Но вариант того, как подготовить материал для спекания, все еще остается актуальной проблемой, требующей решения. Механическое легирование в шаровой мельнице как твердофазный неравновесный высокоэнергетический процесс может достичь тонкого смешивания и легирования между порошками с большой разницей в температурах плавления, что может улучшить активность спекания порошков и снизить температуру последующего спекания [4].

В данном эксперименте получен порошок высокоэнтропийного сплава AlCoCrFeNi методом механического легирования в шаровой мельнице. Исследовано влияние времени механического легирования на микроструктуру порошка и его фазовый состав.

В качестве исходных материалов использовали металлические порошки Co, Cr, Fe, Ni, Al чистотой более 99,5 мас.% и размером частиц от 20 до 60 мкм. Элементарные порошки смешивались в эквимолярном составе, указанном в таблице 1.

Таблица 1. Состав и кристаллическое строение компонентов

Элемент	Al	Co	Cr	Fe	Ni
Масс. %	10.7	23.3	20.6	22.2	23.2
Тип решетки	ГЦК	ОЦК	ОЦК	ОЦК	ГЦК

Механическое легирование проводилось в планетарной шаровой мельнице Активатор-2S в течение 1 часа при 240 об/мин в атмосфере воздуха. В

качестве мелющей среды использовались шарики из высококачественной нержавеющей стали с массовым соотношением шариков к порошку 3:1. Чтобы избежать холодной сварки, а также предотвратить окисление сплава, использовался агент, контролирующий обработку, – раствор стеариновой кислоты в этиловом спирте. Время механического легирования составило 15, 30 и 60 минут (рис. 1).

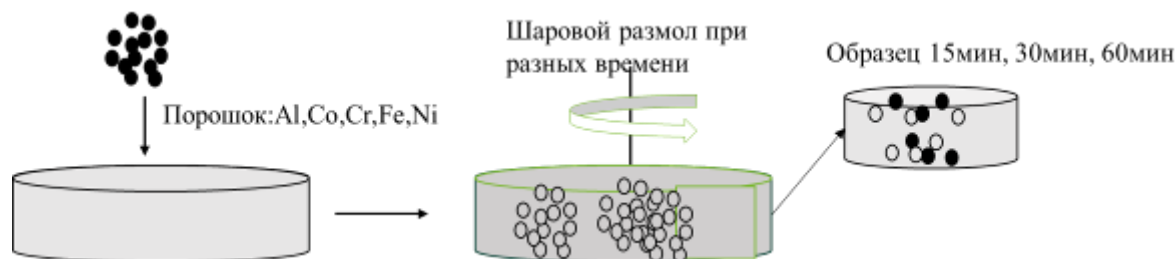


Рисунок 1. Процесс приготовления порошков AlCoCrFeNi

Рентгеноструктурный анализ порошков проводился на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE с углом сканирования $10^{\circ} \sim 110^{\circ}$ и скоростью сканирования $0,1^{\circ}/с$.

Далее были сделаны шлифы из залитого в эпоксидную смолу порошка. Для полировки поверхности использовались различные виды наждачной и полировочной бумаги. Морфология порошков анализировалась с помощью оптического микроскопа CarlZeiss AxioObserver на поверхности нетравленных шлифов.

На рисунке 2 показана морфология порошка в исходном состоянии.

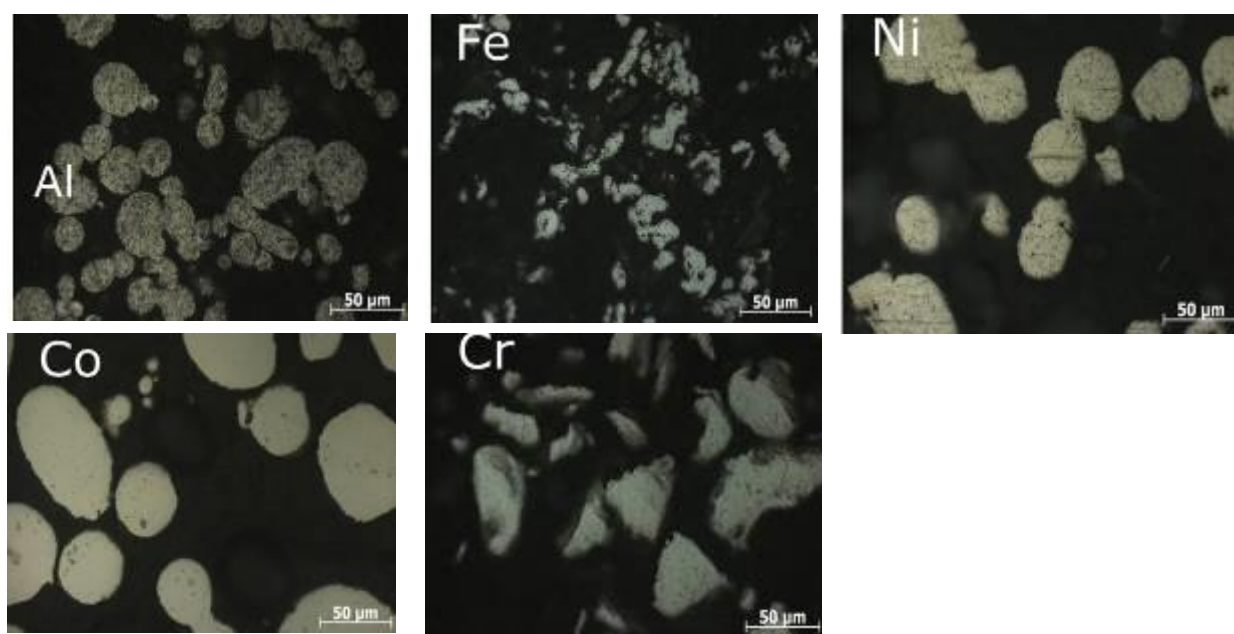


Рисунок 2. Микроструктура исходных порошков

Все порошки имеют близкий размер и строение. Порошок Ni, Al и Co округлой формы с размером частиц 20-40 мкм (Al) и 50-60 мкм (Ni, Co); порошок Fe и Cr имеет неправильную геометрическую форму с размером 10-30 мкм (Fe) и 50-60 мкм (Cr).

На рисунке 3 показана морфология порошка после механического легирования в шаровой мельнице.

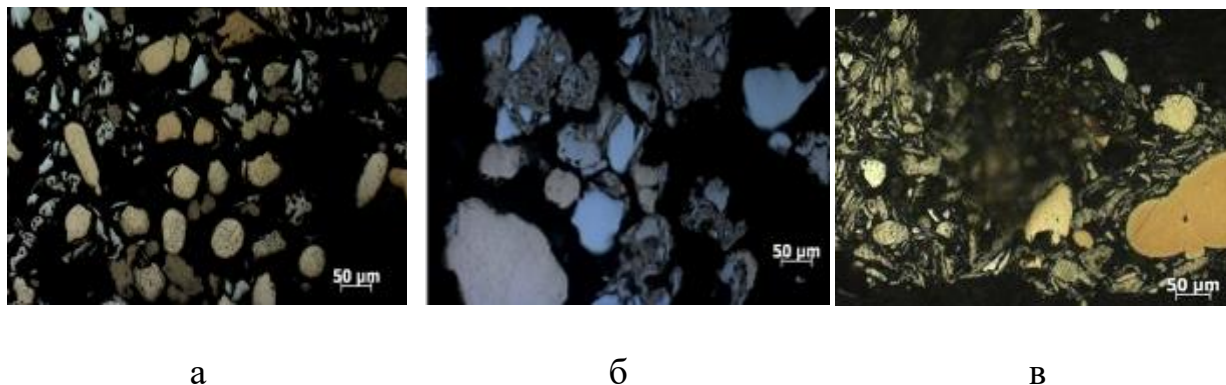


Рисунок 3. Микроструктура порошка после механического легирования в течении 15 (а), 30 (б) и 60 (в) минут.

Как видно на рисунке 3, в процессе механического легирования происходит дробление, пластическая деформация и коагуляция частиц исходных порошков. Все частицы после воздействия шаров либо формируют агломераты из интенсивно деформированного материала исходных порошков, либо формируют коагуляты из частиц одного компонента. Такой характер взаимодействия компонентов характерен для механического легирования в шаровых мельницах [4].

После 15 минут перемешивания большая часть материала сохраняет строение исходного порошка. Часть материала дробится и перемешивается без значительной пластической деформации (рис. 3 а).

После 30 минут перемешивания наблюдается общее увеличение размера полученного порошка. Часть частиц представляет собой коагуляты одного компонента с размером до 200 мкм. Другая часть частиц представлена агломератами с интенсивным перемешиванием самых пластичных компонентов. Доля подобных частиц составляет около 50% материала (рис. 3 б).

После 60 минут перемешивания доля агломератов возрастает. Они формируют массу частиц разного размера от десятков до сотен микрометров. Кроме агломератов, в порошке присутствуют коагуляты и частично деформированные частицы одного компонента (рис. 3 в).

На рисунке 4 представлены рентгеновские дифрактограммы порошков при различном времени перемешивания и увеличенная часть максимума интенсивности одного пика. Постепенное исчезновение пиков Al с увеличением времени шарового размола при малом угле указывает на то, что Al первым легируется в процессе механического легирования. Интенсивность других пиков уменьшается, ширина пиков становится больше и кристалличность порошка

сплава снижается. Из рисунка 4 б видно, что при увеличении времени шарового размола основные дифракционные пики немного смещаются вправо, что свидетельствует о диффузии элементов в твердый раствор.

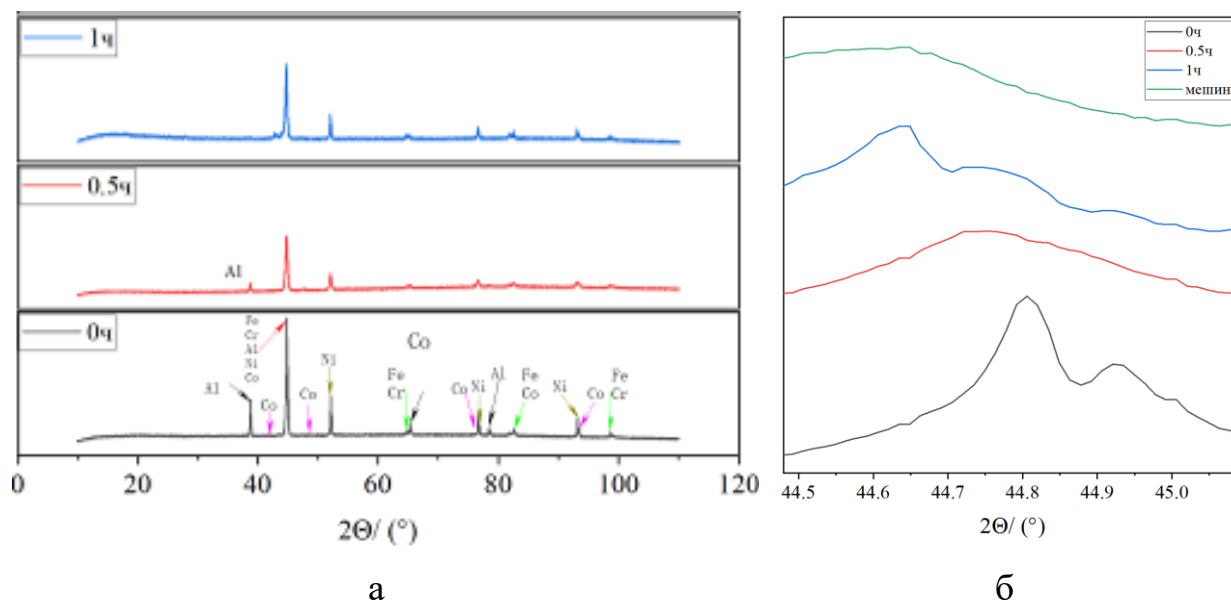


Рисунок 4. Рентгеновские дифрактограммы порошков AlCoCrFeNi на разных этапах механического легирования

Таким образом, было определено, что механически легированный порошок системы AlCoCrFeNi может быть успешно приготовлен методом перемешивания в шаровой мельнице. При непрерывном воздействии мелющих шаров порошок пластически деформируется, образуя коагуляты и агломераты из материала исходных компонентов. С увеличением времени перемешивания от 15 до 60 минут степень перемешивания материала увеличивается; также увеличивается и размер получаемых частиц.

Список литературы:

1. Батаева З.Б., Руктуев А.А., Иванов И.В., Юргин А.Б., Батаев И.А. Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2021. Т. 23, № 2. С. 116-146.
2. Jien-Wei Y. E. H. Recent progress in high entropy alloys // Ann. Chim. Sci. Mat. 2006. Т. 31. №. 6. С. 633-648.
3. Wang Y. P. et al. Microstructure and compressive properties of AlCrFeCoNi high entropy alloy // Materials Science and Engineering: A. 2008. Т. 491. №. 1-2. С. 154-158.
4. Кузьмич Ю.В. Механическое легирование / Ю. В. Кузьмич, И.Т. Колесникова, В.И. Серба, Б.М. Фрейдин. – М: Наука, 2005. – 213 с.