

Научная статья

УДК 620.172

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-111-121

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ СИНТЕЗИРОВАННОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Co–Cr–Ni–W–Ta

М.А. Горбовец¹, С.А. Голынец¹, Д.И. Сухов¹, С.А. Монин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. В настоящее время все более широкое применение в авиационной промышленности находят аддитивные технологии. Главной их особенностью является возможность изготовления деталей сложной внешней и внутренней геометрической формы без увеличения стоимости производства. Для расчета ресурса узлов и надежной эксплуатации новой техники необходимо иметь набор расчетных значений характеристик конструкционной прочности, в том числе характеристик кратковременной и длительной прочности, а также многоциклового усталости (МнЦУ). Представлено исследование характеристик кратковременной и длительной прочности, ползучести и МнЦУ синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta, полученного методом селективного лазерного сплавления.

Ключевые слова: кобальтовый сплав, селективное лазерное сплавление, металлпорошковая композиция, механические свойства, температура испытания, характеристики прочности

Для цитирования: Горбовец М.А., Голынец С.А., Сухов Д.И., Монин С.А. Исследование характеристик прочности синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-111-121.

Scientific article

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF DURABILITY OF THE ALLOY OF Co–Cr–Ni–W–Ta SYSTEM, OBTAINED BY SLM

М.А. Gorbovets¹, S.A. Golynets¹, D.I. Sukhov¹, S.A. Monin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Additive manufacturing is increasingly used in the aviation industry. Its main feature is the manufacture of parts of complex external and internal geometric shapes without increasing the cost of their production. To calculate the resource of nodes and reliable operation of new equipment, it is necessary to have a set of calculated values of characteristics of structural strength, including the characteristics of tensile, creep rupture and high-cycle fatigue (HCF). The study of characteristics of tensile, creep rupture and HCF of the Co–Cr–Ni–W–Ta alloy obtained by the method of selective laser melting (SLM) is presented in this paper.

Keywords: cobalt alloy, selective laser melting, metal powder composition, mechanical properties, testing temperature, strength characteristics

For citation: Gorbovets M.A., Golynets S.A., Sukhov D.I., Monin S.A. Research of Characteristics of Durability of the alloy of Co–Cr–Ni–W–Ta system, obtained by SLM. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-111-121.

Введение

Аддитивные технологии с полным основанием относят к технологиям XXI в., которые занимают одно из важнейших направлений развития авиационных материалов. Они в определяющей степени создают условия перехода промышленности к производственным технологиям нового поколения, которые принципиально меняют технологический уклад и влекут за собой изменение всего производственного цикла.

Аддитивные технологии являются важным фактором в совершенствовании технологического процесса изготовления деталей сложных технических систем [1].

Особый интерес к данным технологиям проявляет авиационно-космическая промышленность – именно здесь более всего востребованы мелкие серии высокотехнологичных деталей ответственного назначения [2].

Одним из методов аддитивного производства, использующих лазеры высокой мощности (как правило, иттербиевые волоконные лазеры) для создания трехмерных физических объектов благодаря сплавлению металлических порошков, является селективное лазерное сплавление (СЛС).

В узлах горячего тракта авиационных двигателей имеется большое количество деталей сложной внешней и внутренней геометрической формы из жаропрочных сплавов, которые выгодно изготавливать методом СЛС [3–9]. Синтезированные жаропрочные сплавы могут превосходить по механическим свойствам аналогичные сплавы, изготавливаемые по традиционным технологиям (литье, деформация). Одна из причин такого превосходства заключается в том, что частицы упрочняющих фаз на образцах, полученных методом СЛС, распределяются более равномерно, чем на образцах, полученных по традиционной технологии, при том что их размер значительно меньше, что в свою очередь приводит к повышению прочностных свойств материала.

Как в России, так и за рубежом основное внимание исследователей уделяется сплавам на основе никеля. Например, одним из широко исследуемых сплавов в мире является никелевый сплав Inconel 718 [10–13]. Синтезированный материал данного сплава имеет свойства, значительно превосходящие свойства этого сплава в литом состоянии. Однако область применения сплава Inconel 718 ограничена деталями, работающими до температуры 650 °С. Это связано с особенностями упрочнения его структуры за счет γ'' -фазы.

В отечественной практике применяют жаропрочные сплавы на основе никеля ЭП648 и ВЖ159 [14, 15]. В работах [16–20] отмечено превосходство механических свойств никелевого сплава ЭП648, полученного методом СЛС, после горячего изостатического прессования и термической обработки, по сравнению с аналогичным материалом, полученным по технологии литья с последующей термической обработкой. Методом СЛС из металлопорошковых композиций (МПК) жаропрочных кобальтовых сплавов изготавливают детали, обладающие высокими характеристиками прочности, жаростойкости и стойкости к коррозии. Такие детали можно использовать вместо применяемых серийных деталей из высокохромистых сплавов ВХ4Л (ЭП648), получаемого по традиционной технологии литья, и ЭП648ПС, получаемого методом СЛС, с рабочей температурой от 600 до 1000 °С.

Сплав ВХ4Л длительное время применяется для изготовления форсунок различного типа и завихрителей, обеспечивающих ламинарный поток продуктов горения в двигателе. В серийном производстве хром и его сплавы используют в качестве покрытий для повышения износостойкости трущихся деталей и узлов, стойкости ударного инструмента, а также изготовления мессбауэровских источников, применяемых в качестве гамма-излучателей в гамма-резонансной спектроскопии [21].

В то время как большая часть работ по исследованию синтезированного материала посвящена сплавам на основе никеля, с самого начала развития металлических аддитивных технологий большой интерес вызывали сплавы на основе кобальта, которые

нашли достаточно ограниченное применение в традиционных технологиях. Причиной такого внимания служит исключительная технологичность применения таких сплавов в методе СЛС [22, 23]. Вероятность образования трещин при кристаллизации вследствие фазовых напряжений в крупногабаритных отливках из кобальт-хромовых сплавов существенно меньше, чем в отливках из высоколегированных литейных никелевых сплавов.

Преимуществами синтезированного кобальтового сплава, изготовленного по технологии СЛС, перед материалами аналогичного назначения, полученными по традиционным технологиям, являются:

- возможность изготовления сложнопрофильных деталей без использования оборудования для механической обработки;
- снижение времени изготовления деталей по сравнению с традиционными технологиями;
- значение коэффициента использования материала до 0,95;
- уменьшение количества литейных дефектов в готовых деталях;
- возможность создания комплексных, интегрированных деталей за один технологический цикл изготовления;
- автоматизация процесса изготовления деталей.

В данной работе проведены исследования характеристик прочности синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta на основе кобальта, полученного методом СЛС.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [24].

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран синтезированный жаропрочный сплав на основе кобальта системы Co–Cr–Ni–W–Ta с рабочей температурой до 1000 °С. Этот сплав разработан специально для применения в аддитивных технологиях. Основу сплава составляет кобальт; углерод содержится в количестве до 0,25 % (по массе), его вводят в сплав для образования упрочняющей фазы – карбидов. Дополнительно в состав сплава введены карбидообразующие элементы – вольфрам, тантал и титан.

Для получения синтезированного сплава изготовлена партия МПК сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta с массовой долей целевой фракции размером 10–63 мкм не менее 85 % на установке Hermiga 10/100 VI, предназначенной для вакуумной индукционной плавки и газового распыления порошков металлов.

Изготовление образцов проводили в три этапа:

- получение заготовок образцов перпендикулярно направлению выращивания (ориентация X – Y), вдоль направления выращивания (ориентация Z), с учетом припуска на последующую механическую обработку, на установке СЛС Concept Laser M2 Cusing;
- проведение газостатической обработки заготовок по следующему режиму: температура $T_{\text{Solv}} - 90$ °С, давление 150 МПа, время выдержки 2 ч [22];
- изготовление образцов для механических испытаний.

Микроструктура сплава на основе кобальта после проведения газостатической обработки приведена на рис. 1. Структура представлена зернами твердого раствора (с гранецентрированной кубической решеткой), а также эвтектическим карбидами (размером до 0,8 мкм), расположенными в теле зерен, и более крупными карбидами (размером до 2,5 мкм) на основе тугоплавких элементов, локализованных в основном по границам зерен.

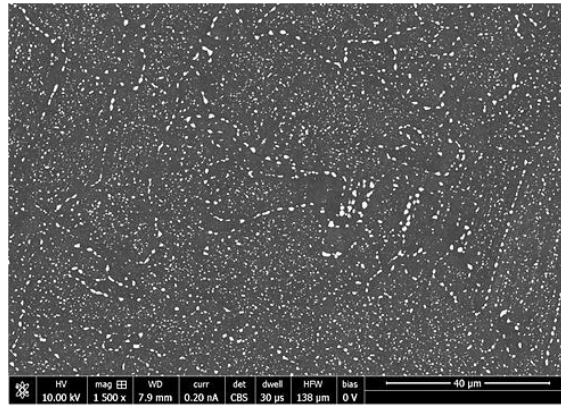


Рис. 1. Микроструктура синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta

Испытания на растяжение, длительную прочность и ползучесть исследуемого сплава проводили на гладких цилиндрических образцах диаметром 5 мм и расчетной длиной 25 мм на испытательных машинах Каппа 50 DS и Каппа 50 LA, оснащенных экстензометрами продольной деформации.

Методика проведения испытаний соответствовала ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 9651–84 для испытаний на растяжение, а также ГОСТ 10145–81 и ГОСТ 3248–81 для испытаний на длительную прочность и ползучесть.

Испытания образцов на многоцикловую усталость (МнЦУ) на базе $2 \cdot 10^7$ циклов проводили на гладких образцах на испытательных машинах МВИ-611М в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502–79.

Результаты и обсуждение

Кратковременная прочность

Проведены испытания на растяжение при температурах 20, 600, 800, 1000, 1100 и 1150 °С. На каждом температурном уровне и направлении выращивания испытывали по пять образцов.

В табл. 1 представлены средние значения модуля упругости (E), условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$), предела прочности при растяжении (σ_b), относительного удлинения (δ) и относительного сужения (ψ) синтезированного сплава на основе кобальта.

Таблица 1

Механические свойства синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta

| Температура испытания, °С | Направление выращивания | E , ГПа | $\sigma_{0,2}$ | σ_b | δ | ψ |
|---------------------------|-------------------------|-----------|----------------|------------|----------|--------|
| | | | МПа | | % | |
| 20 | X–Y | 252 | 885 | 1353 | 12,8 | 14,5 |
| | Z | 244 | 810 | 1210 | 11 | 12,5 |
| 600 | X–Y | 201 | 610 | 1260 | 20 | 22,5 |
| | Z | 166 | 550 | 1040 | 11 | 13 |
| 800 | X–Y | 156 | 470 | 540 | 51 | 61 |
| | Z | 127 | 445 | 540 | 41 | 46 |
| 1000 | X–Y | 75 | 180 | 205 | 72 | 77 |
| | Z | 93 | 190 | 197 | 71 | 85 |
| 1100 | X–Y | 55 | 110 | 125 | 49 | 48 |
| | Z | 51 | 115 | 122 | 36 | 39 |
| 1150 | X–Y | 39 | 91 | 95 | 39 | 37 |
| | Z | 38 | 83 | 92 | 33 | 36 |

Длительная прочность и ползучесть

Проведены испытания на длительную прочность и ползучесть при температурах 600, 800 и 1000 °С с долговечностями до 500 ч. На каждый вид испытаний при каждом температурном уровне и направлении выращивания испытывали по 12 образцов – по четыре образца на каждую базу испытаний.

Полученные результаты испытаний на длительную прочность и ползучесть подвергали статистической обработке с использованием уравнений температурно-силовой зависимости [25]:

$$\tau_p = \xi T^m \sigma^{-n} \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right), \quad (1)$$

$$\tau_\varepsilon = \zeta T^p \sigma^{-\alpha} \exp\left(\frac{Q_0 - g\sigma}{RT}\right), \quad (2)$$

где τ_p и τ_ε – время до разрушения и время накопления деформации ползучести ε соответственно; T – температура, К; σ – напряжение, МПа; R – универсальная газовая постоянная; ξ , m , n , U_0 , γ – коэффициенты, определяемые по результатам испытаний на длительную прочность; ζ , p , α , Q_0 , g – коэффициенты, определяемые по результатам испытаний на ползучесть.

Значения коэффициентов уравнений температурно-силовой зависимости (1) и (2) определяются обработкой выборки результатов испытаний образцов методом наименьших квадратов.

Расчет по уравнениям (1) и (2) позволил определить пределы длительной прочности и ползучести синтезированного сплава при температурах 600, 800 и 1000 °С с долговечностями до 500 ч (табл. 2 и 3).

Таблица 2

**Средние значения пределов длительной прочности
синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta**

| Температура испытания, °С | Направление выращивания | σ_{10} | σ_{100} | σ_{500} |
|------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------------|
| | | МПа | | |
| 600 | X–Y | 1060 | 860 | 740 |
| | Z | 980 | 800 | 710 |
| 800 | X–Y | 295 | 210 | 165 |
| | Z | 290 | 225 | 185 |
| 1000 | X–Y | 88 | 50 | 30 |
| | Z | 100 | 68 | 49 |

Таблица 3

**Средние значения пределов ползучести
синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta**

| Температура испытания, °С | Направление выращивания | $\sigma_{0,2/10}$ | $\sigma_{0,2/100}$ | $\sigma_{0,2/500}$ |
|------------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| | | МПа | | |
| 600 | X–Y | 520 | 290 | 180 |
| | Z | 470 | 290 | 185 |
| 800 | X–Y | 125 | 80 | 55 |
| | Z | 140 | 85 | 55 |
| 1000 | X–Y | 27 | 12 | 5 |
| | Z | 50 | 29 | 19 |

Многоцикловая усталость

Проведены испытания на МнЦУ при температурах 20 и 800 °С с частотой нагружения 50 Гц (изгиб с вращением) по синусоидальному циклу ($R = -1$). На каждом температурном уровне и направлении выращивания испытывали по 20 образцов.

Проведен линейный регрессионный анализ. Принято предположение о том, что зависимость числа циклов до разрушения от заданного напряжения имеет вид [26, 27]

$$N = a \cdot \sigma^b$$

и после логарифмирования обеих частей принимает вид

$$\lg N = \lg a + b \cdot \lg \sigma,$$

где N – число циклов до разрушения; σ – заданное максимальное напряжение цикла; a и b – коэффициенты, постоянные в рамках одной серии испытаний.

Для определения коэффициентов a и b и построения линий средних значений предела выносливости применены метод наименьших квадратов и линейный регрессионный анализ. В качестве зависимой нормально распределенной величины принят логарифм количества циклов до разрушения $\lg N$, а в качестве независимой величины – логарифм максимального напряжения $\lg \sigma$. При выполнении линейного регрессионного анализа учитывали только результаты испытаний образцов, доведенных до разрушения или образования видимой трещины.

На рис. 2 представлены кривые МнЦУ, построенные по результатам испытаний образцов, доведенных до разрушения. Полыми маркерами обозначены неразрушенные образцы. В табл. 4 представлены пределы выносливости, полученные по этим линиям регрессии.

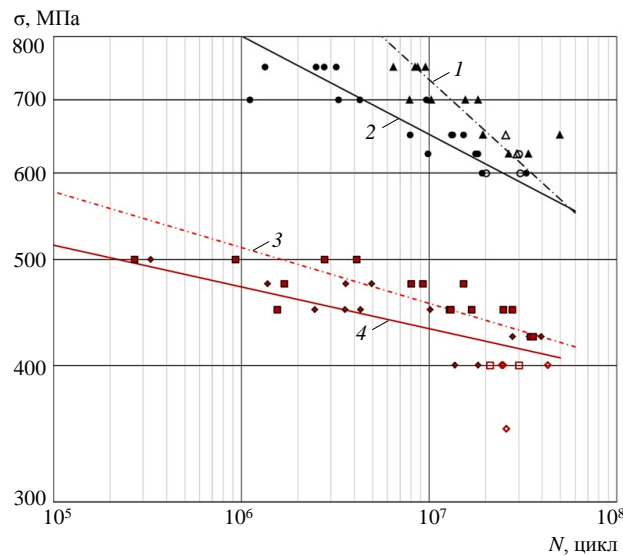


Рис. 2. Кривые многоцикловой усталости синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta при температурах испытания 20 (1, 2) и 800 °С (3, 4) при направлениях выращивания X–Y (1, 3) и Z (2, 4)

Таблица 4

Средние значения пределов выносливости синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta на базе $2 \cdot 10^7$ циклов с коэффициентом асимметрии $R_\sigma = -1$

| Температура испытания, °С | Направление выращивания | Предел выносливости, МПа |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 20 | X–Y | 650 |
| | Z | 600 |
| 800 | X–Y | 425 |
| | Z | 400 |

Как видно из данных, представленных в табл. 1–4, для исследуемого материала наблюдается зависимость характеристик кратковременной и длительной прочности, ползучести и МнЦУ от направления выращивания. Так, при температурах испытания 20 и 600 °С более высокие значения реализуются в направлении X–Y, при температуре 800 °С направление выращивания не оказывает существенного влияния на прочностные характеристики. При температуре 1000 °С более высоких значений характеристик длительной прочности и ползучести достигают в направлении Z.

Сравнение характеристик прочности синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta со сплавами-аналогами, полученными по технологии СЛС и традиционной технологии

Сравнение характеристик прочности исследуемого сплава со сплавами ЭП648ПС, полученным по технологии СЛС, и ВХ4Л (ЭП648), полученным по традиционной технологии литья, показано на рис. 3–5. Для удобства представленные данные в направлениях X–Y и Z объединены в одну выборку.

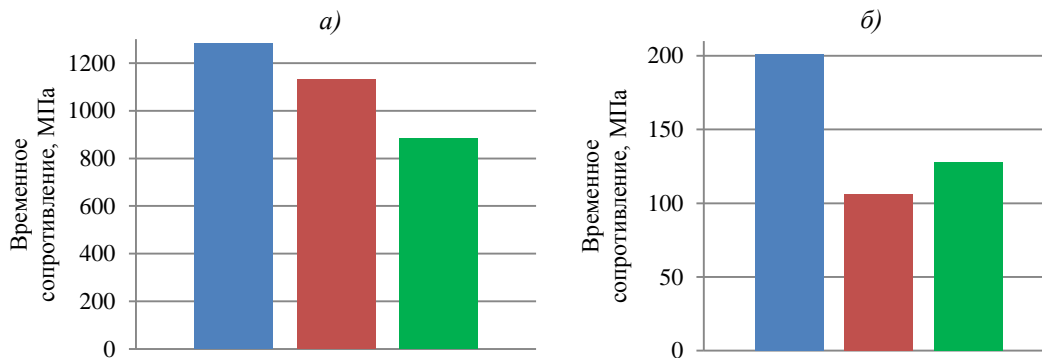


Рис. 3. Пределы прочности при растяжении образцов синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta (■), а также сплавов ЭП648ПС (■) и ВХ4Л (ЭП648) (■) при температурах испытания 20 (a) и 1000 °C (б)

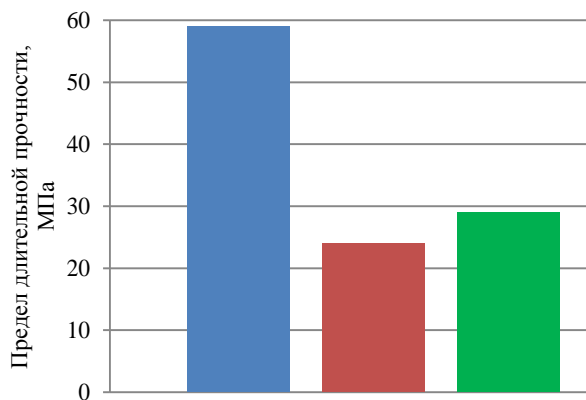


Рис. 4. Пределы длительной прочности образцов синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta (■), а также сплавов ЭП648ПС (■) и ВХ4Л (ЭП648) (■) при температуре испытания 1000 °C на базе 100 ч

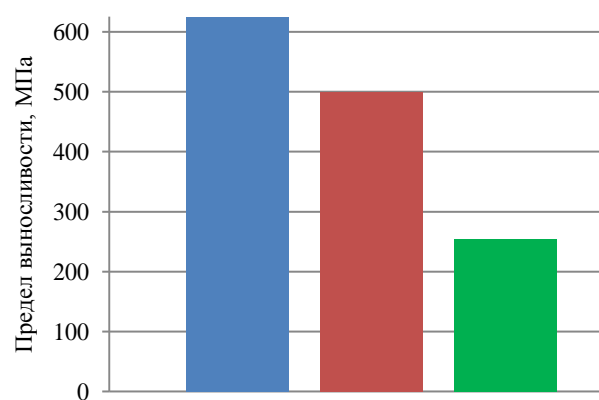


Рис. 5. Пределы выносливости образцов синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta (■), а также сплавов ЭП648ПС (■) и ВХ4Л (ЭП648) (■) при температуре испытания 20 °C на базе $2 \cdot 10^7$ циклов с коэффициентом асимметрии $R_\sigma = -1$

По характеристикам прочности исследуемый синтезированный сплав системы Co–Cr–Ni–W–Ta, по сравнению со сплавами ЭП648ПС, полученным по технологии СЛС, и ВХ4Л (ЭП648), полученным по традиционной технологии литья, имеет следующие преимущества:

- по пределу прочности при растяжении – более 13,5 и 57 % при температурах 20 и 1000 °С соответственно;
- по пределу длительной прочности на базе 100 ч – более 100 % при температуре 1000 °С;
- по пределу выносливости на базе $2 \cdot 10^7$ цикла – более 25 % при температуре 20 °С и $R_G = -1$.

Заключения

Определены значения характеристик кратковременной и длительной прочности, ползучести и МнЦУ при комнатной и повышенных температурах синтезированного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta.

Проведен сравнительный анализ полученных значений характеристик прочности синтезированного сплава со сплавами ЭП648ПС, полученным по технологии СЛС, и ВХ4Л (ЭП648), полученным по традиционной технологии литья. Установлено, что по характеристикам кратковременной прочности и длительной прочности, а также по МнЦУ исследуемый сплав превосходит сплавы ЭП648ПС и ВХ4Л (ЭП648).

Для сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta наблюдается зависимость характеристик кратковременной и длительной прочности, ползучести и МнЦУ от направления выращивания. При температурах испытания 20 и 600 °С более высокие значения реализуются в направлении X–Y, при температуре 800 °С направление выращивания не оказывает существенного влияния на прочностные характеристики. При температуре 1000 °С более высоких значений характеристик длительной прочности и ползучести достигают в направлении Z.

Синтезированный кобальтовый сплав системы Co–Cr–Ni–W–Ta имеет высокий уровень характеристик прочности при статическом и циклическом нагружении при температурах испытаний до 1000 °С.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // Интеллект и технологии. 2015. № 2 (11). С. 52–55.
2. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // Металлы Евразии. 2017. № 1. С. 2–6.
3. Граф Б., Гок С.Э., Гуменюк А.В., Ретмайер М. Комбинированные лазерные аддитивные технологии производства лопаток турбин сложной геометрической формы // Глобальная ядерная безопасность. 2016. № 3 (20). С. 34–42.
4. Быценко О.А., Чабина Е.Б., Филонова Е.В., Рогалев А.М. Взаимосвязь дефектов структуры жаропрочного никелевого сплава, полученного методом селективного лазерного сплавления, стратегии и параметров сканирования // Наука и образование. 2016. № 3. С. 121–132.
5. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Рогалев А.М., Князев А.Е. Исследование химического состава, структуры и механических свойств сплава ЭП648 на различных этапах аддитивного производства // Материаловедение. 2018. № 12. С. 17–22.
6. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. 2014. № 31. С. 43–47.
7. Di W., Yongqiang Ya., Xubin S., Yonghua Ch. Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. Vol. 58. Is. 9. P. 1189–1199.

8. Strano G., Hao L., Everson R.M., Evans K.E. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. Vol. 213. No. 4. P. 589–597.
9. Смуров И.Ю., Мовчан И.А., Ядройцев И.А. и др. Аддитивное производство с помощью лазера // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2011. Т. 2. № 4. С. 144–146.
10. Deng D., Peng R.L., Brodin H., Moverare J. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by selective laser melting: sample orientation dependence and effects of post heat treatments // *Materials Science & Engineering A*. 2018. Vol. 713. P. 294–306. DOI: 10.1016/j.msea.2017.12.043.
11. Zhou L., Mehta A., McWilliams B. et al. Microstructure, precipitates and mechanical properties of powder bed fused Inconel 718 before and after heat treatment // *Journal of Materials Science and Technology*. 2019. Vol. 35. Is. 6. P. 1153–1164. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.12.006.
12. Tucho M., Cullivier P., Sjolyst-Kverneland A., Hansen V. Microstructure and hardness studies of Inconel 718 manufactured by selective laser melting before and after solution heat treatment // *Materials Science & Engineering A*. 2017. Vol. 689. P. 220–232. DOI: 10.1016/j.msea.2017.02.062.
13. Kuo Y.-L., Nagahari T., Kakehi K. The Effect of Post-Processes on the Microstructure and Creep Properties of Alloy718 Built Up by Selective Laser Melting // *Materials (Basel)*. 2018. Vol. 11 (6). P. 183–192. DOI: 10.3390/ma11060996.
14. Сухов Д.И., Неруш С.В., Ефимочкин И.Ю., Карачевцев Ф.Н., Богачев И.А. Получение металломатричных композитов на основе сплава ВЖ159 методом селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.11.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-62-72.
15. Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Карачевцев Ф.Н., Мазалов И.С. Влияние горячего изостатического прессования и термической обработки на свойства сплава ЭП648, синтезированного методом селективного лазерного сплавления // *Технология машиностроения*. 2015. № 9. С. 11–16.
16. Евгенов А.Г., Шуртаков С.В., Прагер С.М., Малинин Р.Ю. К вопросу о разработке универсальной расчетной методики оценки деградации оборотных металлических порошковых материалов в зависимости от цикличности использования в процессе селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11.
17. Евгенов А.Г., Горбовец М.А., Прагер С.М. Структура и механические свойства жаропрочных сплавов ВЖ159 и ЭП648, полученных методом селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № S1 (43). С. 8–15. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15.
18. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Оспенникова О.Г., Семенов Б.И., Семенов А.Б., Королев В.А. Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ в технологиях селективного лазерного сплавления, лазерной газопорошковой наплавки и высокоточного литья полимеров, наполненных металлическими порошками // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2016. № 9 (678). С. 62–80.
19. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Мазалов И.С., Шуртаков С.В., Зайцев Д.В., Прагер С.М. Структура и свойства синтезированных методом селективного лазерного сплавления сплавов ЭП648 и ВЖ159 после имитационных отжигов // *Материаловедение*. 2020. № 6. С. 3–10.
20. Горбовец М.А., Беляев М.С., Рыжков П.В. Соппротивление усталости жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом СЛС // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-50-55.
21. Подъячев В.Н., Демонис И.М., Баранова О.А. Лаборатория тугоплавких сплавов ВИАМ и ее первый руководитель А.С. Строев. К 55-летию со дня организации // *История науки и техники*. 2013. № 4. С. 19–25.
22. Казанцева Н.В., Ежов И.В., Давыдов Д.И., Меркушев А.Г. Анализ структуры и механических свойств сплава Co–Cr–Mo, полученного методом 3D-печати // *Физика металлов и материаловедение*. 2019. Т. 120. № 12. С. 1271–1278.
23. Мазалов И.С., Мазалов П.Б., Сухов Д.И., Сульянова Е.А. Влияние параметров горячего изостатического прессования на структуру и свойства сплавов на основе кобальта, получаемых методом селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.11.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-3-14.

24. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
25. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. *Жаропрочность никелевых сплавов*. М.: Машиностроение, 1998. 463 с.
26. Степнов М.Н. *Статистические методы обработки результатов механических испытаний*. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.
27. Школьник Л.М. *Методика усталостных испытаний: справочник*. М.: Металлургия, 1978. 304 с.

References

1. Kablov E.N. Additive technologies - the dominant of the national technological initiative. *Intellekt i tekhnologii*, 2015, no. 2 (11), pp. 52–55.
2. Kablov E.N. Present and future of additive technologies. *Metally Evrazii*, 2017, no. 1, pp. 2–6.
3. Graf B., Gook S.E., Gumenyuk A.V., Retmayer M. Combined laser additive technologies for the production of turbine blades of complex geometric shape. *Globalnaya yadernaya bezopasnost*, 2016, no. 3 (20), pp. 34–42.
4. Bytsenko O.A., Chabina E.B., Filonova E.V., Rogalev A.M. Interrelation of structural defects in heat-resistant nickel alloy obtained by selective laser alloying, strategy and scanning parameters. *Nauka i obrazovanie*, 2016, no. 3, pp. 121–132.
5. Min P.G., Vadeev V.E., Rogalev A.M., Knyazev A.E. Study of the chemical composition, structure and mechanical properties of the EP648 alloy at various stages of additive manufacturing. *Materialovedenie*, 2018, no. 12, pp. 17–22.
6. Kablov E.N. VIAM materials and technologies for Aviadvigatel. *Permskiye aviatsionnye dvigateli*, 2014, no. 31, pp. 43–47.
7. Di W., Yongqiang Ya., Xubin S., Yonghua Ch. Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 58, is. 9, pp. 1189–1199.
8. Strano G., Hao L., Everson R.M., Evans K.E. Surface roughness analysis, modeling and prediction in selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, no. 4, pp. 589–597.
9. Smurov I.Yu., Movchan I.A., Yadroitsev I.A. et al. Additive manufacturing using a laser. *Vestnik MGTU «Stankin»*, 2011, vol. 2, no. 4, pp. 144–146.
10. Deng D., Peng R.L., Brodin H., Moverare J. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by selective laser melting: sample orientation dependence and effects of post heat treatments. *Materials Science & Engineering A*, 2018, vol. 713, pp. 294–306. DOI: 10.1016/j.msea.2017.12.043.
11. Zhou L., Mehta A., McWilliams B. et al. Microstructure, precipitations and mechanical properties of powder bed fused Inconel 718 before and after heat treatment. *Journal of Materials Science and Technology*, 2019, vol. 35, is. 6, pp. 1153–1164. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.12.006.
12. Tucho M., Cullivier P., Sjolyst-Kverneland A., Hansen V. Microstructure and hardness studies of Inconel 718 manufactured by selective laser melting before and after solution heat treatment. *Materials Science & Engineering A*, 2017, vol. 689, pp. 220–232. DOI: 10.1016/j.msea.2017.02.062.
13. Kuo Y.-L., Nagahari T., Takehi K. The Effect of Post-Processes on the Microstructure and Creep Properties of Alloy718 Built Up by Selective Laser Melting. *Materials (Basel)*, 2018, vol. 11(6), pp. 183–192. DOI: 10.3390/ma11060996.
14. Sukhov D.I., Nerush S.V., Efimochkin I.Yu., Karachevchev F.N., Bogachev I.A. Production of MMC based on VZh159 alloy by selective laser melting. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 2, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-62-72.
15. Evgenov A.G., Rogalev A.M., Karachevtsev F.N., Mazalov I.S. Influence of hot isostatic pressing and heat treatment on the properties of the EP648 alloy synthesized by the method of selective laser alloying. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2015, no. 9, pp. 11–16.

16. Evgenov A.G., Shurtakov S.V., Prager S.M., Malinin R.Yu. On the development of a universal calculation method for assessing the degradation of recycled metal powder materials, depending on the cyclicity of use in the selective laser melting process. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11.
17. Evgenov A.G., Gorbovec M.A., Prager S.M. Structure and mechanical properties of heat resistant alloys VZh159 and EP648, prepared by selective laser fusing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. S1, pp. 8–15. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15.
18. Kablov E.N., Evgenov A.G., Ospennikova O.G., Semenov B.I., Semenov A.B., Korolev V.A. Metal-powder compositions of heat-resistant alloy EP648 produced by FGUP "VIAM" SSC of the RF in technologies of selective laser alloying, laser gas-powder surfacing and high-precision casting of polymers filled with metal powders. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2016, no. 9 (678), pp. 62–80.
19. Kablov E.N., Evgenov A.G., Mazalov I.S., Shurtakov S.V., Zaitsev D.V., Prager S.M. Structure and properties of EP648 and VZh159 alloys synthesized by selective laser melting after simulation annealing. *Materialovedenie*, 2020, no. 6, pp. 3–10.
20. Gorbovets M.A., Belyayev M.S., Ryzhkov P.V. Fatigue strength of heat-resistant nickel alloys produced by selective laser melting. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-50-55.
21. Podyachev V.N., Demonis I.M., Baranova O.A. Laboratory of Refractory Alloys of VIAM and its first head A.S. Stroev. To the 55th anniversary of the organization. *Istoriya nauki i tekhniki*, 2013, no. 4, pp. 19–25.
22. Kazantseva N.V., Ezhov I.V., Davydov D.I., Merkushev A.G. Analysis of the structure and mechanical properties of the Co–Cr–Mo alloy obtained by 3D printing. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2019, vol. 120, no. 12, pp. 1271–1278.
23. Mazalov I.S., Mazalov P.B., Suhov D.I., Sulyanova E.A. Influence of hot isostatic pressing parameters on structure and properties of cobalt-based alloys obtained by selective laser melting. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 2, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-3-14.
24. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
25. Kablov E.N., Golubovsky E.R. *Heat resistance of nickel alloys*. Moscow: Mashinostroeniye, 1998, 463 p.
26. Stepnov M.N. *Statistical methods for processing the results of mechanical tests*. Moscow: Mashinostroeniye, 1985, 232 p.
27. Shkolnik L.M. *Fatigue Test Methodology: handbook*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 304 p.

Информация об авторах

Горбовец Михаил Александрович, заместитель начальника Испытательного центра, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Гольнец Сергей Александрович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сухов Дмитрий Игоревич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Монин Сергей Алексеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Mikhail A. Gorbovets, Deputy Head of Testing Center, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey A. Golynets, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry I. Sukhov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey A. Monin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 29.11.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.12.2021.

The article was submitted 29.11.2021; approved and accepted for publication after reviewing 02.12.2021.