



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Влияние термической обработки на строение и свойства высокоэнтروпийного сплава $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$

Жанна Ковалевская^{a, *}, Юаньсюнь Лю^b

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0003-3040-8851>,  kovalevskaya@tpu.ru; ^b  <https://orcid.org/0009-0002-8501-2643>,  yuansyun1@tpu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 620.173.22

История статьи:

Поступила: 10 апреля 2025

Рецензирование: 24 апреля 2025

Принята к печати: 13 июня 2025

Доступно онлайн: 15 сентября 2025

Ключевые слова:

Высокоэнтропийный сплав

$\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$

Термическая обработка

Микроструктура

Микротвердость

Испытания на сжатие

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время одним из наиболее изучаемых высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) является система CoCrFeNi с добавлением пятого компонента. Примером такого сплава служит AlCoCrFeNi , легированный дополнительными элементами. Легирование Nb способствует образованию в сплаве твердого раствора и вторичной фазы Лавеса, а также приводит к образованию эвтектики между этими фазами. Оптимальное сочетание механических свойств, достигаемое в сплаве доэвтектического состава $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$, стало основанием выбора данного сплава для последующих исследований в условиях термообработки. **Цель работы:** исследование влияния термической обработки, включающей нагрев до температур 900, 1000 и 1100 °С с последующим охлаждением на воздухе, на структуру и свойства ВЭС $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$. **Методы исследования:** оптическая металлография, рентгеноструктурный анализ, измерение микротвердости и испытания на сжатие. **Результаты и обсуждение.** Сплав $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$ сохраняет структуру твердого раствора на основе ОЦК-фазы не только в литом состоянии, но и после термообработки. Независимо от режимов термообработки в сплаве сохраняется доэвтектическая структура, состоящая из дендритов твердого раствора и эвтектики с фазой Лавеса в междендритном пространстве. Термообработка приводит к изменению фазового состава сплава и совершенствованию структурных составляющих. При нагреве до 900 °С наряду с существующими твердым раствором и фазой Лавеса в структуре выделяется σ -фаза, повышающая микротвердость сплава, однако не обеспечивающая улучшения прочностных свойств в связи со своими низкими пластическими характеристиками. Прочностные характеристики сплава существенно улучшаются при термообработке с нагревом до 1000 и 1100 °С. Нагрев до 1100 °С сопровождается увеличением остаточной деформации. Основными причинами подобного эффекта могут быть превращения, происходящие как в твердом растворе ОЦК-фазы (растворение V_2 -фазы, перестройка субструктуры, увеличение параметра решетки), так и в эвтектике (увеличение доли фазы Лавеса, совершенствование эвтектических ячеек).

Для цитирования: Ковалевская Ж.Г., Лю Ю. Влияние термической обработки на строение и свойства высокоэнтропийного сплава $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 137–150. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-137-150.

Введение

Уже более двадцати лет мировое сообщество материаловедов создает и исследует новую группу металлических сплавов, названных высокоэнтропийными сплавами (ВЭС) [1–4]. По сравнению с обычными металлическими сплавами на основе одного основного компонента ВЭС содержат несколько основных компонентов в эквимолярной или близкой к ней концентрациях [3]. Благодаря высокой энтропии

смешивания ВЭС обычно представляют собой неупорядоченные твердые растворы. Подобный фазовый состав выигрывает тем, что имеет более высокую способность к упрочнению и хорошие показатели пластичности, и это делает ВЭС перспективными для использования в качестве конструкционных материалов [4–6]. Одной из наиболее изученных является система CoCrFeNi с добавлением пятого элемента, такого как Cu, Mo, Mn, Al [7–11]. Например, сплав AlCoCrFeNi был широко изучен и показал превосходную синергию между составляющими элементами и возможность контролировать фазовый состав и структуру, например, термической обработкой. В результате получаемый сплав обладает удачным сочетанием прочностных и пластических свойств [12–19].

*Адрес для переписки

Ковалевская Жанна Геннадьевна, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
пр. Ленина, 30,
634050, г. Томск, Россия
Тел.: +7 3822 706-351, e-mail: kovalevskaya@tpu.ru

В поисках лучших составов ВЭС, подходящих для производства деталей машин, современные исследователи продвигаются в двух основных направлениях: либо снижают или увеличивают содержание одного из компонентов в уже существующих ВЭС [6, 19–21], либо вводят дополнительные компоненты в качестве легирующих элементов, такие как Ti, Zr, Si, V, C, Nb и др. [22–27].

В ряде работ показаны результаты влияния легирования Nb на строение и свойства ВЭС AlCoCrFeNi и близких систем [28–31]. Известно, что Nb и компоненты ВЭС имеют отрицательные энтальпии смешения. Кроме того, Nb имеет самый большой атомный размер в системе. Вышеперечисленные характеристики Nb способствуют образованию, с одной стороны, общего твердого раствора с дополнительно усиленными межатомными связями, с другой – вторичных фаз, необходимых для упрочнения сплава. Так, в работе [28] показано, что легирование Nb высокоэнтропийного сплава AlCoCrFeNi приводит к образованию эвтектики, в состав которой входит упорядоченная фаза Лавеса (CoCr)Nb. Это вызывает изменение микроструктуры и свойств сплава. Предел текучести при сжатии и твердость увеличиваются, а пластичность уменьшается. Оптимальный комплекс механических свойств формируется в сплаве доэвтектического состава AlCoCrFeNiNb_{0.25}. Именно этот сплав был выбран авторами работы для дальнейшего исследования.

Как упоминалось выше, для упрочнения ВЭС используют различные способы термообработки – от отжига до закалки [20, 32–37]. В некоторых случаях термообработка способствует увеличению у ВЭС характеристик прочности и пластичности одновременно [5]. Столь уникальный эффект, нехарактерный для обычных сплавов, требует пристального исследования и анализа.

Целью работы стало исследование влияния на строение и свойства ВЭС с составом AlCoCrFeNiNb_{0.25} термической обработки, заключающейся в нагреве до температуры 900, 1000 и 1100 °С и охлаждении на воздухе.

Методика исследований

Сплав AlCoCrFeNiNb_{0.25} с эквиатомным составом был получен методом дуговой плавки в печи с медным тиглем и водяным охлаждением в атмосфере аргона. Сплав с химическим составом, приведенным в табл. 1, был получен из компонентов с чистотой более 99,5 масс. %. Для обеспечения однородности химического состава слиток переплавляли не менее пяти раз. Размер полученного слитка – 70×35×12 мм. Перед термообработкой образцы разрезали на фрагменты размером 35×12×6 мм. После завершения термообработки средняя часть фрагментов была разрезана на параллелепипеды 10×4×4 мм. После разрезания образцы были отшлифованы и использовались для проведения испытаний на сжатие. Оставшаяся часть образцов предназначалась для рентгеноструктурного анализа, оценки микроструктуры и измерения микротвердости.

Образцы из сплава AlCoCrFeNiNb_{0.25} были термически обработаны, для чего производился нагрев до температуры 900, 1000 и 1100 °С с выдержкой в течение 1 ч и последующим охлаждением на воздухе. Для упрощения термообработанные образцы были названы T900, T1000, T1100, а образец в исходном литом состоянии – T30.

Из образцов были получены шлифы, микроструктуру которых анализировали с помощью оптического микроскопа Axio Observer 1m и сканирующего электронного микроскопа Quanta 200, оснащенного энергодисперсионным спектроскопическим блоком EDAX. Фазовый

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава AlCoCrFeNiNb_{0.25} (ат. % и масс. %)

Chemical composition of AlCoCrFeNiNb_{0.25} (at. % and wt. %)

Элемент / Element	Al	Co	Cr	Ni	Fe	Nb
Ат. %	19,1	19,1	19,1	19,1	19,1	4,5
Масс. %	9,8	21,5	18,9	21,4	20,4	8,0

состав определяли на дифрактометре XRD-6000 в излучении Cu-K α . Углы сканирования составляли 20...80° с шагом 0,02°. Измерение микротвердости проводили на приборе ПТМ-3 с нагрузкой 100 г. Испытание на сжатие выполнялось с помощью универсального разрывного тестера MTS SANS CMT5105 при скорости сжатия $5 \cdot 10^{-3}$ мм/с. Измерялось не менее трех образцов, полученных в одном режиме.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1, а показаны результаты рентгеноструктурного анализа сплава AlCoCrFeNiNb_{0.25} в литом состоянии и после термической обработки. В литом состоянии сплав состоит из основной фазы с ОЦК-решеткой, представляющей собой неупорядоченный твердый раствор всех присутствующих в системе компонентов. Неупорядоченность твердого раствора основной фазы обусловлена перераспределением компонентов сплава с разным атомным радиусом внутри ОЦК-решетки и ее сегрегации на две с различающимися параметрами. Этот эффект неупорядоченности твердого раствора проявляется на рентгенограмме как разделение основного ОЦК-пика на два (рис. 1, б). Кроме того, на рентгенограмме присутствуют пики отражения от кристаллической решетки фазы Лавеса, богатой Nb, которую можно идентифицировать как (CoCr)Nb с гексагональной кристаллической структурой, и пик отражения [001] фазы B₂, представляющей AlNi с ОЦК-кристаллической решеткой [29, 32].

Присутствие фазы Лавеса характерно для сплавов AlCoCrFeNiNb, где содержание Nb соответствует мольному отношению 0,25 и выше. В этом случае Nb не только растворяется в основной ОЦК-фазе, но и способствует образованию второй фазы – фазы Лавеса, формирующей с фазой ОЦК эвтектическую смесь [29].

Согласно результатам исследователей [32], при охлаждении сплава системы AlCoCrFeNiNb основная кристаллизовавшаяся фаза ОЦК может некогерентно разделяться на смесь неупорядоченной фазы ОЦК, обогащенной Cr-Fe, и упорядоченной фазы B₂, обогащенной Al-Ni, что подтверждается наличием на рентгенограмме пика фазы B₂.

При последующей термообработке сплава на рентгенограммах происходят следующие из-

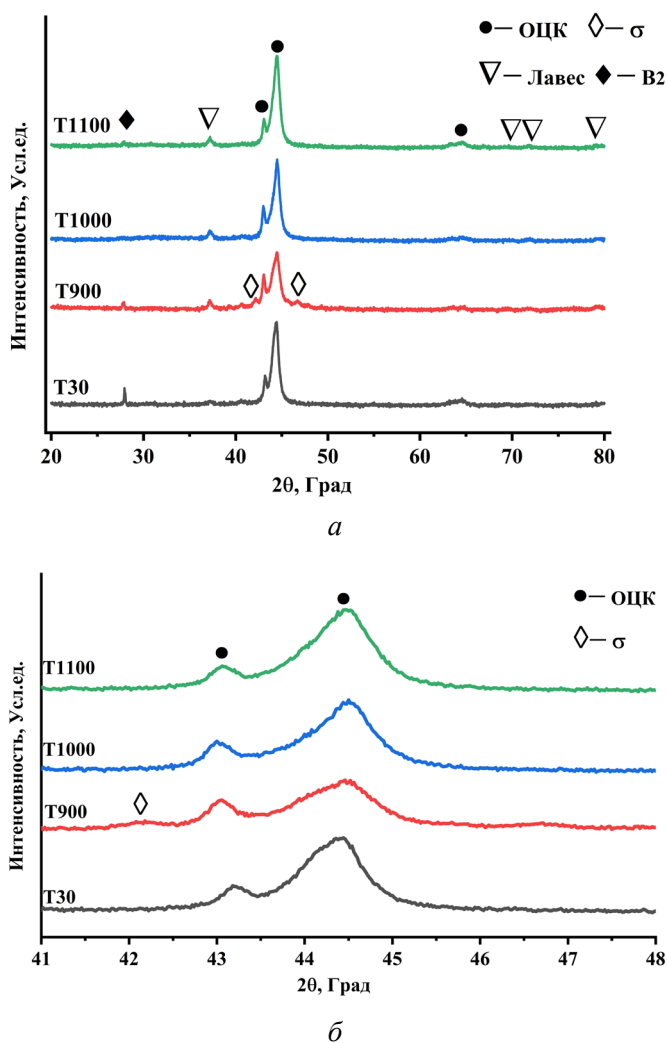


Рис. 1. Рентгенограмма сплава AlCoCrFeNiNb_{0.25} в литом состоянии и после термической обработки (а) с увеличенным изображением в углах 41–48° (б)

Fig. 1. XRD patterns of AlCoCrFeNiNb_{0.25} alloy in the as-cast state and after heat treatment (a) with enlarged image in the 2θ range of 41–48° (b)

менения. С увеличением температуры нагрева интенсивность пика фазы B₂ снижается. Интенсивность пика, соответствующего фазе Лавеса, несколько возрастает. Кроме того, происходят изменения в решетке основной фазы ОЦК. На рис. 1, б представлен увеличенный вид пика (110) фазы ОЦК. Видно, что с увеличением температуры термообработки пик смещается в сторону меньших углов, что указывает на увеличение параметра решетки ОЦК-твердого раствора, а значит, на изменения состава твердого раствора.

После термообработки при 900 °C появляются пики новой фазы. Она идентифицируется как σ-фаза с тетрагональной решеткой, состоящей

из Cr и Fe. При высоких температурах термообработки σ -фаза отсутствует. Данная особенность выделения и растворения σ -фазы в фазе ОЦК в близком температурном интервале наблюдалась и в работе [29].

Результаты PCA сплава $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$ во всем интервале температур термообработки показали, что основной фазой остается неупорядоченный ОЦК-твердый раствор, в то время как в сплаве AlCoCrFeNi нагрев способствует переходу части материала в твердый раствор с ГЦК-решеткой [29]. Следовательно, легирование Nb приводит к стабилизации фазы ОЦК и сохранению преимущественно однофазного строения высокоэнтропийного сплава.

На рис. 2 показана микроструктура сплава $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$ в литом состоянии и после термообработки. Во всех случаях сплав имеет дендритную морфологию со структурой доэвтектического сплава. Основой структуры являются дендриты и эвтектика в междендритном пространстве.

Дендриты состоят из фазы ОЦК. Эвтектика представляет собой смесь фазы ОЦК и фазы Лавеса. В литом состоянии вследствие дендритной ликвации химический состав дендритов неоднороден. Центральная часть дендритов, состоящих из фазы ОЦК, обогащена Ni и Al. По краям дендритов и в эвтектике фаза ОЦК богата Cr и Fe. В фазе ОЦК частично растворяется Nb, но большая часть входит в состав фазы Лавеса. Результаты элементного анализа по зонам литого сплава представлены в табл. 2. Приведенная закономерность формирования дендритной структуры сплавов этой системы описана в работах других исследователей [15, 29].

Повсеместно дендритная структура, имеющая после травления темный контраст, окаймлена прослойками фазы Лавеса светлой окраски, которая является вторичной фазой. Вторичная фаза Лавеса образуется по границам твердого раствора в процессе формирования дендритов и обусловлена снижением растворимости ниобия в твердом растворе основных компонентов в процессе охлаждения. Вследствие обогащения периферийных зон дендритов ниобием и хромом создаются условия для образования на основе данных компонентов вторичной фазы Лавеса.

Как видно на рис. 2, б, структура эвтектической составляющей сплава несовершенна. Зерна фазы Лавеса разбиты на отдельные фрагменты с разносторонней ориентировкой. Поскольку в междендритном пространстве формируется эвтектика, в состав которой входит фаза Лавеса, то структурно разделить вторичную фазу Лавеса и фазу Лавеса в эвтектике не представляется возможным.

Термообработка в исследуемом интервале температур принципиально не меняет дендритное строение сплава (рис. 2). Ширина дендритов по осям второго порядка составляет от 11 до 15 мкм. Увеличение температуры нагрева с 900 до 1100 °C приводит к изменению строения эвтектики, что прослеживается на металлографических изображениях с большим увеличением (рис. 2, е, з). При нагреве до 900 °C изменения в строении эвтектики незаметны. При нагреве до 1000 °C разрозненные фрагменты фазы Лавеса начинают выстраиваться в характерные для эвтектики чередующиеся с твердым раствором строчки. При температуре 1100 °C в междендритном пространстве мы наблюдаем совершенные зерна эвтектики (рис. 2, з). Изменение в строении эвтектической составляющей сплава подтверждают результаты рентгеноструктурного анализа. С повышением температуры термообработки на дифрактограммах увеличивается интенсивность пика фазы Лавеса. Это может быть связано как с коагуляцией зерен второй фазы, так и с увеличением доли этой фазы в междендритной зоне за счет ее дальнейшего выделения из твердого раствора (рис. 1, а).

Как показывает рентгеноструктурный анализ, при термообработке с нагревом 900 °C в сплаве образуется упорядоченная σ -фаза. В работе [32] описано, что σ -фаза выделяется из неупорядоченного твердого раствора там, где он обогащен Cr и Fe, в виде дисперсных частиц. Наши исследования с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показали, что частицы σ -фазы выделяются по всему объему дендритов (рис. 3, б). При термообработке с нагревом 1000 °C частицы σ -фазы еще наблюдаются, но в меньшем количестве (рис. 3, в). При нагреве до 1100 °C они исчезают полностью (рис. 3, г).

По результатам СЭМ можно видеть, что термообработка значительно влияет на строение

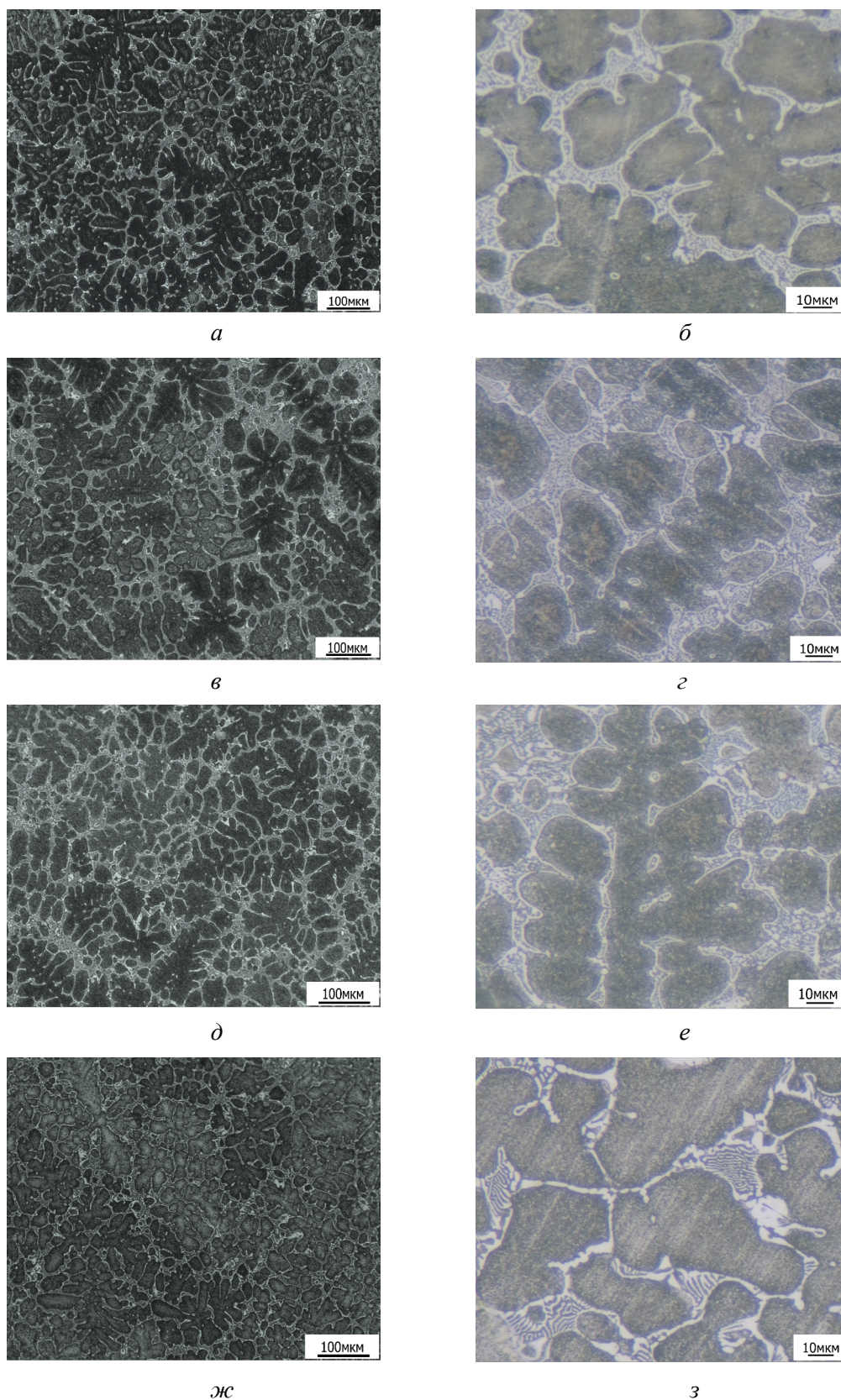


Рис. 2. Микроструктура сплава $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$ в литом состоянии и после термообработки:

T30 (а, б); T900 (в, з); T1000 (д, е); T1100 (ж, з)

Fig. 2. Microstructure of $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$ alloy in the as-cast state and after heat treatment:

T30 (a, б); T900 (в, з); T1000 (д, е); T1100 (ж, з)

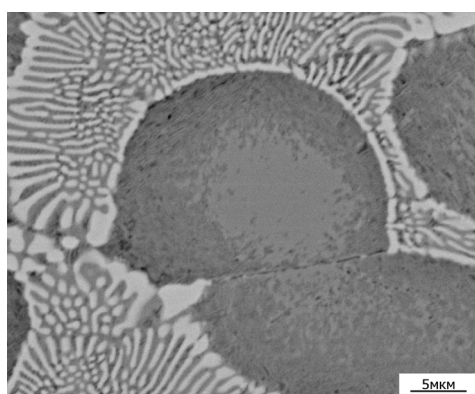
Таблица 2

Table 2

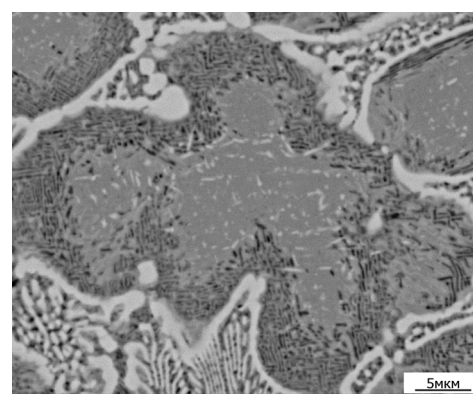
Составы в сплаве AlCoCrFeNi в литом состоянии (ат. %)

Chemical compositions (at. %) in the AlCoCrFeNi alloy in the as-cast state

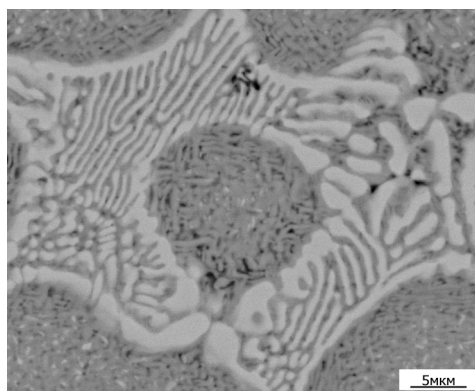
T30	Al	Cr	Fe	Co	Ni	Nb
Центр дендрита / Dendrite core	17,76	16,46	18,61	20,30	24,56	2,40
Периферия дендрита / Dendrite periphery	14,85	21,61	20,75	20,14	21,06	1,59
Твердый раствор в эвтектике / Solid solution in eutectics	12,09	23,86	22,05	19,78	19,28	2,96
Фаза Лавеса / Laves phase	3,80	18,36	21,43	23,66	11,56	21,17



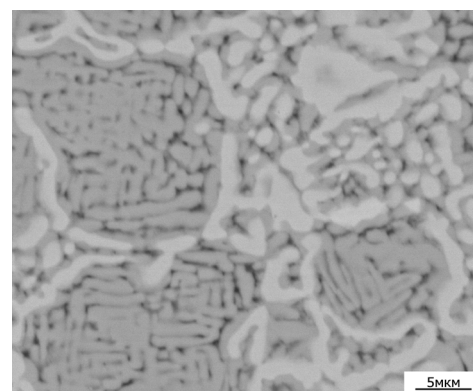
а



б



в



г

Рис. 3. Микроструктура сплава AlCoCrFeNiNb_{0.25} в литом состоянии и после термообработки, полученная с помощью СЭМ:

T30 (а); T900 (б); T1000 (в); T1100 (г)

Fig. 2. Microstructure of AlCoCrFeNiNb_{0.25} alloy in the as-cast state and after heat treatment, obtained using SEM:

T30 (a); T900 (б); T1000 (в); T1100 (г)

твердого раствора в дендритах (рис. 3). Как известно, при кристаллизации сплавов исследуемой системы в процессе охлаждения происходит спинодальный распад неупорядоченного твердого раствора на неупорядоченный твердый

раствор, обогащенный Fe и Cr, и упорядоченную B₂-фазу, обогащенную Ni и Al [32]. Распад твердого раствора приводит к формированию так называемой корзинчатой структуры, подробно описанной в работах [15, 32, 37]. В исследуемом

сплаве, полученном литьем, в периферийных областях дендритов формируется характерная корзинчатая (или полосчатая) структура, обусловленная спинодальным распадом твердого раствора. В центре дендритов полосчатая структура не выявляется (рис. 3, а).

При нагреве сплава до 900 °С и последующем охлаждении структурная неоднородность внутри дендритов становится более наглядной, а корзинчатое строение – более выраженным (рис. 3, б). Кроме того, как описывалось выше, из твердого раствора выделяются частицы σ -фазы. По данным РСА после термообработки доля упорядоченной B_2 -фазы уменьшается, и можно предположить, что наблюдаемый контраст внутри корзинчатой структуры обусловлен не спинодальным распадом твердого раствора на две фазы, а гетерогенной сегрегацией атомов компонентов внутри неупорядоченного твердого раствора, как описывается в работе [15]. При термообработке сплава с нагревом до 1000 °С корзинчатая структура укрупняется и занимает весь объем дендритов (рис. 3, в). При дальнейшем увеличении температуры нагрева до 1100 °С корзинчатая структура продолжает коагулировать (рис. 3, г).

Значения средней микротвердости и микротвердости структурных составляющих сплава представлены в табл. 3. При всех режимах воздействия на материал микротвердость в междендритной зоне выше, чем в дендритах.

Самое высокое значение микротвердости в дендритах наблюдается в сплаве с литой структурой. Это обусловлено особым строением твердого раствора компонентов сплава, формирующегося в процессе кристаллизации и охлаждения. Спинодальный распад неупорядоченного твердого раствора с выделением упорядоченной B_2 -фазы упрочняет сплав. Нагрев сплава при

термообработке ведет к частичной потере упорядоченности, характерной для B_2 -фазы, в результате микротвердость дендритов снижается. Однако выделение частиц σ -фазы при нагреве до 900 °С дает возможность сохранить значение микротвердости на высоком уровне. При повышении температуры нагрева до 1000 °С эффект упрочнения частицами σ -фазы исчезает. При термообработке с 1100 °С происходит коагуляция корзинчатой структуры и формирование более четких границ раздела (возможно, за счет увеличения гетерогенной сегрегации атомов компонентов внутри твердого раствора), что в совокупности несколько увеличивает микротвердость в дендритной области сплава.

В междендритном пространстве в литом состоянии микротвердость эвтектики лишь незначительно выше, чем микротвердость твердого раствора в дендритах. Это показывает, что упрочнение, возникающее при формировании спинодальной структуры, почти соизмеримо с упрочнением, обусловленным присутствием в эвтектике фазы Лавеса – твердого интерметаллида. При термообработке с температурой 900 °С, как описывалось выше, из твердого раствора выделяются частицы σ -фазы. Дисперсные частицы σ -фазы выделяются в твердом растворе всех структурных составляющих. Это значительно повышает микротвердость эвтектики за счет упрочнения твердорастворной составляющей частицами σ -фазы. Нагрев при термообработке до 1000 и 1100 °С приводит к растворению в основной фазе частиц σ -фазы [11], что способствует снижению микротвердости в междендритном пространстве до значений исходной структуры. Это обусловлено снятием эффекта упрочнения частицами σ -фазы.

При оценке интегральной микротвердости всех структурных составляющих сплава общая

Таблица 3

Table 3

Микротвердость сплава $AlCoCrFeNiNb_{0.25}$ в литом состоянии и после термообработки

Microhardness of $AlCoCrFeNiNb_{0.25}$ alloy in the as-cast state and after heat treatment

Район измерения / Measurement area	T30 HV	T900 HV	T1000 HV	T1100 HV
Дендриты / Dendrites	614 ± 44	582 ± 37	489 ± 53	520 ± 35
Эвтектика / Eutectic	640 ± 47	902 ± 66	620 ± 45	636 ± 46
Среднее значение / Average value	625 ± 28	730 ± 47	545 ± 52	572 ± 56

закономерность изменения значений микротвердости от температуры термообработки сохраняется (табл. 3).

На рис. 4 показаны кривые сжатия образцов исследуемого сплава в литом состоянии и после термической обработки. Условный предел текучести, предел прочности на сжатие и остаточная деформация приведены в табл. 4. В литом состоянии сплав показал хорошие характеристики прочности и пластичности. Структурные превращения, произошедшие в сплаве при нагреве до 900 °С, практически не повлияли на прочностные характеристики материала, но значительно снизили пластичность. Это обусловлено

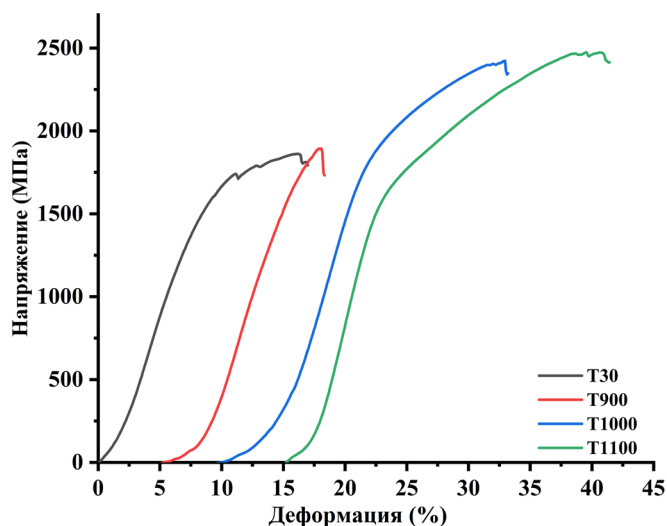


Рис. 4. Деформационные кривые для сплава $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$ при комнатной температуре и при разных температурах термообработки

Fig. 4. Compressive stress-strain curves of the $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$ alloy in the as-cast state and after heat treatment

выделением в структуре хрупкой σ -фазы. На данный эффект снижения пластичности в близком интервале температур термообработки указывают авторы работы [32].

При термообработке сплава с нагревом до 1000 и 1100 °С наблюдается значительное повышение прочностных характеристик сплава. При нагреве до 1100 °С вырастает и остаточная деформация. На основе полученных результатов рентгеноструктурного анализа и оптической микроскопии можно предположить, что основными причинами подобного эффекта могут быть превращения, происходящие как в твердом растворе ОЦК-фазы (растворение V_2 -фазы, перестройка субструктуры, увеличение параметра решетки), так и в эвтектике (увеличение доли фазы Лавеса, совершенствование эвтектических ячеек). Одновременное увеличение пластичности, вероятнее всего, обусловлено снятием внутренних напряжений, снижением количества дефектов кристаллического строения и коагуляции структурных составляющих в дендритах и эвтектике. Однако более точный анализ подобного уникального эффекта изменения свойств сплава $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$ требует дополнительных исследований.

Закключение

Легирование высокоэнтропийного сплава AlCoCrFeNi ниобием в молярном отношении 0,25 приводит к стабилизации твердого раствора на основе ОЦК-фазы не только в литом состоянии, но и после термической обработки, заключающейся в нагреве до 900, 1000 и 1100 °С и охлаждении на воздухе. Получаемая в сплаве

Таблица 4

Table 4

Условный предел текучести, предел прочности на сжатие и остаточная деформация сплава $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$ в литом состоянии и после термической обработки

Offset yield strength, compressive strength and residual strain of $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$ alloy in the as-cast state and after heat treatment

Образец	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	ϵ , %
T30	1356	1962	7,7
T900	1605	1894	2,8
T1000	1502	2438	9,8
T1100	1369	2494	16,4



структура, независимо от режимов термообработки, состоит из дендритов твердого раствора и эвтектики с фазой Лавеса в междендритном пространстве.

Термическая обработка приводит к изменению фазового состава сплава и совершенствованию структурных составляющих. При нагреве до 900 °С наряду с уже сформированным твердым раствором и фазой Лавеса в структуре выделяется σ -фаза, повышающая микротвердость сплава, но не обеспечивающая улучшения прочностных свойств в связи со своими низкими пластическими характеристиками.

Прочностные характеристики сплава значительно возрастают при термообработке с нагревом до 1000 и 1100 °С. При нагреве до 1100 °С возрастает и остаточная деформация. Основными причинами подобного эффекта могут быть превращения, происходящие как в твердом растворе ОЦК-фазы (растворение B_2 -фазы, перестройка субструктуры, увеличение параметра решетки), так и в эвтектике (увеличение доли фазы Лавеса, совершенствование эвтектических ячеек).

Список литературы

1. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes / J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin, J.Y. Gan, T.S. Chin, T.T. Shun, C.H. Tsau, S.Y. Chang // *Advanced Engineering Materials*. – 2004. – Vol. 6. – P. 299–303. – DOI: 10.1002/adem.200300567.

2. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor, I.T.H. Chang, P. Knight, A.J.B. Vincent // *Materials Science and Engineering: A*. – 2004. – Vol. 375–377. – P. 213–218. – DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.

3. Применение высокоэнтروпийных сплавов / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, К.А. Осинцев, Ю.А. Рубанникова, О.А. Перегудов, А.П. Семин // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2021. – Т. 64, № 10. – С. 747–754. – DOI: 10.17073/0368-0797-2021-10-747-754.

4. Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода / З.Б. Батаева, А.А. Руктуев, И.В. Иванов, А.Б. Юргин, И.А. Батаев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 116–146. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146.

5. Mechanical behavior of high-entropy alloys / W. Li, D. Xie, D. Li, Y. Zhang, Y. Gao, P.K. Liaw //

Progress in Materials Science. – 2021. – Vol. 118. – P. 100777. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2021.100777.

6. Mechanical behavior of high-entropy alloys: A review / Y. Shang, J. Brechtel, C. Pistidda, P.K. Liaw // *High-Entropy Materials: Theory, Experiments, and Applications*. – Springer, 2021. – P. 435–522. – DOI: 10.1007/978-3-030-77641-1_10.

7. Sheng H.F., Gong M., Peng L.M. Microstructural characterization and mechanical properties of an $Al_{0.5}CoCrFeCuNi$ high-entropy alloy in as-cast and heat-treated/quenched conditions // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – Vol. 567. – P. 14–20. – DOI: 10.1016/j.msea.2013.01.006.

8. Additive manufacturing of $CoCrFeNiMo$ eutectic high entropy alloy: Microstructure and mechanical properties / Q. Sui, Z. Wang, J. Wang, S. Xu, B. Liu, Q. Yuan, F. Zhao, L. Gong, J. Liu // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – Vol. 913. – P. 165239. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165239.

9. Structure and oxidation behavior of $CoCrFeNi_x$ (where X is Al, Cu, or Mn) coatings obtained by electron beam cladding in air atmosphere / A.A. Ruktuev, D.V. Lazurenko, T.S. Ogneva, R.I. Kuzmin, M.G. Golkovski, I.A. Bataev // *Surface and Coatings Technology*. – 2022. – Vol. 448. – P. 128921. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128921.

10. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the $CrMnFeCoNi$ high-entropy alloy / G. Laplanche, A. Kostka, O.M. Horst, G. Eggeler, E.P. George // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 118. – P. 152–163. – DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.038.

11. Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of $Al_xCoCrFeNi$ high-entropy alloys / W.R. Wang, W.L. Wang, S.C. Wang, Y.C. Tsai, C.H. Lai, J.W. Yeh // *Intermetallics*. – 2012. – Vol. 26. – P. 44–51. – DOI: 10.1016/j.intermet.2012.03.005.

12. Arun S., Radhika N., Saleh B. Effect of additional alloying elements on microstructure and properties of $AlCoCrFeNi$ high entropy alloy system: A comprehensive review // *Metals and Materials International*. – 2024. – P. 1–40. – DOI: 10.1007/s12540-024-01752-3.

13. Laser surface alloying of $FeCoCrAlNi$ high-entropy alloy on 304 stainless steel to enhance corrosion and cavitation erosion resistance / S. Zhang, C.L. Wu, C.H. Zhang, M. Guan, J.Z. Tan // *Optics & Laser Technology*. – 2016. – Vol. 84. – P. 23–31. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.04.011.

14. Phase separation in equiatomic $AlCoCrFeNi$ high-entropy alloy / A. Manzoni, H. Daoud, R. Völkl, U. Glatzel, N. Wanderka // *Ultramicroscopy*. – 2013. – Vol. 132. – P. 212–215. – DOI: 10.1016/j.ultramicro.2012.12.015.

15. Microstructure and compressive properties of $AlCrFeCoNi$ high entropy alloy / Y.P. Wang, B.S. Li,

- M.X. Ren, C. Yang, H.Z. Fu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008. – Vol. 491 (1–2). – P. 154–158. – DOI: 10.1016/j.msea.2008.01.064.
16. Microstructural characterisation of high-entropy alloy AlCoCrFeNi fabricated by laser engineered net shaping / I. Kuncce, M. Polanski, K. Karczewski, T. Plocinski, K.J. Kurzydowski // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2015. – Vol. 648. – P. 751–758. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.05.144.
17. Understanding phase stability of Al-Co-Cr-Fe-Ni high entropy alloys / C. Zhang, F. Zhang, H. Diao, M.C. Gao, Z. Tang, J.D. Poplawsky, P.K. Liaw // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 109. – P. 425–433. – DOI: 10.1016/j.matdes.2016.07.073.
18. Структурно-фазовое состояние высокоэнтروпийного сплава Al-Co-Cr-Fe-Ni, полученного проволочно-дуговой аддитивной технологией / К.А. Осинцев, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, И.А. Панченко, Е.С. Ващук // *Ползуновский вестник*. – 2021. – № 1. – С. 141–146. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.020.
19. Corrosion behavior of AlCoCrFeNi_x high entropy alloys / A.M. Zemanate, A.M.J. Júnior, G.F. de Lima Andreani, V. Roche, K.R. Cardoso // *Electrochimica Acta*. – 2023. – Vol. 441. – P. 141844. – DOI: 10.1016/j.electacta.2023.141844.
20. Strengthening of nanoprecipitations in an annealed Al_{0.5}CoCrFeNi high entropy alloy / S. Niu, H. Kou, T. Guo, Y. Zhang, J. Wang, J. Li // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 671. – P. 82–86. – DOI: 10.1016/j.msea.2016.06.040.
21. Структурные преобразования при отжиге холоднодеформированного высокоэнтропийного сплава Al_{0.3}CoCrFeNi / И.В. Иванов, К.И. Эмурлаев, К.Э. Купер, Д.Э. Сафарова, И.А. Батаев // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2022. – Т. 65, № 8. – С. 539–547. – DOI: 10.17073/0368-0797-2022-8-539-547.
22. Strengthening by Ti, Nb, and Zr doping on microstructure, mechanical, tribological, and corrosion properties of CoCrFeNi high-entropy alloys / J.L. Zhou, Y.H. Cheng, Y.X. Wan, H. Chen, Y.F. Wang, J.Y. Yang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2024. – Vol. 984. – P. 173819. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.173819.
23. Influence of alloying elements (Cu, Ti, Nb) on the microstructure and corrosion behaviour of AlCrFeNi-based high entropy alloys exposed to oxygen-containing molten Pb / H. Shi, R. Fetzer, A. Jianu, A. Weisenburger, A. Heinzl, F. Lang, G. Müller // *Corrosion Science*. – 2021. – Vol. 190. – P. 109659. – DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109659.
24. Effect of Nb, Ti, and V on wear resistance and electrochemical corrosion resistance of AlCoCrNiM_x (M=Nb, Ti, V) high-entropy alloys / B. Pan, X. Xu, J. Yang, H. Zhan, L. Feng, Q. Long, H. Zhou // *Materials Today Communications*. – 2024. – Vol. 39. – P. 109314. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.109314.
25. Температурная зависимость механических свойств и закономерностей пластического течения литых многокомпонентных сплавов Fe₂₀Cr₂₀Mn₂₀Ni₂₀Co_{20-x}C_x (x = 0, 1, 3, 5) / Е.Г. Астафурова, Е.В. Мельников, К.А. Реунова, В.А. Москвина, С.В. Астафуров, М.Ю. Панченко, А.С. Михно, И. Тумбурсова // *Физическая мезомеханика*. – 2021. – Т. 24, № 4. – С. 52–63. – DOI: 10.24412/1683-805X-2021-4-52-63.
26. On the difference in carbon-and nitrogen-alloying of equiatomic FeMnCrNiCo high-entropy alloy / E.G. Astafurova, K.A. Reunova, E.V. Melnikov, M.Yu. Panchenko, S.V. Astafurov, G.G. Maier, V.A. Moskvina // *Materials Letters*. – 2020. – Vol. 276. – P. 128183. – DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128183.
27. Шуберт А.В., Коновалов С.В., Панченко И.А. Обзор исследований высокоэнтропийных сплавов, их свойств, методов создания и применения // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 153–179. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-153-179.
28. Effect of Nb and Ti additions on microstructure, hardness and wear properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy / F.C. Dalan, A.S.D.S. Sobrinho, R.K. Nishihora, S.F. Santos, G.V. Martins, K.R. Cardoso // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2025. – Vol. 1010. – P. 177117. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.177117.
29. Ma S.G., Zhang Y. Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2012. – Vol. 532. – P. 480–486. – DOI: 10.1016/j.msea.2011.10.110.
30. Пути улучшения свойств ВЭС Cantor CoCrFeNiMn и CoCrFeNiAl / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, М.О. Ефимов, И.А. Панченко, В.В. Шляров // *Известия вузов. Черная Металлургия*. – 2024. – Т. 67, № 3. – С. 283–292. – DOI: 10.17073/0368-0797-2024-3-283-292.
31. Effect of Nb content on thermal stability, mechanical and corrosion behaviors of hypoeutectic CoCrFeNiNb_x high-entropy alloys / M. Zhang, L. Zhang, P.K. Liaw, G. Li, R. Liu // *Journal of Materials Research*. – 2018. – Vol. 33 (19). – P. 3276–3286. – DOI: 10.1557/jmr.2018.103.
32. Heat treatment impacts the micro-structure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy / A. Munitz, S. Salhov, S. Hayun, N. Frage // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 683. – P. 221–230. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.05.034.
33. Güler S., Alkan E.D., Alkan M. Vacuum arc melted and heat treated AlCoCrFeNiTiX based high-



entropy alloys: Thermodynamic and microstructural investigations // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – Vol. 903. – P. 163901. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.163901.

34. Effects of heat treatment on the precipitation behaviors and mechanical properties of Nb-doped $\text{CrMnFeCoNi}_{0.8}$ high-entropy alloy / S. Huang, H. Wu, Y. Xu, H. Zhu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2023. – Vol. 885. – P. 145611. – DOI: 10.1016/j.msea.2023.145611.

35. Selective laser melting of AlCoCrFeMnNi high entropy alloy: Effect of heat treatment / Y. Fang, P. Ma, S. Wei, Z. Zhang, D. Yang, H. Yang, G.P. Konda, S. Wan, Y. Jia // *Journal of Materials Research and Technology*. –

2023. – Vol. 26. – P. 7845–7856. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.09.121.

36. Effect of heat treatment on the phase composition, microstructure and mechanical properties of $\text{Al}_{0.6}\text{CrFeCoNi}$ and $\text{Al}_{0.6}\text{CrFeCoNiSi}_{0.3}$ high-entropy alloys / L. Chen, K. Bobzin, Z. Zhou, L. Zhao, M. Öte, T. Königstein, Z. Tan, D. He // *Metals*. – 2018. – Vol. 8. – P. 974. – DOI: 10.3390/met8110974.

37. Effect of heat treatment on the microstructure and nanoindentation behavior of AlCoCrFeNi high entropy alloy / G. Shang, Z.Z. Liu, J. Fan, X.G. Lu // *Intermetallics*. – 2024. – Vol. 169. – P. 108302. – DOI: 10.1016/j.intermet.2024.108302.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Effect of heat treatment on the structure and properties of high-entropy alloy $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$

Zhanna Kovalevskaya^{a, *}, Yuanxun Liu^b

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-3040-8851>, kovalevskaya@tpu.ru; ^b <https://orcid.org/0009-0002-8501-2643>, yuansyunl@tpu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10 April 2025

Revised: 24 April 2025

Accepted: 13 June 2025

Available online: 15 September 2025

Keywords:

High-Entropy Alloy

$\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$

Heat Treatment

Microstructure

Microhardness

Compression Tests

ABSTRACT

Introduction. Currently, one of the most studied high-entropy alloys (HEAs) is the CoCrFeNi system with the addition of a fifth component. An example of such an alloy is AlCoCrFeNi alloyed with additional elements. Nb alloying promotes the formation of a solid solution and a secondary *Laves* phase in the alloy, and leads to the formation of eutectics between these phases. The optimal combination of mechanical properties achieved in the alloy up to the eutectic composition $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$ was the basis for the choice of this alloy for further studies under heat treatment conditions. **Purpose of the work.** To investigate the effect of heat treatment, including heating to temperatures of 900°C, 1,000°C and 1,100°C with subsequent cooling in air, on the structure and properties of $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$. **The methods of investigation** were optical metallography, X-ray diffraction analysis, microhardness measurement, and compression tests. **Results and Discussion.** $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$ alloy retains the solid solution structure based on the *BCC* phase not only in the cast state, but also after heat treatment. Irrespective of heat treatment parameters, the alloy retains the pre-eutectic structure consisting of solid solution dendrites and eutectic with the *Laves* phase in the interdendritic space. Heat treatment leads to changes in the phase composition of the alloy and refinement of structural components. When heated to 900°C, along with the existing solid solution and *Laves* phase, σ -phase is released in the structure, which increases the microhardness of the alloy, but does not provide improvement of strength properties due to its low plasticity. The strength properties of the alloy are significantly improved by heat treatment with heating up to 1,000°C and 1,100°C. Heating up to 1,100°C is accompanied by an increase in residual strain. The main reasons for this effect may be transformations occurring both in the solid solution of the *BCC* phase (dissolution of the B_2 phase, rearrangement of the substructure, increase in the lattice parameter) and in the eutectic (increase in the proportion of the *Laves* phase, refinement of eutectic cells).

For citation: Kovalevskaya Z.G., Liu Y. Effect of heat treatment on the structure and properties of high-entropy alloy $\text{AlCoCrFeNiNb}_{0.25}$. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 3, pp. 137–150. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-137-150. (In Russian).

References

1. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., Tsau C.H., Chang S.Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 2004, vol. 6, pp. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.
2. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 375–377, pp. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
3. Gromov V.E., Shlyarova Yu.A., Konovalov S.V., Vorob'ev S.V., Peregodov O.A. Application of high-entropy alloys. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2021, vol. 64 (10), pp. 747–754. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-10-747-754. (In Russian).
4. Bataeva Z.B., Ruktuev A.A., Ivanov I.V., Yurgin A.B., Bataev I.A. Review of alloys developed using the entropy approach. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 116–146. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146. (In Russian).
5. Li W., Xie D., Li D., Zhang Y., Gao Y., Liaw P.K. Mechanical behavior of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 2021, vol. 118, p. 100777. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2021.100777.

* Corresponding author

Kovalevskaya Zhanna G., D.Sc. (Engineering), Professor
 National Research Tomsk Polytechnic University,
 30 Lenin ave.,
 634050, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: +7 3822 706-351, e-mail: kovalevskaya@tpu.ru



6. Shang Y., Brechtel J., Pistidda C., Liaw P.K. Mechanical behavior of high-entropy alloys: A review. *High-Entropy Materials: Theory, Experiments, and Applications*. Springer, 2021, pp. 435–522. DOI: 10.1007/978-3-030-77641-1_10.
7. Sheng H.F., Gong M., Peng L.M. Microstructural characterization and mechanical properties of an $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeCuNi}$ high-entropy alloy in as-cast and heat-treated/quenched conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 567, pp. 14–20. DOI: 10.1016/j.msea.2013.01.006.
8. Sui Q., Wang Z., Wang J., Xu S., Liu B., Yuan Q., Zhao F., Gong L., Liu J. Additive manufacturing of CoCrFeNiMo eutectic high entropy alloy: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 913, p. 165239. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165239.
9. Ruktuev A.A., Lazurenko D.V., Ogneva T.S., Kuzmin R.I., Golkovski M.G., Bataev I.A. Structure and oxidation behavior of CoCrFeNiX (where X is Al, Cu, or Mn) coatings obtained by electron beam cladding in air atmosphere. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 448, p. 128921. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128921.
10. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*, 2016, vol. 118, pp. 152–163. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.038.
11. Wang W.R., Wang W.L., Wang S.C., Tsai Y.C., Lai C.H., Yeh J.W. Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloys. *Intermetallics*, 2012, vol. 26, pp. 44–51. DOI: 10.1016/j.intermet.2012.03.005.
12. Arun S., Radhika N., Saleh B. Effect of additional alloying elements on microstructure and properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy system: A comprehensive review. *Metals and Materials International*, 2025, vol. 31 (2), pp. 285–324. DOI: 10.1007/s12540-024-01752-3.
13. Zhang S., Wu C.L., Zhang C.H., Guan M., Tan J.Z. Laser surface alloying of FeCoCrAlNi high-entropy alloy on 304 stainless steel to enhance corrosion and cavitation erosion resistance. *Optics & Laser Technology*, 2016, vol. 84, pp. 23–31. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.04.011.
14. Manzoni A., Daoud H., Völkl R., Glatzel U., Wanderka N. Phase separation in equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Ultramicroscopy*, 2013, vol. 132, pp. 212–215. DOI: 10.1016/j.ultramic.2012.12.015.
15. Wang Y.P., Li B.S., Ren M.X., Yang C., Fu H.Z. Microstructure and compressive properties of AlCrFeCoNi high entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 491 (1–2), pp. 154–158. DOI: 10.1016/j.msea.2008.01.064.
16. Kunce I., Polanski M., Karczewski K., Plocinski T., Kurzydowski K.J. Microstructural characterisation of high-entropy alloy AlCoCrFeNi fabricated by laser engineered net shaping. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 648, pp. 751–758. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.05.144.
17. Zhang C., Zhang F., Diao H., Gao M.C., Tang Z., Poplawsky J.D., Liaw P.K. Understanding phase stability of Al-Co-Cr-Fe-Ni high entropy alloys. *Materials & Design*, 2016, vol. 109, pp. 425–433. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.07.073.
18. Osintsev K.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Panchenko I.A., Vashchuk E.S. Structural-phase state of high-entropy Al-Co-Cr-Fe-Ni alloy obtained by wire-arc additive technology. *Polzunovskiy vestnik*, 2016, no. 1, pp. 141–146. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.020. (In Russian).
19. Zemanate A.M., Júnior A.M.J., Andreani G.F. de Lima, Roche V., Cardoso K.R. Corrosion behavior of AlCoCrFeNi high entropy alloys. *Electrochimica Acta*, 2023, vol. 441, p. 141844. DOI: 10.1016/j.electacta.2023.141844.
20. Niu S., Kou H., Guo T., Zhang Y., Wang J., Li J. Strengthening of nanoprecipitations in an annealed $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 671, pp. 82–86. DOI: 10.1016/j.msea.2016.06.040.
21. Ivanov I.V., Emurlaev K.I., Kuper K.E., Safarova D.E., Bataev I.A. Structural transformations during annealing of cold-worked high-entropy alloy $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2022, vol. 65 (8), pp. 539–547. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-8-539-547. (In Russian).
22. Zhou J.L., Cheng Y.H., Wan Y.X., Chen H., Wang Y.F., Yang J.Y. Strengthening by Ti, Nb, and Zr doping on microstructure, mechanical, tribological, and corrosion properties of CoCrFeNi high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, vol. 984, p. 173819. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.173819.
23. Shi H., Fetzer R., Jianu A., Weisenburger A., Heinzl A., Lang F., Müller G. Influence of alloying elements (Cu, Ti, Nb) on the microstructure and corrosion behaviour of AlCrFeNi-based high entropy alloys exposed to oxygen-containing molten Pb. *Corrosion Science*, 2021, vol. 190, p. 109659. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109659.

24. Pan B., Xu X., Yang J., Zhan H., Feng L., Long Q., Zhou H. Effect of Nb, Ti, and V on wear resistance and electrochemical corrosion resistance of AlCoCrNiMx (M=Nb, Ti, V) high-entropy alloys. *Materials Today Communications*, 2024, vol. 39, p. 109314. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.109314.
25. Astafurova E.G., Melnikov E.V., Reunova K.A., Moskvina V.A., Astafurov S.V., Panchenko M.Yu., Mikhno A.S., Tumbusova I. Temperature dependence of mechanical properties and plastic flow behavior of cast multicomponent alloys $\text{Fe}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Co}_{20-x}\text{C}_x$ ($x = 0, 1, 3, 5$). *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 52–63. DOI: 10.24412/1683-805X-2021-4-52-63. (In Russian).
26. Astafurova E.G., Reunova K.A., Melnikov E.V., Panchenko M.Yu., Astafurov S.V., Maier G.G., Moskvina V.A. On the difference in carbon-and nitrogen-alloying of equiatomic FeMnCrNiCo high-entropy alloy. *Materials Letters*, 2020, vol. 276, p. 128183. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128183.
27. Shubert A.V., Konovalov S.V., Panchenko I.A. A review of research on high-entropy alloys, its properties, methods of creation and application. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 153–179. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-153-179.
28. Dalan F.C., Sobrinho A.S.D.S., Nishihara R.K., Santos S.F., Martins G.V., Cardoso K.R. Effect of Nb and Ti additions on microstructure, hardness and wear properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, vol. 1010, p. 177117. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.177117.
29. Ma S.G., Zhang Y. Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, vol. 532, pp. 480–486. DOI: 10.1016/j.msea.2011.10.110.
30. Gromov V.E., Konovalov S.V., Efimov M.O., Panchenko I.A., Shlyarov V.V. Ways to improve the properties of high-entropy alloys Cantor CoCrFeNiMn and CoCrFeNiAl. *Izvestiya vuzov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2024, vol. 67 (3), pp. 283–292. DOI: 10.17073/0368-0797-2024-3-283-292. (In Russian).
31. Zhang M., Zhang L., Liaw P.K., Li G., Liu R. Effect of Nb content on thermal stability, mechanical and corrosion behaviors of hypoeutectic CoCrFeNiNb_x high-entropy alloys. *Journal of Materials Research*, 2018, vol. 33 (19), pp. 3276–3286. DOI: 10.1557/jmr.2018.103.
32. Munitz A., Salhov S., Hayun S., Frage N. Heat treatment impacts the micro-structure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 683, pp. 221–230. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.05.034.
33. Güler S., Alkan E.D., Alkan M. Vacuum arc melted and heat treated AlCoCrFeNiTiX based high-entropy alloys: Thermodynamic and microstructural investigations. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 903, p. 163901. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.163901.
34. Huang S., Wu H., Xu Y., Zhu H. Effects of heat treatment on the precipitation behaviors and mechanical properties of Nb-doped CrMnFeCoNi_{0.8} high-entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, vol. 885, p. 145611. DOI: 10.1016/j.msea.2023.145611.
35. Fang Y., Ma P., Wei S., Zhang Z., Yang D., Yang H., Konda G.P., Wan S., Jia Y. Selective laser melting of AlCoCrFeMnNi high entropy alloy: Effect of heat treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 26, pp. 7845–7856. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.09.121.
36. Chen L., Bobzin K., Zhou Z., Zhao L., Öte M., Königstein T., Tan Z., He D. Effect of heat treatment on the phase composition, microstructure and mechanical properties of Al_{0.6}CrFeCoNi and Al_{0.6}CrFeCoNiSi_{0.3} high-entropy alloys. *Metals*, 2018, vol. 8 (11), p. 974. DOI: 10.3390/met8110974.
37. Shang G., Liu Z.Z., Fan J., Lu X.G. Effect of heat treatment on the microstructure and nanoindentation behavior of AlCoCrFeNi high entropy alloy. *Intermetallics*, 2024, vol. 169, p. 108302. DOI: 10.1016/j.intermet.2024.108302.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).