

А.А. Киршина<sup>1</sup>, А.З. Багерман<sup>1</sup>, А.Ю. Киршин<sup>1</sup>, М.Л. Князьков<sup>2</sup>, А.А. Левихин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ОАО «Специальное конструкторское бюро котлостроения (СКБК)», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК (ОКИСЛЕНИЕ, КОРРОЗИЯ) ПОРОШКОВЫХ И ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ

**Объект и цель научной работы.** Объектом исследования являются образцы, изготовленные из порошковых материалов с использованием аддитивных технологий. Целью исследований стало изучение влияния высокотемпературного окисления и солевой коррозии на скорость разрушения этих материалов.

**Материалы и методы.** В статье рассматриваются изменения скорости реакции с внешней средой при окислении и солевой коррозии четырех порошковых материалов и девяти литейных сплавов. Оценка выполняется путем сравнения этих характеристик для порошковых и литейных сплавов.

**Основные результаты.** Скорости окисления и солевой коррозии в интервале температур от 400 до 900 °С для рассмотренных порошковых и литейных сплавов практически совпали.

**Заключение.** Полученные результаты показывают возможность замены литейных материалов на порошковые при эксплуатации в морской атмосфере.

**Ключевые слова:** порошковые сплавы, аддитивные технологии, солевая коррозия, окисление, газотурбинный двигатель.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Киршина А.А., Багерман А.З., Киршин А.Ю., Князьков М.Л., Левихин А.А. Сравнительная оценка эксплуатационных характеристик (окисление, коррозия) порошковых и литейных сплавов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 2(384): 81–86.

УДК 669.018

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-81-86

A. Kirshina<sup>1</sup>, A. Bagerman<sup>1</sup>, A. Kirshin<sup>1</sup>, M. Knyazkov<sup>2</sup>, A. Levikhin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> JSC Special Boiler Design Bureau, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Baltic State Technical University (Voenmekh) named after D. Ustinov, St. Petersburg, Russia

## COMPARATIVE ASSESSMENT OF PERFORMANCE PARAMETERS (OXIDATION, CORROSION) OF POWDER AND CAST ALLOYS

**Object and purpose of research.** This paper studies the samples made of powder materials using additive technologies. The purpose of this work was to study the effect of high-temperature oxidation and salt corrosion upon failure rate of this material.

**Materials and methods.** The paper investigates the changes in the rate of oxidation and salt corrosion reaction with the environment for four powder materials and nine cast alloys. The assessment is performed by comparison of these parameters for powder and cast alloys.

**Main results.** Oxidation and salt corrosion rates at the temperatures of 400–900°C for investigated powder and cast alloys practically coincided.

**Conclusion.** The study has shown that cast materials operating in marine atmosphere can be substituted by powder ones.

**Key words:** powder alloys, additive technologies, salt corrosion, oxidation, gas turbine.



Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Kirshina A., Bagerman A., Kirshin A., Knyazkov M., Levikhin A. Comparative assessment of performance parameters (oxidation, corrosion) of powder and cast alloys. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 2(384): 81–86 (in Russian).

UDC 669.018

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-81-86

Существуют различные технологии изготовления деталей двигателей. Наряду с традиционными, применяются аддитивные технологии, особенность которых заключается в послойном добавлении материала при формировании изделий. На сегодняшний день выполнено множество исследований по способам изготовления и характеристик изделий, изготовленных аддитивными методами. Многолетним накопленным знаниям по физическим, механическим свойствам литейных сплавов можно найти в технической литературе, однако информация о свойствах изделий из порошковых сплавов только начинает накапливаться, например [1].

Основной задачей являются ответы на вопросы: «Можно ли порошковые сплавы ставить в один ряд с литейными сплавами, отличаются ли они по своим физическим и механическим свойствам? Как поведут себя изделия из порошковых сплавов в эксплуатационных условиях коррозионной среды, в условиях работы морских двигателей?».

Существующие исследования направлены на оценку физико-механических свойств изделий из порошковых материалов на воздухе. Данное исследование рассматривает влияние на характеристики условий работы в морской атмосфере, возможность применения изделий, изготовленных при помощи аддитивного производства в условиях высокотемпературной коррозии. Критерием оценки служит сравнение их с литейными сплавами, которые хорошо зарекомендовали себя в двигателестроении.

Настоящее комплексное исследование коррозионных характеристик изделий из порошковых материалов, произведенных с помощью аддитивных тех-

нологий, выполнено в России впервые (по сведениям авторов). Целью данной работы является проведение сравнительного анализа влияния испытаний (высокотемпературные коррозия и окисление) на жаростойкость и коррозионную стойкость (изменение массы) порошковых и литейных сплавов.

Применение литейных сплавов ограничивается технологией производства изделий. Преимущество порошковых материалов в tandem с аддитивными технологиями заключается в исключительной возможности изготавливать изделия сложной формы – такие, какие традиционными методами изготавливать дорого, трудно, а иногда и невозможно.

Объектами исследования являются образцы, изготовленные из порошковых сплавов на основе железа (ПР-07Х18Н12М2) и на основе никеля и кобальта (ПР-08ХН53БМТЮ) производителя АО «Полема». Марки сплавов и стандарты указанных материалов представлены в табл. 1 [2].

Сплав ПР-07Х18Н12М2 применяется для изготовления специализированного промышленного оборудования в химической, нефтехимической, горнодобывающих отраслях, в строительной промышленности и теплообменниках. Сплав ПР-08ХН53БМТЮ широко применяется в атомной промышленности, авиадвигателестроении (в двигателях, турбинах, реакторах).

Химические составы порошков сплавов ПР-07Х18Н12М2 и ПР-08ХН53БМТЮ представлены в табл. 2 и 3 в соответствии с сертификатами на поставку.

В процессе испытаний наряду с анализом исходного сырья (порошка) был выполнен анализ химического состава образцов, полученных тех-

**Таблица 1.** Марки сплавов и их стандарты

**Table 1.** Brands of alloys and their standards

Производимая марка	Марка сплава (EU)	Основа	Стандарты					
			UNS	ASTM	ISO	AMS	DIN	Аналог
ПР-07Х18Н12М2	LPW 316 (316L)	Fe	S31673	F138, F745	5832-1	–	1.4404 1.4401	–
ПР-08ХН53БМТЮ	LPW 718	Ni и Co	7718	B537, B670	–	5832, 5596	2.46668	IN718

**Таблица 2.** Химический состав порошка сплава ПР-07Х18Н12М2, %

**Table 2.** Chemistry of powder alloy ПР-07Х18Н12М2, %

	Fe	Cr	Mo	Ni	Si	Mn	P	C	S
Порошок	Основа	17,5	2,18	11,0	0,046	1,2	0,03	0,041	0,006

**Таблица 3.** Химический состав порошка сплава ПР-08ХН53БМТЮ, %

**Table 3.** Chemistry of powder alloy ПР-08ХН53БМТЮ, %

	Fe	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Mn	Co	Si	S	P	Cu	B	O <sub>2</sub>
Порошок	Ост.	53,1	18,0	5,05	3,15	0,75	0,26	0,19	0,09	0,34	0,007	0,02	0,15	0,09	0,053

нологией послойного лазерного сплавления (далее SLM). Полученный состав отличался от исходного.

Анализ изменений состава путем парного сравнения соотношений элементов в составе сплава и в исходном порошке показал уменьшение доли отдельных составляющих. Так, например, для сплава ПР-07Х18Н12М2 при относительном СКО (среднеквадратичном отклонении) измерений около 0,1% уменьшение железа и хрома составило 0,5% и 0,2% соответственно. Целесообразно решить в дополнительном исследовании вопрос «выгорания» химических элементов при производстве аддитивными методами.

С целью исключения влияния формы конструкции, направления печати, полноты заполнения (процентное заполнение материалом рабочего объема конструкции) всем образцам была придана цилиндрическая форма. Печать изделий из каждого сплава проводилась на одном режиме. По данным [1], температурная зависимость предела прочности образцов сплава Inconel 718 для SLM технологии, представленная на рис. 1, достаточно характерна для порошковых материалов.

Испытания образцов (экспозиция) из сплава ПР-07Х18Н12М2 проводились при температуре 400 °С, 600 °С. Образцы из сплава ПР-08ХН53БМТЮ испытывались при температуре 800 °С. Перед проведением испытаний образцы были очищены, была измерена их масса. После испытаний образцы также проходили процесс очищения и измерялись.

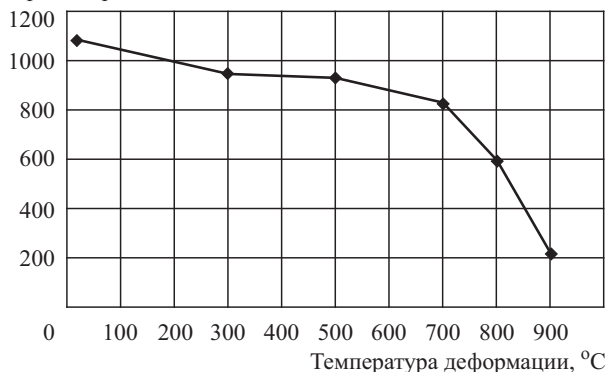
На рис. 2 показаны образцы порошковых «изделий». Рис. 2а, б – фотографии порошка и изделия из порошкового сплава материалов ПР-07Х18Н12М2 после испытаний. Внешний вид изде-

лий из материала ПР-08ХН53БМТЮ представлен на рис. 2в, образцы после испытания – на рис. 2г.

Перед экспозицией на образцы из порошкового сплава ПР-07Х18Н12М2 наносился солевой раствор из соли NaCl. Для материала ПР-08ХН53БМТЮ солевая пленка формировалась из раствора NaCl и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в пропорции 1:1. Это соотношение было получено из анализа примесей газа в проточной части газотурбинного двигателя во время испытаний в процессе их эксплуатации [3].

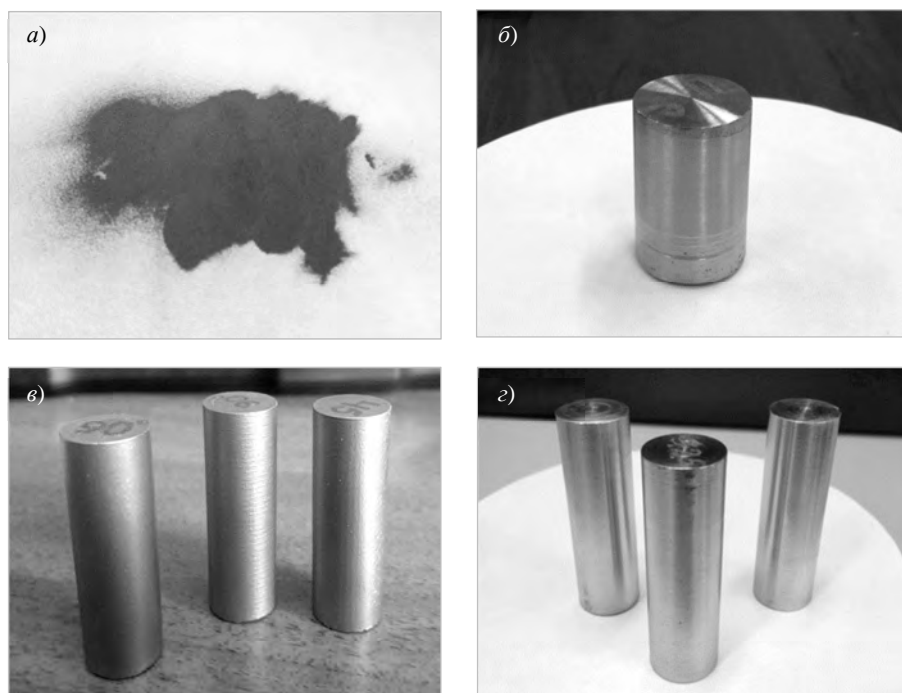
Чувствительность сплава к воздействию солей морской воды оценивалась по изменению массы образцов. Увеличение массы происходит за счет присоединения агрессивной среды (кислород, соли). Скорость разрушения материала определяется скоростью его взаимодействия с агрессивной средой, то есть скоростью увеличения массы, г/(м<sup>2</sup>·час).

Предел прочности, МПа



**Рис. 1.** Температурная зависимость предела прочности образцов сплава Inconel 718, изготовленных по SLM-технологии

**Fig. 1.** Temperature versus limit strength of samples made of Inconel 718 alloy, manufactured as per SLM-technology



**Рис. 2.** Внешний вид образцов для испытаний: а) сплав ПР-07Х18Н12М2 порошок; б) сплав ПР-07Х18Н12М2 образец после 8-минутных испытаний ( $t = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); в) сплав 08ХН53БМТЮ образцы перед испытаниями; г) сплав ПР-08ХН53БМТЮ образцы после 8-минутных испытаний ( $t = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

**Fig. 2.** View of test samples: a) alloy PR-07X18N12M2 powder; b) alloy PR-07X18N12M2 sample after 8-minute tests ( $t = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); c) alloy 08XN53BMТЮ samples before tests; d) alloy PR-08XN53BMТЮ samples after 8-minute tests ( $t = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

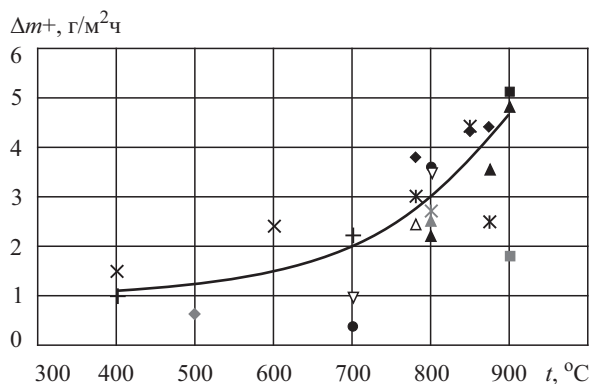
Этот процесс можно наблюдать в первый период испытаний (работы), когда не началось отторжение поврежденного материала. Поэтому для оценки скорости повреждения материалов в работе рассматривались результаты скорости увеличения массы по первым экспозициям выдержки, продолжительность которых составляла 8 мин.

На рис. 3 приведены опытные данные по коррозионным испытаниям изделий из порошковых сплавов ПР-07Х18Н12М2 и ПР-08ХН53БМТЮ и литейных материалов, испытываемых в аналогичных условиях при заданных температурах, полученные авторами работы.

По такому же принципу строилась температурная зависимость скорости реакции внешней среды

после окисления, где в качестве агрессивной среды выступал только кислород. Результаты представлены на рис. 4.

Как видно из графиков, характер изменения массы изделий из порошковых материалов ПР-07Х18Н12М2 ( $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и ПР-08ХН53БМТЮ ( $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), выполненных технологией послойного лазерного сплавления (SLM), получился аналогичным результатам для литейных сплавов. Одновременно на рис. 3 и 4 приведены данные по CoCr, РН1 – образцам из порошковых сплавов, которые были изготовлены с использованием аддитивных технологий. Всего рассматриваются 13 сплавов на коррозию и 10 сплавов на окисление, включая порошковые сплавы.



- ◆ ЧС88
- ЧС70
- ▲ ВЖЛ2
- × ПР-07Х18Н12М2\*
- ✱ СЛЖС5-ВИ
- СОСг\*
- + РН1\*
- ▽ ЭП648
- △ ЭП742
- ◆ 35ХМА
- ст 12Х18Н9Т
- ▲ ЖС26
- ✱ ПР-08ХН53БМТЮ\*

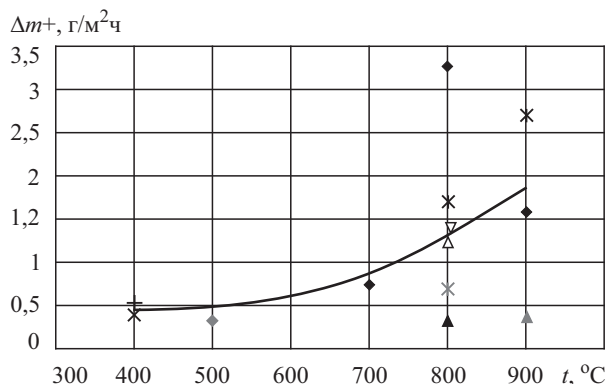
**Рис. 3.** Скорость реакции внешней среды с литейными и порошковыми сплавами во время коррозионных испытаний: «\*» – порошковые материалы

**Fig. 3.** Rate of reaction with environment for cast and powder alloys during corrosion tests: «\*» – powder materials

**Рис. 4.** Скорость реакции внешней среды с литейными и порошковыми сплавами во время испытаний на окисление: «\*» – порошковые материалы

**Fig. 4.** Rate of reaction with environment for cast and powder alloys during oxidation tests: «\*» – powder materials

- ◆ ЧС88
- ▲ ВЖЛ2
- × ПР-07Х18Н12М2\*
- ✱ СЛЖС5-ВИ
- † РН1\*
- ▽ ЭП648
- △ ЭП742
- ◆ 35ХМА
- ▲ ЖС26
- ✱ ПР-08ХН53БМТЮ\*



Результаты на окисление и солевую коррозию в диапазоне температур 400–900 °С показали, что скорость реакции с агрессивной средой монотонно возрастает с ростом температуры:

- в диапазоне 400–600 °С средняя скорость реакции с внешней средой во время испытаний на окисление составила 0,4–0,6 г/(м<sup>2</sup>·час), на солевую коррозию – 1,1–1,5 г/(м<sup>2</sup>·час);
- в диапазоне 600–800 °С средняя скорость реакции с внешней средой на окисление составила 0,6–1,3 г/(м<sup>2</sup>·час), на солевую коррозию – 1,5–3,0 г/(м<sup>2</sup>·час);
- в диапазоне 800–900 °С средняя скорость реакции с внешней средой на окисление составила 1,3–1,9 г/(м<sup>2</sup>·час), на солевую коррозию – 3,0–4,7 г/(м<sup>2</sup>·час).

Проведенные исследования показали следующее:

1. Начальный период окисления, горячей солевой коррозии изделий из порошковых материалов, выполненных с использованием аддитивных технологий, по характеру (изменение массы) оказался аналогичным с традиционными литейными материалами.
2. Скорость окисления и коррозии материалов ПР-07Х18Н12М2 и ПР-08ХН53БМТЮ практически совпали с характеристиками для всех исследуемых материалов (порошковые и литейные). Например, при температуре 800 °С скорость реакции с внешней средой во время испытаний на окисление составляет 1,3 г/(м<sup>2</sup>·час); на солевую коррозию – 3,0 г/(м<sup>2</sup>·час).

## Библиографический список

### References

1. Грязнов М.Ю., Шопин С.В., Чувильдеев В.Н. Физико-механические свойства и структура сплава INCONEL 718, полученного по технологии послойного лазер-

ного сплавления // Физика твердого тела: вестник Нижегородского университета Н.И. Лобачевского. 2014. № 4(1). С. 46–51. [M. Gryaznov, S. Shopin, V. Chuvildeev. Physical & mechanical properties and structure of INCONEL 718 alloy obtained as per Selective Laser Melting (SLM) technology // Physics of solid body: Bulletin of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod. 2014; 4(1): 46–51. (in Russian)].

2. Металлические порошки для аддитивных технологий [Электрон. ресурс] / Сайт АО «Полема». URL: <http://www.polema.net/userfiles/files/Poroshki.pdf> [дата обращения 26.01.2018] / Metal powders for additive technologies. Web site of JSC Polema, <http://www.polema.net/userfiles/files/Poroshki.pdf>.
3. Никитин В.И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин. Л.: Машиностроение, 1987. [V. Nikitin. Corrosion and protection of gas turbine blades. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1987. (in Russian)].

## Сведения об авторах

Киришина Алена Андреевна, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: alyonaneudakhina21@gmail.com.  
Багерман Анатолий Захарович, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: bagerman.a.z@mail.ru.

Киришин Антон Юрьевич, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: antonk0403@gmail.com.  
Князьков Михаил Леонидович, начальник лаборатории ОАО «Специальное конструкторское бюро котлостроения (СКБК)». Адрес: 199106, Россия, Санкт-Петербург, В.О., 23-я линия, д. 2, лит. А. Тел.: +7 (981) 106-26-64. E-mail: wodjanoy8662@yandex.ru.

*Левихин Артем Алексеевич*, к.т.н, доцент, зав. каф. «Двигатели летательных аппаратов» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Адрес: 190005, Россия, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1. Тел.: 8 (812) 495-77-33. E-mail: levihin1981@gmail.com.

#### **About the authors**

*Kirshina, Alena A.*, Engineer, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: alyonaneudakhina21@gmail.com.

*Bagerman, Anatoly Z.*, Cand. Tech. Sc., Lead Researcher, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: bagerman.a.z@mail.ru.

*Kirshin, Anton Yu.*, Engineer, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: antonk0403@gmail.com.

*Knyazkov, Mikhail L.*, Head of Laboratory, Special Boiler Design Bureau. Address: 2A, 23th Line of Vasilyevsky Island, St. Petersburg, Russia, post code 199106. Tel.: +7 (981) 106-26-64. E-mail: wodjanoy8662@yandex.ru.

*Levikhin, Artem A.*, Cand. Tech. Sc., Associate Prof., Chair of Department Aircraft Engines, Ustinov Baltic State Technical University (Voenmekh). Address: 1, 1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190005. Tel.: 8 (812) 495-77-33. E-mail: levihin1981@gmail.com.

Поступила / Received: 01.03.18  
Принята в печать / Accepted: 04.06.18  
© Коллектив авторов, 2018