

## Конкурсная работа

**Авторы:** Хакимов А.М. (ПАО «Кузнецов»), Жаткин С.С. (ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»), Климов В.Г. (ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»).

**Название работы:** Исследование влияния присадочных материалов на структуру и свойства зон лазерной наплавки лопаток ГТД.

**Цель работы:** Исследование влияния присадочных порошковых материалов ВПр24, ВПр27, ВПр11-40Н, Рок-Дюр 6740 на структуру и свойства зон лазерной импульсной наплавки на торец изношенного пера лопатки турбостартера газотурбинного двигателя НК-12МП. Анализ результатов исследований, приведение рекомендаций по выбору порошкового присадочного материала наиболее подходящего для восстановления лопаток.

**Описание работы:** В настоящее время восстановительный ремонт компонентов авиационных двигателей является перспективным направлением техники, достигается значительное снижение расходов за счет восстановления поврежденных и изношенных деталей [1]. Одним из методов восстановления изношенных изделий является лазерная импульсная наплавка.

Суть лазерной восстановительной наплавки заключается в нанесении на восстанавливаемое изделие покрытия путем расплавления основы и присадочного материала. Используя методы лазерной наплавки, возможно получение граничной области с хорошей адгезией и покрытия с мелкодисперсными и равномерно распределёнными включениями.

Для проведения исследований наплавку проводили на изношенные лопатки ТС двигателя НК-12МП. Износ на данных лопатках происходит по торцу пера и имеет абразивный характер согласно ранее опубликованным данным. [2] Материал лопатки ЖС6-К (ТУ 1-809-1025-98). Рабочая температура ~900°С.

В качестве наплавляемого присадочного материала были использованы высокотемпературные порошковые припои на основе никеля ВПр24, ВПр27, ВПр11-40Н разработанные ФГУП «ВИАМ» и композитный порошковый материал Рок-Дюр 6740 производства ООО «СП Техникорд».

На рис. 1 представлена морфология порошков используемых в качестве присадочного материала при наплавке.

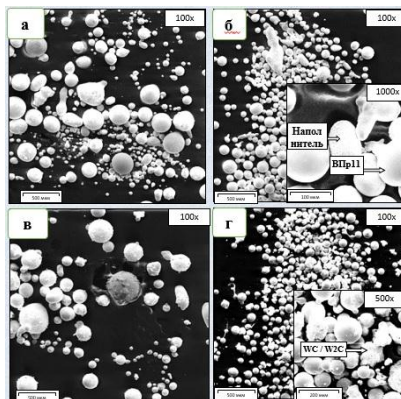


Рис.1. Морфология порошков: а – ВПр27; б – ВПр11-40Н; в – ВПр24; г – Рок-Дюр 6740

Из рисунка видно, что все исходные порошки имеют сферическую форму. У порошков ВПр11-40Н и Рок-Дюр 6740 наблюдаются включения: ВПр11-40Н - наполнителя 40% (Ni-B-Si) и Рок-Дюр 6740 - WC/WC2.

Лазерная Импульсная наплавка производилась на установке ALFA-300 (производство ООО «ЛазерФорм», г. Зеленоград, Россия). Наплавка проводилась помещением пера лопатки в ванну с наплавляемым порошком. При наплавке перо лопатки размещалось в порошковой ванне на одном уровне с порошком (рис.2). [2]

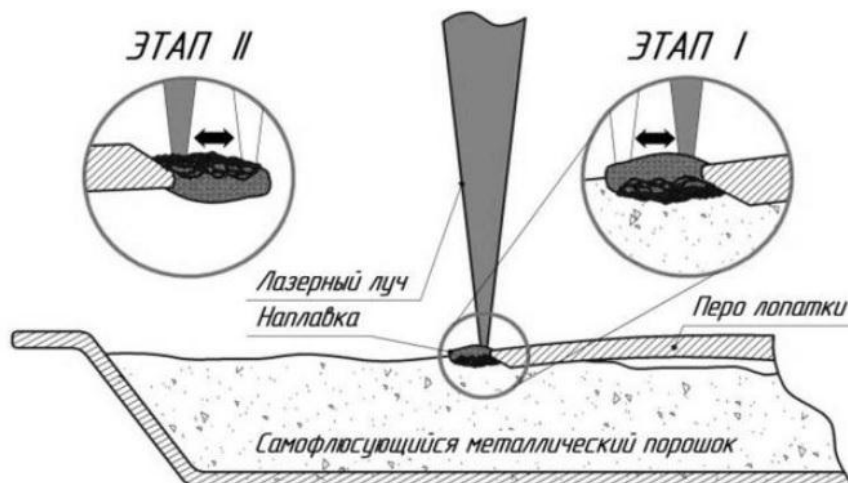


Рис.2. Схема процесса лазерной импульсной наплавки в порошковой ванне.

Данная методика позволяет сократить количество проходов, повышает КИМ при наплавке и не требует устройства подачи порошка.

Лазерная импульсная порошковая наплавка производилась по режиму указанному в таблице 1.

Таблица 1

**Режим лазерной импульсной порошковой наплавки**

Напряжение на лампе (В)	Частота (Гц)	Длительность импульса (мс)	Пиковая мощность (кВт)	Средняя мощность (Вт)	Диаметр пучка (мм)	Энергия импульса (Дж)	Форма импульса
380	5	20	2,22	222	0,6	44,4	

На рис.3 представлена изношенная лопатка после наработки (а) и восстановленная методом лазерной импульсной наплавки в порошковой ванне (б).

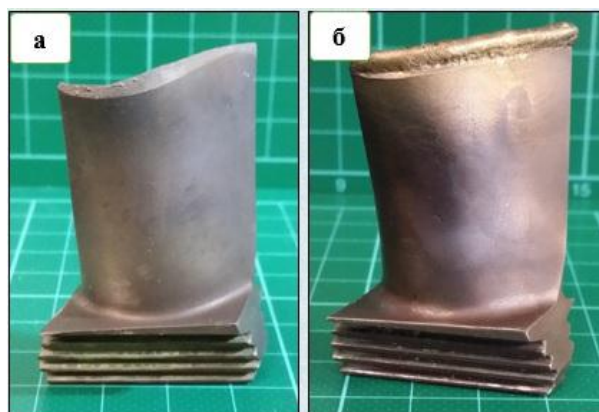


Рис.3. Лопатки ТС двигателя НК-12МП: а – изношенная после наработки лопатка; б – восстановленная лопатка методом лазерной импульсной наплавки в порошковой ванне.

Восстановленные зоны и сам порошковый материал исследовались на электронном микроскопе Tescan (Чехия) VEGA3 LM с модулем Oxford instruments X-Max, а измерения твердости проводились на микротвердомере "EMCO-TEST PrufmaSchinen GmbH" (Австрия) DuraScan-10 на базе центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ) предприятия ПАО «Кузнецов».

Электронная микроскопия исходных порошков показала, что все порошки имеют мелкозернистую равномерно распределенную структуру с аустенитными зернами 10-15 мкм. У порошков ВПр27 и ВПр11-40Н наблюдается рост дендритов (ВПр27 15-25мкм, ВПр11-40Н 10-25мкм). У Рок-Дюр 6740 равномерно распределенные включения карбидов (рис. 4).

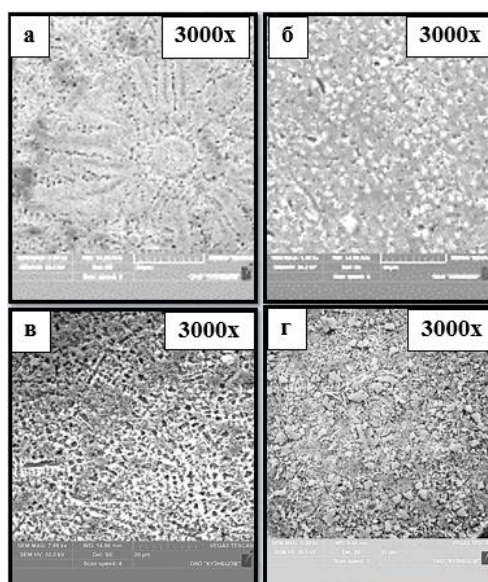


Рис.4. Структура порошков для наплавки: а - ВПр27; б – ВПр24; в – ВПр11-40Н; г – Рок-Дюр 6740

На рис.5 представлены фотографии электронной микроскопии зон лазерной наплавки в 3 различных увеличениях.

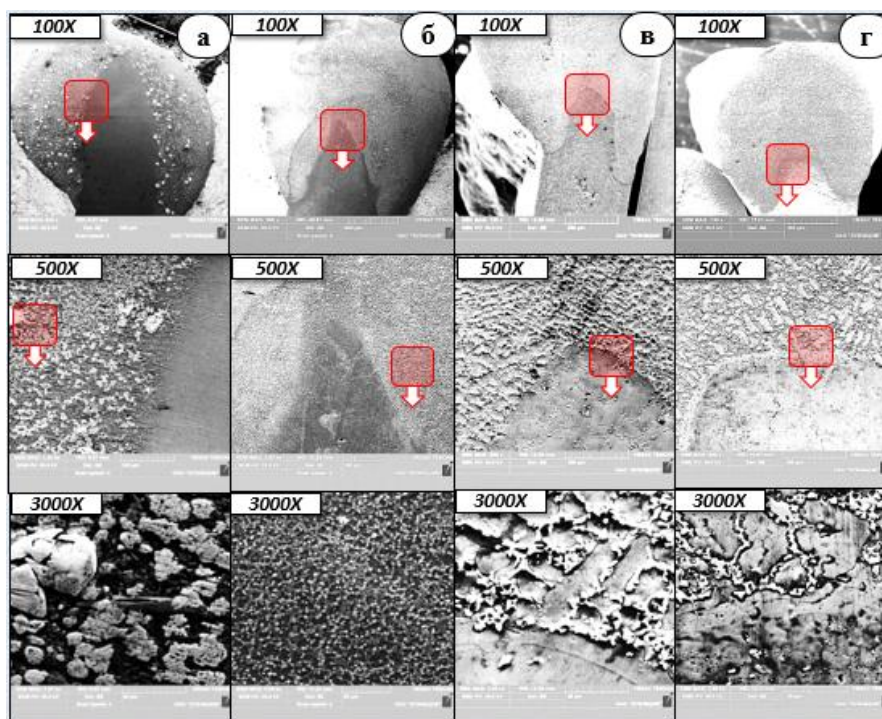


Рис.5. Структура зон лазерной наплавки: а - Рок-Дюр 6740; б – VPr27; в – VPr24; г – VPr11-40Н

Наплавленные слои порошковых материалов VPr11-40Н и VPr24 имеют схожую структуру, аустенитные зерна не более 10 мкм, с выделением по границам интерметаллидов на основе Cr и W. В зоне наплавки VPr27 формируется высокодисперсная структура. В структуре наплавленного слоя композитного материала Рок-Дюр 6740 ярко выражены выделения карбидов WC/W<sub>2</sub>C размерами 20-80 мкм.

Все наплавленные слои имеют хорошую зону сплавления с материалом лопатки.

Результаты измерения микротвердости представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Микротвердость наплавленных слоев и материалов лопатки**

Материал	Средняя твердость по Виккерсу, HV	Наиболее предположительные фазы	Твердость фаз.
ЖС6-К	436-456	-	-
VPr11-40Н	490-510	Интерметаллиды и карбиды на основе Cr	Невозможно точно определить ввиду малого размера фазы
VPr24	690-740	Интерметаллиды на основе Cr, W	Невозможно точно определить ввиду малого размера фазы

ВПр27	400-690	Интерметаллиды на основе Cr, W	Невозможно точно определить ввиду малого размера фазы
Рок-Дюр 6740	330-390	Карбиды W	1500-2300

Высокая твердость у наплавленного материала Рок-Дюр 6740 предположительно из-за включений карбида W, у ВПр24 и ВПр27 за счет интерметаллидов на основе Cr, W и ВПр11-40Н интерметаллидов и карбидов на основе Cr.

Измерение КТЛР производилось на установке измерения коэффициента теплового линейного расширения металлов собранной в лаборатории СамГТУ, с шагом в 25 °С до максимальной температуры 900 °С.

Результат измерения КТЛР приведен на графике (рис. 6).

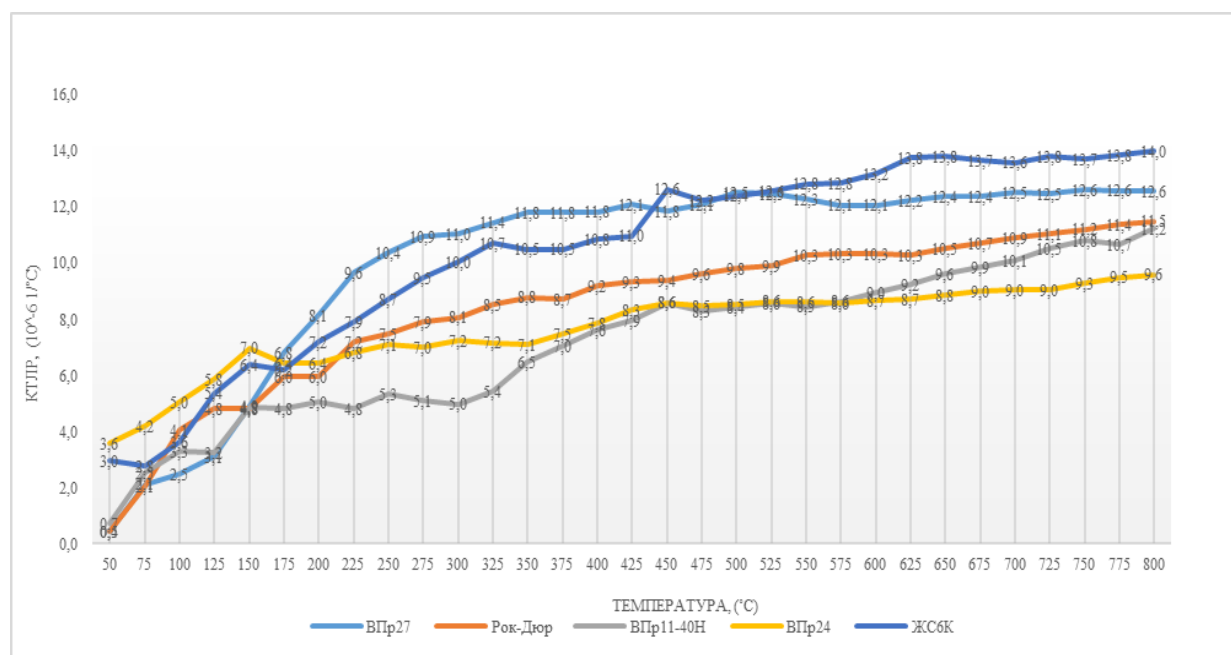


Рис.6. График зависимости КТЛР от материалов участвующих в наплавке.

Согласно графику материал лопатки ЖС6-К имеет КТЛР наиболее близкий по значению к наплавленному образцу из высокотемпературного никелевого припоя ВПр27, следовательно, отслоение наплавленного слоя при нагреве не произойдет.

Испытания на абразивный износ проводились на установке испытания на абразивный износ Универсал-1А в лаборатории СамГТУ. Время испытания одного наплавленного образца 15 минут, скорость вращения ответной детали 600 об/мин и нагрузке 30кГ/с. Ответная деталь трубка Ø6мм и толщиной 1мм из закаленной стали 40Х. В качестве абразива использовалась алмазная паста.

Показания скорости абразивного изнашивания материалов приведены в таблице 3.

**Показания скорости абразивного изнашивания материалов**

№	Материал	Скорость износа мкм/час
1	ВПр11-40Н	114,5
2	Рок-Дюр 6740	161,5
3	ВПр27	236
4	ЖС6-К	323,5
5	ВПр24	473,5

По сравнению с материалом лопатки, наиболее высокую стойкость к абразивному изнашиванию имеют: ВПр11-40Н, Рок-Дюр 6740, ВПр27.

На основании вышеизложенного были сделаны следующие выводы:

1. После лазерной импульсной порошковой наплавки формируется однородная дисперсная структура наплавленного слоя. При этом обеспечивается высокая адгезия наплавленного слоя с материалом лопатки.
2. Согласно проведенным исследованиям, наиболее подходящим порошковым материалом из выбранных для восстановления лопаток из сплава ЖС6-К является высокотемпературный порошковый припой ВПр27. Наплавленный слой данного припоя имеет высокодисперсную структуру, приемлемую твердость и значение КТЛР наиболее близкое к значению материала лопатки.

**Список литературы:**

1. Таскаев, П.В. Восстановление моноколес газотурбинных двигателей и агрегатов при повреждении рабочих кромок одной или нескольких лопаток [Электронный ресурс] // Наука и образование. 2010. №10.
2. Климов В.Г., Жаткин С.С., Щедрин Е.Ю., Когтева А.В. Особенности восстановления геометрии пера газотурбинного двигателя методом лазерной порошковой наплавки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 2-4. – С. 782-788.