



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
C22C 30/00 (2024.08)

(21)(22) Заявка: 2024121887, 01.08.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
01.08.2024

Дата регистрации:
24.02.2025

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 01.08.2024

(45) Опубликовано: 24.02.2025 Бюл. № 6

Адрес для переписки:

308015, г.Белгород, ул. Победы, 85, НИУ
"БелГУ", Токтарева Татьяна Михайловна

(72) Автор(ы):

Озеров Максим Сергеевич (RU),
Клименко Денис Николаевич (RU),
Степанов Никита Дмитриевич (RU),
Жеребцов Сергей Валерьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Белгородский государственный
национальный исследовательский
университет" (НИУ "БелГУ") (RU)

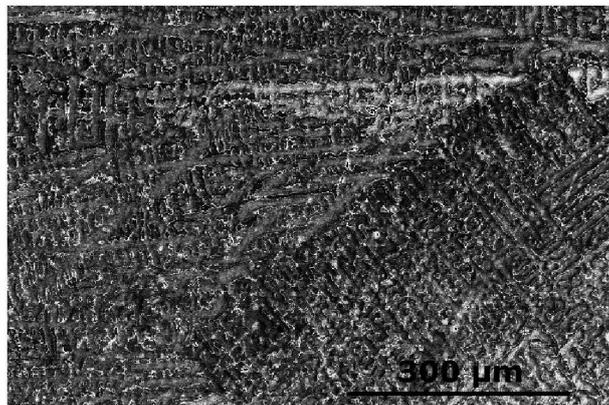
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: Stepanov N.D. et al., Structure and
mechanical properties of the AlCr_xNbTiV (x =
0, 0.5, 1, 1.5) high entropy alloys, Journal of Alloys
and Compounds, Vol.652, 15.12.2015, p.266-288.
Senkov O.N. et al., Mechanical properties of low-
density, refractory multi-principal element alloys
of the Cr-Nb-Ti-V-Zr system, Materials Science
and Engineering: (см. прод.)

(54) Высокоэнтропийный сплав системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr

(57) Реферат:

Изобретение относится к области металлургии, а именно к высокоэнтропийным сплавам системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr, которые могут быть использованы в качестве конструкционных материалов. Предлагается высокоэнтропийный сплав системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr, полученный путем вакуумно-дугового переплава и содержащий химические элементы при следующем процентном соотношении, ат. %: алюминий 1,

хром 9, ниобий 35, титан 5, ванадий 40 и цирконий 10. Сплав обладает высокими механическими свойствами: предел текучести 1090 МПа, предел прочности 1456 МПа и пластичность на сжатие 14,7 % при комнатной температуре, и предел текучести 920 МПа, предел прочности 1192 МПа и пластичность >50 % при температуре 800°C. 2 ил., 1 табл., 2 пр.



Фиг. 1

(56) (продолжение):

A, Vol.565, 20.03.2023, p.51-62. RU 2696799 C1, 06.08.2019. RU 2787332 C1, 09.01.2023. EP 3408047 B1, 20.04.2022.
CN 105734312 A, 06.07.2016. CN 112553488 A, 26.03.2021.

R U 2 8 3 5 2 3 9 C 1

R U 2 8 3 5 2 3 9 C 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
C22C 30/00 (2024.08)

(21)(22) Application: **2024121887, 01.08.2024**

(24) Effective date for property rights:
01.08.2024

Registration date:
24.02.2025

Priority:

(22) Date of filing: **01.08.2024**

(45) Date of publication: **24.02.2025** Bull. № 6

Mail address:

**308015, g.Belgorod, ul. Pobedy, 85, NIU "BelGU",
Toktareva Tatyana Mikhailovna**

(72) Inventor(s):

**Ozerov Maksim Sergeevich (RU),
Klimenko Denis Nikolaevich (RU),
Stepanov Nikita Dmitrievich (RU),
Zherebtsov Sergei Valerevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniia "Belgorodskii gosudarstvennyi
natsionalnyi issledovatel'skii universitet" (NIU
"BelGU") (RU)**

(54) **HIGH-ENTROPY ALLOY OF Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr SYSTEM**

(57) Abstract:

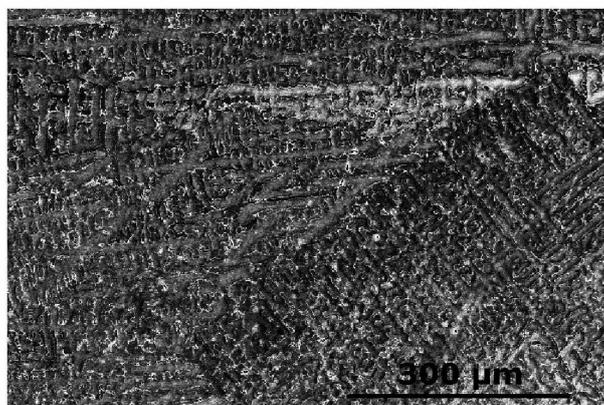
FIELD: metallurgy.

SUBSTANCE: invention relates to metallurgy, namely to high-entropy alloys of the system Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr, which can be used as structural materials. Disclosed is a high-entropy alloy of the system Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr, obtained by vacuum-arc remelting and containing chemical elements at the following percentage ratio, at.%: aluminium 1, chrome 9, niobium

35, titanium 5, vanadium 40 and zirconium 10.

EFFECT: alloy has high mechanical properties: yield strength 1090 MPa, ultimate strength of 1456 MPa and compression ductility of 14.7% at room temperature, and yield strength of 920 MPa, ultimate strength of 1192 MPa and ductility >50% at temperature of 800 °C.

1 cl, 2 dwg, 1 tbl, 2 ex



Фиг. 1

Предлагаемое изобретение относится к области металлургии, а именно к разработке высокоэнтропийных сплавов с сочетанием высокой прочности и пластичности при комнатной и повышенных температурах до 800°C, которые могут быть использованы в качестве конструкционных материалов.

5 На современном этапе развития техники существующие сплавы зачастую не могут обеспечить необходимый уровень механических и функциональных свойств, что требует создания новых сплавов с улучшенными свойствами. Одним из перспективных направлений в современном материаловедении являются высокоэнтропийные сплавы (ВЭС). В отличие от традиционных сплавов, для которых в составе можно выделить
10 один элемент, содержание которого значительно превышает содержание других, высокоэнтропийные сплавы содержат в своем составе пять и более элементов к эквиатомному или близком к эквиатомному соотношению. Такие многокомпонентные системы зачастую показывают хорошие механические свойства (высокая прочность при комнатной и повышенной температуре, твердость, износостойкость, коррозионная
15 стойкость и т.д.), перспективными в том числе являются высокоэнтропийные сплавы на основе тугоплавких элементов (ТВЭС). Такие сплавы могут демонстрировать высокие прочностные характеристики в широком интервале температур.

Так, сплавы NbMoTaW и VNbMoTaW показывают предел текучести при 800°C 552 МПа и 846 МПа соответственно при испытаниях на сжатие [Senkov O. N. et al. Mechanical
20 properties of Nb25Mo25Ta25W25 and V20Nb20Mo20Ta20W20 refractory high entropy alloys // Intermetallics. - 2011. - Т. 19. - №. 5. - С. 698-706.]. Однако высокая плотность этих сплавов (более 12 г/см³) в сочетании с низкой пластичностью при комнатной температуре (деформация до разрушения ~2%) значительно ограничивает применимость таких сплавов.

25 За счет замещения в составе тяжелых элементов более легкими на примере сплава HfNbTaTiZr было показана возможность сохранения высокой прочности при повышенных температурах при более низких значениях плотности. Для этого сплава удалось достичь плотность $\rho \sim 9,9 \text{ г/см}^3$, при этом предел текучести на сжатие при 800°C составил 535 МПа, а деформация до разрушения на сжатие при комнатной температуре
30 превысила 50% (сплав не разрушился в ходе испытания) [Senkov O. N. et al. Microstructure and elevated temperature properties of a refractory TaNbHfZrTi alloy // Journal of Materials Science. - 2012. - Т. 47. - С. 4062-4074.].

Введение в состав ТВЭСов еще более легкого хрома позволило еще больше снизить
35 плотность. Для сплава CrMo_{0,5}NbTa_{0,5}TiZr плотность снизилась до $\rho \sim 8,2 \text{ г/см}^3$, при этом сплав показал предел текучести на сжатие 983 МПа при температуре 800°C, однако, как и для предыдущих сплавов, при комнатной температуре пластичность на сжатие этого сплава оставляет желать лучшего (деформация до разрушения ~5%)[Senkov O. N., Woodward C. F. Microstructure and properties of a refractory NbCrMo_{0.5}Ta_{0.5}TiZr alloy
40 //Materials Science and Engineering: A. - 2011. - Т. 529. - С. 311-320.].

Исключение из состава сплава тяжелого молибдена позволило значительно снизить плотность сплава, но также это привело и к падению прочностных характеристик при
45 высоких температурах. Сплав CrNbTiVZr обладает плотностью $\rho \sim 6,6 \text{ г/см}^3$ и при температуре 800°C его предел текучести на сжатие составил 615 МПа, однако деформация до разрушения на сжатие составляет всего 3% [Senkov O. N. et al. Mechanical properties of low-density, refractory multi-principal element alloys of the Cr-Nb-Ti-V-Zr system //Materials Science and Engineering: A. - 2013. - Т. 565. - С. 51-62.].

Добавление алюминия к составу сплава позволило еще больше снизить плотность

сплава, и на примере сплава AlCrNbTiV была показана возможность достижения предела текучести на сжатие в 860 МПа (при 800°C) при плотности сплава менее 6 г/см³ [Stepanov N. D. et al. Structure and mechanical properties of the AlCr_xNbTiV (x= 0, 0.5, 1, 1.5) high entropy alloys // Journal of Alloys and Compounds. - 2015. - Т. 652. - С. 266-280.]. Однако, пластичность данного сплава при комнатной температуре составила всего 0,8%. Данный сплав выбран за прототип данного изобретения.

СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Технической задачей изобретения является разработка высокоэнтروпийного сплава для конструкционного применения с высокими значениями прочности при температурах до 800°C и обладающего приемлемой пластичностью со значением деформации на сжатие до разрушения более 10% при комнатной температуре.

Технический результат заключается в получении высокоэнтропийного сплава с соотношением элементов Al₁₁Cr₉Nb₃₅Ti₅V₄₀Zr₁₀, который в литом состоянии имеет предел текучести 1090 МПа, предел прочности 1456 МПа и пластичность со значением деформации на сжатие до разрушения 14,7 % при комнатной температуре и предел текучести 920 МПа, предел прочности 1192 МПа и пластичность со значением деформации на сжатие до разрушения >50% при 800°C.

Новизна и изобретательский уровень заявленного сплава подтверждаются тем, что из уровня техники не известен сплав с соотношением элементов в ат. % Al₁₁Cr₉Nb₃₅Ti₅V₄₀Zr₁₀, который обеспечивает предел текучести 1090 МПа, предел прочности 1456 МПа и деформацию на сжатие до разрушения 14,7 % при комнатной температуре и предел текучести 920 МПа, предел прочности 1192 МПа и деформацию на сжатие до разрушения >50% при 800°C.

Изобретение иллюстрируется следующими материалами:

фиг. 1. Микроструктура сплава Al₁₁Cr₉Nb₃₅Ti₅V₄₀Zr₁₀ в литом состоянии;
фиг.2. График зависимости напряжения от деформации сплава Al₁₁Cr₉Nb₃₅Ti₅V₄₀Zr₁₀ для комнатной температуры и 800°C.

ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

В качестве исходного материала использовали чистые элементы алюминия, хрома, ниобия, титана, ванадия и циркония. Образцы сплава Al₁₁Cr₉Nb₃₅Ti₅V₄₀Zr₁₀ получали методом вакуумно-дугового переплава при рабочей температуре 3500°C в течение 60 минут для получения слитков сплава в среде чистого аргона. Для получения однородного распределения элементов слиток переплавляют не менее 5 раз.

Возможность осуществления изобретения поясняется примерами технологического процесса получения сплава с высокими значениями прочности и пластичности.

Пример 1

Образцы сплава Al₁Cr₉Nb₃₅Ti₅V₄₀Zr₁₀ получали методом вакуумно-дугового переплава с составом элементов, ат. %: алюминий 1, хром 9, ниобий 35, титан 5, ванадий 40, цирконий 10. при рабочей температуре 3500°C в течение 60 минут в среде чистого аргона.

Для получения однородного распределения элементов каждый слиток переплавляли 5 раз.

Пример 2

Механические испытания на сжатие полученного сплава проводили на универсальной электромеханической испытательной машине Instron 5882 при комнатной и повышенной температурах. Исследования микроструктуры сплава проводили на растровом электронном микроскопе Quanta 600 FEG. Проведенные структурные исследования показали, что сплав Al₁₁Cr₉Nb₃₅Ti₅V₄₀Zr₁₀ обладает дендритной однофазной структурой

на основе ОЦК решетки (Фиг. 1).

Результаты испытаний представлены на графике зависимости напряжения от деформации сплава $Al_1Cr_9Nb_{35}Ti_5V_{40}Zr_{10}$ (фиг. 2).

Значения механических свойств заявленного сплава $Al_1Cr_9Nb_{35}Ti_5V_{40}Zr_{10}$ при комнатной температуре и при температуре $800^{\circ}C$ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения механических свойств сплава $Al_1Cr_9Nb_{35}Ti_5V_{40}Zr_{10}$.

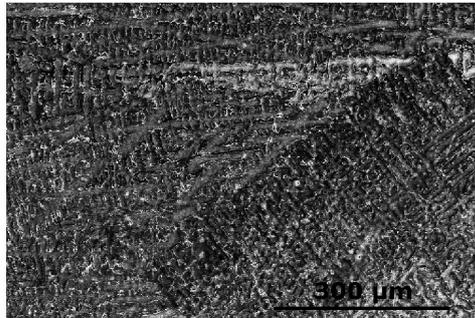
Температура испытания, $^{\circ}C$	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Деформация до разрушения, %
25	1090	1456	14,7
800	920	1192	>50

Как видно из таблицы, после испытаний на сжатие сплав показал предел текучести 1090 МПа, предел прочности 1456 МПа и деформацию на сжатие до разрушения 14,7 % при комнатной температуре и предел текучести 920 МПа, предел прочности 1192 МПа и деформацию на сжатие до разрушения >50% при $800^{\circ}C$.

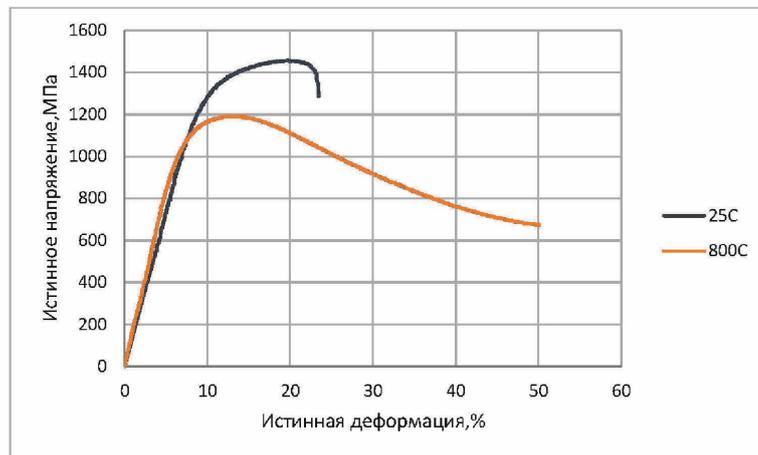
Приведенные примеры подтверждают, что заявленный технический результат изобретения достигнут - получен сплав $Al_1Cr_9Nb_{35}Ti_5V_{40}Zr_{10}$, который демонстрирует предел текучести 1090 МПа, предел прочности 1456 МПа и пластичность со значением деформации на сжатие до разрушения 14,7% при комнатной температуре и предел текучести 920 МПа, предел прочности 1192 МПа и пластичность со значением деформации на сжатие до разрушения >50% при $800^{\circ}C$.

(57) Формула изобретения

Высокоэнтропийный сплав системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr, полученный путем вакуумно-дугового переплава и содержащий химические элементы при следующем процентном соотношении, ат. %: алюминий 1, хром 9, ниобий 35, титан 5, ванадий 40 и цирконий 10.



Фиг. 1



Фиг. 2