



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
C22C 19/057 (2022.01)

(21)(22) Заявка: 2021118417, 24.06.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.06.2021

Дата регистрации:
25.03.2022

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.06.2021

(45) Опубликовано: 25.03.2022 Бюл. № 9

Адрес для переписки:

129301, Москва, ул. Касаткина, 13, "ОКБ им.
А. Люльки" филиал ПАО "ОДК-УМПО", УИС

(72) Автор(ы):

Данилов Денис Викторович (RU),
Зубарев Геннадий Иванович (RU),
Кузьмин Максим Владимирович (RU),
Лещенко Игорь Алексеевич (RU),
Логунов Александр Вячеславович (RU),
Марчуков Евгений Ювенальевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Публичное акционерное общество
"ОДК-Уфимское моторостроительное
производственное объединение" (ПАО
"ОДК-УМПО") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2700442 C1, 17.09.2019. RU
2484167 C1, 10.06.2013. RU 2439184 C1,
10.01.2012. RU 2402624 C1, 27.10.2010. EP 76360
A3, 16.05.1984. CA 2592027 A1, 29.06.2006.

(54) Литейный жаропрочный никелевый сплав с монокристалльной структурой

(57) Реферат:

Изобретение относится к области металлургии, а именно к литейным жаропрочным никелевым сплавам, предназначенным для литья деталей газовых турбин с монокристалльной структурой с рабочей температурой до 1100°C и выше. Литейный жаропрочный никелевый сплав с монокристалльной структурой содержит, мас. %: углерод 0,002-0,1, хром 3,0-6,0, кобальт 4,0-7,5, вольфрам 2,0-4,0, молибден 2,5-4,0, алюминий 5,5-7,0, тантал 7,0-10,0, ванадий 0,1-0,5, рений 3,5-5,0, цирконий 0,01-0,05, иттрий 0,001-0,1, лантан 0,001-0,1, церий 0,001-0,1, кремний 0,01-0,2, марганец

0,01-0,2, бор 0,005-0,03, магний 0,01-0,03, празеодим 0,01-0,1, никель – остальное, при соблюдении следующих условий: $44,8 \geq 3,0C_{Mo} + 1,6C_W + 2,3C_{Ta} + 1,3C_{Re}$, где C_{Mo} , C_W , C_{Ta} , C_{Re} - концентрации соответствующих элементов в сплаве, мас. % и $C_{Al}/(C_{Ta} + C_W + C_{Mo}) \geq 1,0$ (ат. %/ат. %), где C_{Al} , C_{Ta} , C_W , C_{Mo} - концентрации соответствующих элементов в γ' -фазе, ат. %. Обеспечивается высокая жаропрочность при сохранении удельного веса 8,82 г/см³. 2 табл.

RU
2 7 6 8 9 4 6
C 1

RU
2 7 6 8 9 4 6
C 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
C22C 19/057 (2022.01)

(21)(22) Application: **2021118417, 24.06.2021**

(24) Effective date for property rights:
24.06.2021

Registration date:
25.03.2022

Priority:

(22) Date of filing: **24.06.2021**

(45) Date of publication: **25.03.2022** Bull. № 9

Mail address:

129301, Moskva, ul. Kasatkina, 13, "OKB im. A. Lyulki" filial PAO "ODK-UMPO", UIS

(72) Inventor(s):

**Danilov Denis Viktorovich (RU),
Zubarev Gennadij Ivanovich (RU),
Kuzmin Maksim Vladimirovich (RU),
Leshchenko Igor Alekseevich (RU),
Logunov Aleksandr Vyacheslavovich (RU),
Marchukov Evgenij Yuvendalevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Publichnoe aktsionerное obshchestvo
"ODK-Ufimskoe motorostroitelnoe
proizvodstvennoe obединenie" (PAO
"ODK-UMPO") (RU)**

(54) **CAST HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY WITH MONOCRYSTALLINE STRUCTURE**

(57) Abstract:

FIELD: metallurgy.

SUBSTANCE: invention relates to metallurgy, namely to casting heat-resistant nickel alloys intended for casting parts of gas turbines with a monocrystalline structure with operating temperature of up to 1,100 °C and higher. Cast heat-resistant nickel alloy with monocrystalline structure contains, wt%: carbon 0.002–0.1, chrome 3.0–6.0, cobalt 4.0–7.5, tungsten 2.0–4.0, molybdenum 2.5–4.0, aluminum 5.5–7.0, tantalum 7.0–10.0, vanadium 0.1–0.5, rhenium 3.5–5.0, zirconium 0.01–0.05, yttrium 0.001–0.1, lanthanum 0.001–0.1, cerium 0.001–0.1, silicon 0.01–0.2,

manganese 0.01–0.2, boron 0.005–0.03, magnesium 0.01–0.03, praseodymium 0.01–0.1, nickel – the rest, subject to the following conditions: $44.8 \geq 3.0C_{Mo} + 1.6C_W + 2.3C_{Ta} + 1.3C_{Re}$, where C_{Mo} , C_W , C_{Ta} , C_{Re} – concentration of corresponding elements in the alloy, wt%, and $C_{Al}/(C_{Ta} + C_W + C_{Mo}) \geq 1.0$ (at.%/at.%), where C_{Al} , C_{Ta} , C_W , C_{Mo} – concentration of corresponding elements in γ' -phase, at.%.

EFFECT: providing high heat resistance while maintaining specific weight of 8_82 g/cm³.

1 cl, 2 tbl

RU 2 768 946 C1

RU 2 768 946 C1

Изобретение относится к области металлургии, а именно к литейным жаропрочным никелевым сплавам, предназначенным для литья деталей газовых турбин с монокристалльной структурой с рабочей температурой до 1100°C и выше.

Литейный жаропрочный никелевый сплав с монокристалльной структурой содержит

5 (мас. %):

хром 3,0-6,0;

кобальт 4,0-7,5;

вольфрам 2,0-4,0;

молибден 2,5-4,0;

10 алюминий 5,5-7,0;

тантал 7,0-10,0;

ванадий 0,1-0,5;

рений 3,5-5,0;

цирконий 0,01-0,05;

15 углерод 0,002-0,1;

иттрий 0,001-0,1;

лантан 0,001-0,1;

церий 0,001-0,1;

кремний 0,01-0,2;

20 марганец 0,01-0,2;

бор 0,005-0,03;

магний 0,01-0,03;

празеодим 0,01-0,1;

никель - остальное.

25 При соблюдении следующих условий:

$$44,8 \geq 3,0C_{Mo} + 1,6C_V + 2,3C_{Ta} + 1,3C_{Re},$$

где C_i - концентрации (мас. %) соответствующих элементов в сплаве и

$$30 \frac{C_{Al}}{C_{Ta} + 0,57C_V + 0,46C_{Mo}} \geq 1,0 \left(\frac{\text{ат \%}}{\text{ат \%}} \right),$$

здесь концентрации (ат. %) соответствующих элементов в γ' -фазе.

В настоящее время в мировом авиастроении четко прослеживаются два ведущих направления развития авиационной техники: существенное повышение температурно-силовых условий работы ГТД, а также значительное улучшение их надежности и экономичности. При этом реализация условий экономичности в конечной мере определяется разработкой и эксплуатацией жаропрочных никелевых сплавов, имеющих при сопоставимом удельном весе существенно более высокий уровень жаропрочности или более низкую стоимость сплавов.

40 На это, в частности, направлены активно ведущиеся за рубежом работы. В частности, фирма General Electric создала на базе известного монокристалльного сплава II поколения Rene 5, содержащего 3% Re, сплав Rene 515, который легирован 1,5% Re и при этом обладающий практически тем же уровнем жаропрочности.

Фирма Cannon Muskegon для замены группы ренийсодержащих монокристалльных никелевых сплавов II-го поколения (имеющих ~ 3% Re) разработала содержащий 1,5% Re сплав CMSX-8, имеющий свойства, аналогичные сплавам CMSX-4, PWA-1484, Rene 5.

Жаропрочные никелевые монокристалльные сплавы II-го поколения имеют длительную 100-часовую прочность до разрушения при 1000°C $\sigma_{100}^{1000^\circ\text{C}}$ на уровне (240-

260) МПа, при этом их удельный вес колеблется от 8,7 до 8,85 г/см³. Сплавы III-го поколения за счет более высокого содержания Re имеют длительную прочность $\sigma_{100}^{1000^{\circ}\text{C}}$ (260-300) МПа, однако их удельный вес заметно увеличился, достигнув значений (8,9-
 5 9,1) г/см³. Указанное обстоятельство является серьезным недостатком, поскольку в этом случае необходимо заметно увеличить толщину дисков и, соответственно, вес газовой турбины.

В связи с этим одной из важнейших задач является разработка сплава с уровнем жаропрочных свойств материалов III-го поколения, но имеющего удельный вес
 10 монокристаллических никелевых сплавов II-го поколения.

В России была проведена работа, направленная на возможную замену широко используемого в промышленности монокристаллического никелевого сплава ЖС-32 ВИ, имеющего длительную прочность $\sigma_{100}^{1000^{\circ}\text{C}} = 240$ МПа при удельном весе 8,84 г/см³
 15 на сплав СЛЖС 32МР (патент РФ № 2700442, опубл. 17.09.2019 г., бюл. № 26), который обладает длительной прочностью, равной 266,5 МПа, при этом его удельный вес равен 8,83 г/см³, а содержание крайне дорогого рения ~ в 2 раза ниже.

Таким образом, указанная задача частично решена, однако актуально остается
 20 создание монокристаллического никелевого сплава с удельным весом порядка 8,82 г/см³, но с более высоким уровнем жаропрочности.

Изготовлен жаропрочный сплав на основе никеля, предназначенный для литья деталей методом направленной кристаллизации преимущественно монокристаллических рабочих и сопловых лопаток (патент РФ № 2318030, опубл. 21.02.2008 г.), имеющий
 25 следующий состав:

углерод - 0,001-0,04,
 хром - 4,0-6,0,
 кобальт - 8,0-10,0,
 вольфрам - 6,5-8,0,
 30 молибден - 0,8-2,2,
 титан - 0,1-1,0,
 алюминий - 5,4-6,2,
 тантал - 4,0-7,0,
 рений - 2,7-3,7,
 35 ниобий - 0,1-1,0,
 бор - 0,001-0,02,
 церий - 0,015-0,05,
 иттрий - 0,001-0,002,
 кислород - 0,0003-0,0001,
 40 азот - 0,0003-0,001,
 никель - остальное.

Сплав технологичен при литье, не склонен к образованию поверхностных дефектов типа «струйной ликвации». Сплав характеризуется следующими показателями жаропрочности: при нагрузке $\sigma=360$ МПа и температуре 975°C его длительность до
 45 разрушения t составляет (59-75) час, а при температуре 1100°C и нагрузке 140 МПа его длительность до разрушения находится в пределах (98-140) час, а при той же температуре 1100°C и нагрузке 100 МПа она составляет (514-680) час. Это соответствует уровню 100-часовой длительной прочности при 1000°C, равной ≈ 267 МПа при удельном весе

8,82 г/см³. При этом содержание рения составляет $\approx 3,5$ мас. %. Сплав обладает более высокой по сравнению со сплавом ЖС32-ВИ жаропрочностью, однако для новой техники требуется работоспособность при гораздо более высоких температурах (1000-1100)°С.

5 Известен также монокристалльный жаропрочный никелевый сплав, разработанный в Университете г. Оксфорд (Великобритания) - патент US 201810066340 A1, опублик. 8.03.2018 г. следующего состава (мас. %):

хром - 1,0-7,0,
 10 кобальт - 4,0-14,0,
 рений - 1,0-2,0,
 вольфрам - 0,5-11,0,
 молибден - 0,0-0,5,
 алюминий - 4,0-6,5,
 15 тантал - 8,0-12,0,
 гафний - 0,0-0,5,
 ниобий - 0,0-0,5,
 титан - 0,0-0,5,
 ванадий - 0,0-0,5,
 кремний - 0,0-0,1,
 20 иттрий - 0,0-0,1,
 лантан - 0,0-0,1,
 церий - 0,0-0,1,
 сера - 0,0-0,003,
 магний - 0,0-0,05,
 25 цирконий - 0,0-0,5,
 бор - 0,0-0,005,
 углерод - 0,0-0,01,
 никель - остальное.

30 Сплав имеет уровень длительной прочности, сопоставимый со сплавом CMSX-4 (Cannon Muskegon, США), его $\sigma_{100}^{1000^\circ\text{C}} \approx (250-260)$ МПа, однако он имеет ряд важных преимуществ:

- его цена значительно ниже, т.к. содержание рения в нем примерно в 2 раза ниже;
- он имеет сравнительно высокую стойкость против окисления;
- 35 - в нем практически полностью отсутствуют охрупчивающие структуру ТПУ-фазы.

Однако его удельный вес весьма высок и равен 8,89 г/см³, что не позволит считать этот сплав решением поставленной задачи.

Кроме того, достигнутый уровень жаропрочности не является достаточным.

40 Известен также монокристалльный жаропрочный никелевый сплав Китая (патент Китая CN № 101525707 A, опублик. 17.04.2009 г.), сплав содержит (мас. %):

хром - 5,5-6,5,
 кобальт - 3,5-4,5,
 вольфрам - 1,5-2,5,
 молибден - 2,5-3,5,
 45 титан - 0,35-0,45,
 алюминий - 5,5-6,5,
 тантал - 5,5-6,5,
 гафний - 0,005-0,15,

ниобий - 0,5-1,5,

рений - 2,5-3,5.

В состав также добавляются микроэлементы, углерод и бор, никель - остальное.

Этот сплав имеет $\sigma_{100}^{1000^{\circ}\text{C}} = 236$ МПа (что соответствует сплаву ЖС-32 ВИ) при

удельном весе $8,87 \text{ г/см}^3$ и не может рассматриваться в качестве перспективного.

Наиболее близким аналогом, взятым за прототип, является сплав СЛЖС-32МР (патент РФ № 2700442, опубл. 17.09.2019 г., бюл. № 26).

Сплав содержит (мас. %):

углерод - 0,002-0,1,

хром - 4,0-8,0,

кобальт - 6,0-12,0,

вольфрам - 3,0-8,0,

молибден - 4,0-8,0,

алюминий - 4,6-6,6,

тантал - 6,5-11,0,

гафний - 0,1-1,0,

рений - 1,0-3,0,

иттрий - 0,001-0,1,

лантан - 0,001-0,1,

церий - 0,001-0,1,

кремний - 0,01-0,2,

марганец - 0,01-0,2,

бор - 0,005-0,03,

никель - остальное.

Особенностью сплава является то, что он, обладая сравнительно высоким уровнем жаропрочности, отличается относительно низкой стоимостью (поскольку содержание рения в нем \approx в 2 раза ниже, чем в сплаве ЖС32-ВИ). Кроме того, он характеризуется высокой устойчивостью против образования охрупчивающих ТПУ-фаз.

Нами предложен литейный жаропрочный никелевый сплав с монокристаллической структурой, содержащий углерод, хром, кобальт, вольфрам, молибден, алюминий, тантал, рений, иттрий, лантан, церий, кремний, марганец, бор, цирконий, магний, ванадий и празеодим при следующем соотношении легирующих компонентов (мас. %):

углерод 0,002-0,1,

хром 3,0-6,0,

кобальт 4,0-7,5,

вольфрам 2,0-4,0,

молибден 2,5-4,0,

алюминий 5,5-7,0,

тантал 7,0-10,0,

ванадий 0,1-0,5,

рений 3,5-5,0,

цирконий 0,01-0,05,

иттрий 0,001-0,1,

лантан 0,001-0,1,

церий 0,001-0,1,

кремний 0,01-0,2,

марганец 0,01-0,2,

бор 0,005-0,03,
 магний 0,01-0,03,
 празеодим 0,01-0,1,
 никель – остальное,

5 при соблюдении следующих условий:

$$44,8 \geq 3,0C_{Mo} + 1,6C_{W} + 2,3C_{Ta} + 1,3C_{Re},$$

где C_i - концентрации (мас. %) соответствующих элементов в сплаве и

$$10 \frac{C_{Al}}{C_{Ta} + 0,57C_{W} + 0,46C_{Mo}} \geq 1,0 \left(\frac{\text{ат \%}}{\text{ат \%}} \right),$$

здесь концентрации (ат. %) соответствующих элементов в γ' -фазе.

Техническим результатом является увеличение содержания обеспечивающего высокую жаропрочность рения до уровня его концентрации в сплаве ЖС32-ВИ при сохранении

15 удельного веса порядка 8,82 г/см³ за счет снижения концентрации других тяжелых, но более слабо влияющих на жаропрочность элементов (в частности, вольфрама, среднее содержание которого снижено на 1,5 мас. %). Укажем, что средняя концентрация имеющего примерно тот же удельный вес рения увеличена примерно на 2 мас. %.

20 С целью обеспечения более высокого уровня жаропрочности заметно снижена суммарная концентрация хрома и кобальта, оказывающих отрицательное влияние на высокотемпературную длительную прочность.

Однако, поскольку снижение концентрации хрома (и кобальта) приводит к ухудшению стойкости против высокотемпературной коррозии, в состав сплава дополнительно введен празеодим, при этом %Ce:%Y:%La:%Pr соотносится, как 1,5:1:1:1, а суммарное содержание их не должно превышать 0,1 мас. %. Осуществленное подобным образом микролегирование оказывает синергетическое воздействие и значительно улучшает сопротивление окислению. Структурные исследования показали, что в этом случае на поверхности сплава вместо рыхлого окисла NiO, имеющего большое количество пор и трещин (что, в свою очередь, способствует свободному проникновению кислорода) образуется защитная пленка с большим количеством оксида хрома (Cr₂O₃), который имеет существенно более плотную структуру и значительно замедляет диффузию кислорода через слой окисла.

35 La и Pr имеют гораздо больший атомный радиус, чем у Ce и Y, поэтому они блокируют катионные вакансии в решетке NiO, снижают их концентрацию и тем самым замедляют диффузию атомов Ni через решетку MO, что, в свою очередь, приводит к увеличению содержания хрома в поверхностных слоях.

40 Кроме того, La и Pr эффективно замедляют диффузию и процессы коагуляции γ' -фазы при работе сплава (образование рафт-структуры и ее укрупнение протекают гораздо медленнее, т.е. сплав в значительно большей степени сохраняет жаропрочные свойства, что особенно важно для рабочих и сопловых лопаток первых ступеней перспективных газотурбинных двигателей).

С целью повышения уровня жаропрочности сплавов также дополнительно введен ванадий.

45 V и La замедляют коагуляцию γ' -фазы при высоких температурах и напряжениях. Следовательно, процессы деградации структуры, контролируемые диффузией, протекают гораздо медленнее, а это, в свою очередь, обеспечивает более высокую работоспособность сплава.

Учитывая, что перспективные сплавы этого класса обладают весьма сложным

легированием, важным является введение дополнительных условий, обеспечивающих высокую стабильность структуры и предотвращение возможного в процессе работы сплава распада γ -матрицы с выделением из нее охрупчивающих ТПУ-фаз, а также возможного распада упрочняющей γ' -фазы с образованием снижающих прочностные свойства пластинчатых η (на базе Ni_3Ti), δ - [на базе $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Ta})$] и других фаз (в предлагаемом сплаве возникает вероятность образования интерметаллидных соединений типа $\text{Ni}_3(\text{Ta}_n\text{W}_m\text{Mo}_e)$).

Как известно, эффективный контроль возможности зарождения охрупчивающих ТПУ-фаз предлагается в методе New Phascomp, а именно:

$$M(\bar{d})_{\gamma} = 0,717C_{\text{Ni}} + 1,9C_{\text{Al}} + 1,142C_{\text{Cr}} + 1,55C_{\text{Mo}} + 1,655C_{\text{W}} + 2,22C_{\text{Ta}} + 0,777C_{\text{Co}} + 2,117C_{\text{Nb}} + 2,27C_{\text{Ti}} + 3,02C_{\text{Hf}} + 1,267C_{\text{Re}} + 1,006C_{\text{Ru}}, \quad (1)$$

где Q - атомные доли соответствующих элементов в γ -матрице сплава.

При этом если величина критерия $M(\bar{d})_{\gamma}$ будет меньше 0,93, то ТПУ-соединение в сплаве образовываться не будет.

Зависимость (1) взята нами в качестве наиболее объективного критерия контроля процесса образования ТПУ-фаз.

Однако наши исследования показали, что критическое значение $M(\bar{d})_{\gamma}$ для сплавов предлагаемого состава должно быть не 0,93, а заметно ниже и (с учетом наличия остаточной после термообработки дендритной ликвиации) составляет величину $\cong 0,9$.

В предлагаемом сплаве отсутствуют титан, ниобий, гафний и рутений. Концентрация мало- и микролегирующих элементов (В, Zr, La, Y и др.) весьма незначительна и их влиянием на величину $M(\bar{d})_{\gamma}$ можно пренебречь.

Наибольшее влияние на этот параметр оказывают Mo, W, Ta и Re.

Осуществив перевод атомных долей в массовую концентрацию элементов в сплаве применительно к их среднему содержанию в предлагаемой области легирования, получаем следующую зависимость, определяющую условие отсутствия распада γ -матрицы и выделения из нее охрупчивающих ТПУ-фаз, а именно:

$$44,8 \geq 3,0C_{\text{Mo}} + 1,6C_{\text{W}} + 2,3C_{\text{Ta}} + 1,3C_{\text{Re}} \quad (2)$$

где C_i - концентрация (мас. %) соответствующих элементов в сплаве.

Предотвращение распада упрочняющей γ' -фазы с выделением из нее нежелательных фаз типа $\text{Ni}_3(\text{Ta}, \text{W}, \text{Mo})$ определяем из условия:

$$\frac{C_{\text{Al}}}{C_{\text{Ta}} + 0,57C_{\text{W}} + 0,46C_{\text{Mo}}} \geq 1 \quad (\text{ат \%} / \text{ат \%}) \quad (3)$$

Здесь C_i - концентрация (ат %) соответствующих элементов в γ' -фазе.

Пример осуществления

Достижение поставленного технического результата достаточно убедительно иллюстрируются результатами, приведенными в Таблице 1 и 2.

Таблица 1

Содержание элементов, мас. %	Известные сплавы		Сплавы по предлагаемому изобретению		
	Патент РФ № 2318030	Патент РФ № 2700442	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Углерод	0,02	0,01	0,01	0,01	0,005
Хром	5	5	5,8	4,0	5,0
Кобальт	9	9	4,0	5,0	5,6
Вольфрам	7,5	5,1	3,5	3,5	3,1
Молибден	1,5	6,0	3,8	2,6	3,2
Алюминий	5,8	6,4	6,5	6,5	6,6
Титан	0,6	-	-	-	-
Тантал	5,5	8,0	8,4	7,8	8,6

Ниобий	0,5	-	-	-	-
Гафний	-	0,2	-	-	-
Рений	3,5	2	4,0	5,0	4,8
Бор	0,01	0,01	0,01	0,007	0,01
Цирконий	-	-	0,02	0,02	0,02
Церий	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Лантан	-	0,03	0,02	0,03	0,03
Иттрий	0,002	0,02	0,02	0,02	0,02
Ванадий	-	-	0,1	0,3	0,5
Магний	-	-	0,02	0,02	0,02
Марганец	-	0,1	0,1	0,15	0,2
Кремний	-	0,1	0,1	0,15	0,2
Празеодим	-	-	0,02	0,03	0,02
Никель	остальное	остальное	остальное	остальное	остальное

Таблица 2

Наименование характеристики	Известные сплавы		Сплавы по предлагаемому изобретению		
	Патент РФ № 2318030	Патент РФ № 2700442	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Длительная прочность, $\sigma_{100}^{1000^{\circ}\text{C}}$ МПа	266	272,4	284	289	292,1
Объемная доля γ' -фазы, %	65	65	65	66	66
Удельный вес d , г/см ³	8,83	8,82	8,8	8,81	8,82
Стойкость против образования ГПУ-фаз, $M(d)_y$	0,890	0,905	0,906	0,88	0,895
Мисфит, %	0,162	0,17	0,21	0,16	0,297
$T_{\text{нр}y}$, °С	1289	1273	1298	1309	1300
$T_{\text{нр}y}$, °С	849	871	855	855	854
Удельная жаропрочность $\sigma_{100}^{1000^{\circ}\text{C}}/d$, МПа / см ³ /г	30,1	30,9	32,3	32,8	33,1

Результаты, приведенные в Таблице 2, показывают, что созданный новый сплав, имея удельный вес не выше, чем у сплавов-аналогов, обладает заметно более высоким уровнем жаропрочности, что является крайне важным для новых образцов перспективной газотурбинной техники.

Если удельная жаропрочность аналогов находится на уровне (30,1-30,9) МПа·см³/г, то предложенный сплав, имея критерий $\sigma_{100}^{1000^{\circ}\text{C}}/d$ на уровне (31,92-33,2), оказывается

существенно более работоспособным.

По сравнению с имеющим такой же удельный вес (8,83 г/см³) перспективным сплавом США CMSX-8, длительная прочность которого $\sigma_{100}^{1000^{\circ}\text{C}}$ равна 259,0 МПа, сплав
5 обеспечивает значительно лучшие эксплуатационные показатели.

(57) Формула изобретения

Литейный жаропрочный никелевый сплав с монокристалльной структурой, содержащий углерод, хром, кобальт, вольфрам, молибден, алюминий, тантал, рений,
10 иттрий, лантан, церий, кремний, марганец, бор, отличающийся тем, что он дополнительно содержит цирконий, магний, ванадий и празеодим при следующем соотношении легирующих компонентов, мас. %:

	углерод	0,002-0,1
	хром	3,0-6,0
15	кобальт	4,0-7,5
	вольфрам	2,0-4,0
	молибден	2,5-4,0
	алюминий	5,5-7,0
	тантал	7,0-10,0
	ванадий	0,1-0,5
20	рений	3,5-5,0
	цирконий	0,01-0,05
	иттрий	0,001-0,1
	лантан	0,001-0,1
	церий	0,001-0,1
	кремний	0,01-0,2
25	марганец	0,01-0,2
	бор	0,005-0,03
	магний	0,01-0,03
	празеодим	0,01-0,1
	никель	остальное

при соблюдении следующих условий:

$$30 \quad 44,8 \geq 3,0C_{\text{Mo}} + 1,6C_{\text{W}} + 2,3C_{\text{Ta}} + 1,3C_{\text{Re}},$$

где C_{Mo} , C_{W} , C_{Ta} , C_{Re} – концентрации соответствующих элементов в сплаве, мас. %

и

$$35 \quad \frac{C_{\text{Al}}}{C_{\text{Ta}} + 0,57C_{\text{W}} + 0,46C_{\text{Mo}}} \geq 1,0 \left(\frac{\text{ат \%}}{\text{ат \%}} \right),$$

где C_{Al} , C_{Ta} , C_{W} , C_{Mo} – концентрации соответствующих элементов в γ' -фазе, ат. %.

40

45