

УДК 621.373.826; 621.791.92; 621.431.75

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИСАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗОН ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ЛОПАТОК ГТД

© 2017 А.М. Хакимов^{1,2}, В.Г. Климов^{1,2}, С.С. Жаткин², Д.А. Баранов^{1,2}, И.А. Дяговцов¹, А.С. Попов¹, А.В. Пескова¹

¹ ПАО «Кузнецов», г. Самара

² Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 06.04.2017

В статье рассмотрено влияние присадочных порошковых материалов ВПр24, ВПр27, ВПр11-40Н, Рок-Дюр 6740 на структуру и свойства зон лазерной наплавки на торец изношенного пера лопатки турбостартера газотурбинного двигателя НК-12МП. Приведены результаты исследований, сформулированы рекомендации по выбору присадочного материала, наиболее подходящего для восстановления лопаток.

Ключевые слова: *лазерная наплавка, самофлюсующийся припой, порошковая ванна, дефект, локальный абразивный износ*

Одним из методов восстановления геометрии изношенных деталей и получения заданных свойств материала в машиностроении является наплавка. Наиболее распространенным и более дешевым является метод аргонодуговой наплавки, однако она имеет недостатки, такие, как повышенная склонность к образованию трещин в результате повышенных напряжений и высокой релаксационной стойкости сплавов [1, 2], большую зону термического влияния и высокую вероятность перегрева металла. Так, например, Сорокин Л.И. в своей статье описывает аргонодуговую наплавку бандажных полок лопаток [3] и предлагает производить наплавку за счет равномерного пленочного расплавления на глубину 0,2-0,3 мм, что в дальнейшем снижает перегрев, а, следовательно, и образование трещин [2]. После проведения аргонодуговой наплавки остается большой припуск, который в дальнейшем необходимо снимать механической обработкой. Чтобы избежать данных проблем широко используют лазерную наплавку. Такой метод восстановления отличается от аргонодуговой наплавки тем, что имеет меньшую зону термического влияния за счет локального воздействия лазерного пучка, а, следовательно, более низкую вероятность образования трещин. Сотов А.В. в своей ,

статье выделяет существенные плюсы лазерной наплавки такие, как минимальный объем расплава, малая зона ЗТВ, минимальный припуск. Микротвердость наплавленного слоя в среднем на 20% выше микротвердости основного металла. Переходная зона имеет значения микротвердости, выше на 50-60% по сравнению со сплавом основы, что может быть связано с протеканием процессов закалки и старения в этой области и выделением в ней дисперсных фаз на основе интерметаллидов [4, 5]. Восстановление лопаток лазерной импульсной порошковой наплавкой позволяет сократить расходы до 80% по сравнению с изготовлением новой лопатки.

Цель работы: исследование влияния присадочных материалов на структуру и свойства зон лазерной наплавки лопаток ГТД и выбор оптимального порошкового материала для восстановления деталей из сплава ЖС6-К.

Методика исследований. Для проведения исследований наплавку проводили на изношенные лопатки ТС двигателя НК-12МП. Износ происходит по торцу пера лопатки и имеет абразивный характер согласно ранее опубликованным данным [6]. Материал лопатки ЖС6-К (ТУ 1-809-1025-98). Рабочая температура 900°C. В качестве наплавляемого материала были использованы высокотемпературные порошковые никелевые припои ВПр24, ВПр27, ВПр11-40Н, разработанные ФГУП «ВИАМ» и композитный порошковый материал Рок-Дюр 6740 производства ООО «СП Техникорд». Классификация и рабочая температура наплавляемых высокотемпературных никелевых припоев и материала лопатки представлены в табл. 1. Дополнительно в исследованиях для наплавки использовался композиционный материал Рок-Дюр 6740, так как наплавка данным композиционным материалом, содержащим карбиды вольфрама, может дать высокую стойкость к абразивному изнашиванию. На рис. 1 представлены морфология порошков используемых в наплавке. Из рис. 1 видно, что все исходные порошки имеют

Хакимов Алексей Мунирович, инженер бюро сварки, магистр. E-mail: ugs@kuznetsov-motors.ru

Климов Вадим Геннадьевич, начальник отдела, аспирант. E-mail: vadim3945@yandex.ru, ugs@kuznetsov-motors.ru

Жаткин Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры литейных и высокоэффективных технологий. E-mail: laser@samgtu.ru, sergejat@mail.ru

Баранов Дмитрий Александрович, инженер бюро сварки, аспирант

Дяговцов Игорь Анатольевич, инженер бюро пайки. E-mail: diagovtsov@yandex.ru

Попов Александр Сергеевич, инженер бюро оборудования, аспирант

Пескова Анастасия Васильевна, инженер металлографической лаборатории, магистр

сферическую форму. У порошков ВПр11-40Н и Рок-Дюр6740 наблюдаются включения: ВПр11-40Н-наполнителя 40% (Ni-B-Si) и Рок-Дюр 6740 – WC/WC₂. Дисперсность используемых в наплавке порошков представлена в табл.1.

Импульсная лазерная наплавка производилась на установке ALFA-300 (производство ООО «ЛазерФорм», г. Зеленоград, Россия). Наплавка

проводилась помещением пера лопатки в ванну с наплавляемым порошком, перо лопатки размещалось в порошковой ванне на одном уровне с порошком (рис. 2) [6]. Данная схема позволяет производить наплавку в один проход. Лазерная импульсная порошковая наплавка производилась по режиму, представленному в табл. 2.

Таблица 1. Классификация и рабочая температура материалов

| Материал | ГОСТ, ТУ | Классификация | Основные компоненты | Дисперсность порошка, мкм | Рабочая температура, °С |
|--------------|---------------------------|--|---|---------------------------|-------------------------|
| ЖС6-К | ТУ 1-809-1025-98 | жаропрочный литейный сплав (материал лопатки) | Ni-Cr-Al-W-Mo-Co-Ti-Si-C | - | до 1000 |
| ВПр11-40Н | ТУ 1-809-108-91 | высокотемпературный порошковый припой | 60% (Ni-Cr-Al-Fe-Co-B-Si-C) + 40% (Ni-B-Si) | 100-315 | до 900 |
| ВПр24 | ТУ 1-809-838-89 | высокотемпературный порошковый припой | Ni-Co-Cr-Nb-W-Al-Mo-Ti-Si-B-C | 100-315 | до 1050 |
| ВПр27 | ТУ 1-595-4-1021-2007 | высокотемпературный порошковый припой | Ni-Co-Cr-W-Si-Mo-Al-Nb-B-C | 100-250 | До 1000 |
| Рок-Дюр 6740 | ТУ 1526-001-86297481-2008 | композиционный материал на основе сплава Ni с литым карбидом вольфрама | 60% (Ni-Cr-B-Si-C) + 40% [88(WC-W ₂ C) + 12% (Ni-Cr-B-Si-C)] | 100-160 | До 700 |

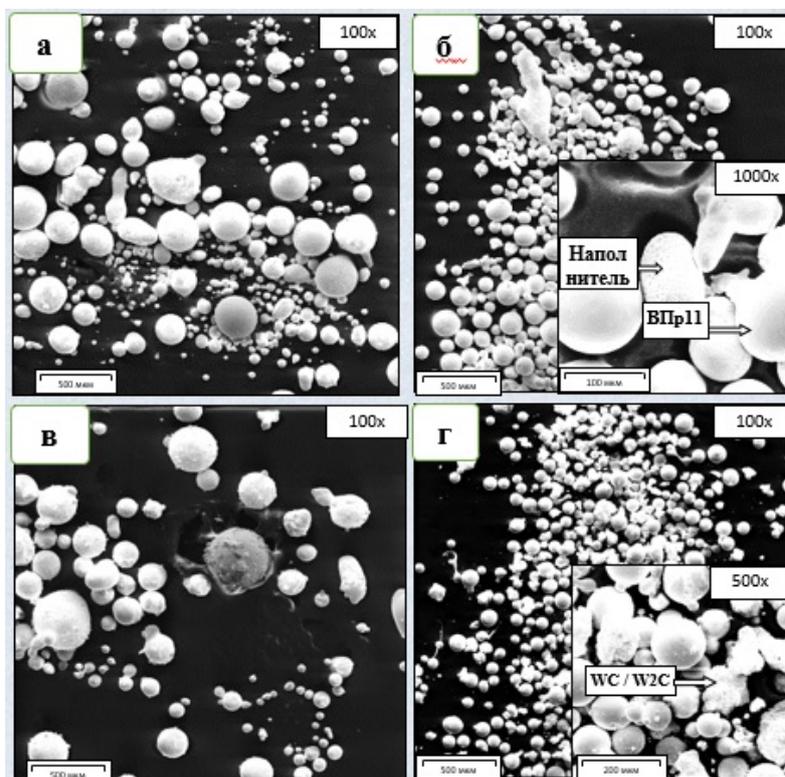


Рис. 1. Морфология порошков:
а – ВПр27; б – ВПр11-40Н; в – ВПр24; г – Рок-Дюр 6740

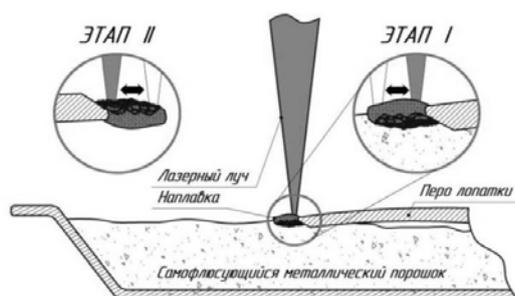


Рис. 2. Схема процесса лазерной импульсной наплавки в порошковой ванне

Таблица 2. Режим лазерной импульсной порошковой наплавки

| Напряже- ние на лампе (В) | Ча- стота (Гц) | Длитель- ность им- пульса (мс) | Пиковая мощ- ность (кВт) | Средняя мощ- ность (Вт) | Диа- метр пучка (мм) | Энергия импуль- са (Дж) | Форма ипульса |
|---------------------------------|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|
| 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) согласно режиму, представленному в табл. 2.

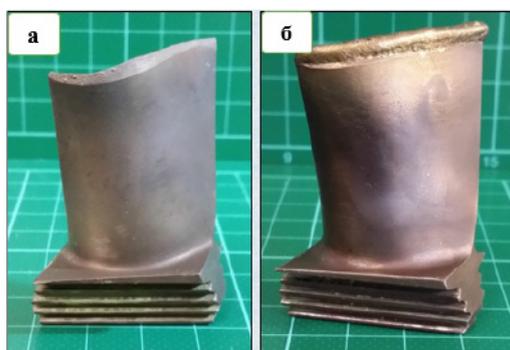


Рис. 3. Лопатки ТС двигателя НК-12МП: а – изношенная после наработки лопатка; б – восстановленная лопатка методом лазерной импульсной наплавки в порошковой ванне

Измерение КТЛР производилось на установке измерения коэффициента теплового линейного расширения металлов, собранной в лаборатории Самарского государственного технического университета, с шагом в 25°С до максимальной температуры 900°С. Восстановленные зоны и сам порошковый материал исследовались на электронном микроскопе Tescan (Чехия) VEGA3 LM с модулем Oxford instruments X-Max, измерения твердости проводились на микротвердомере «EMCO-TEST PrufmaSchinen GmbH» (Австрия) DuraScan-10 на базе центральной заводской лаборатории предприятия ПАО «Кузнецов». 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 при нагрузке 30кГ/с. Ответная деталь трубка Ø6 мм и толщиной 1 мм из закаленной стали 40X. В качестве абразива использовалась алмазная паста.

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 15-25 мкм, ВПр11-40Н 10-25 мкм). У Рок-Дюр 6740 равномерно распределенные включения карбидов (рис. 4). На рис. 5 представлены фотографии электронной микроскопии зон лазерной наплавки в 3 различных увеличениях.

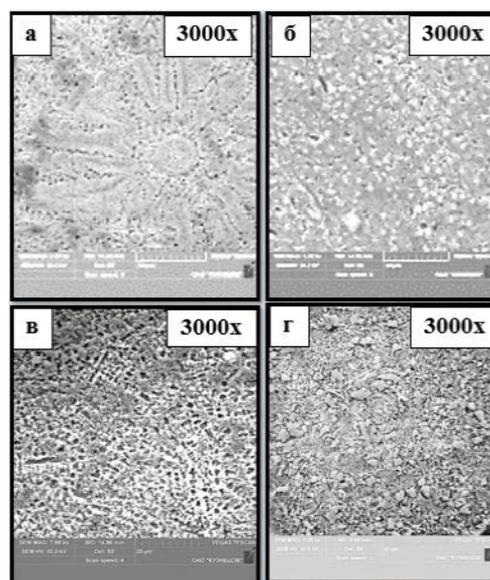


Рис. 4. Структура порошков для наплавки: а – ВПр27; б – ВПр24; в – ВПр11-40Н; г – Рок-Дюр 6740

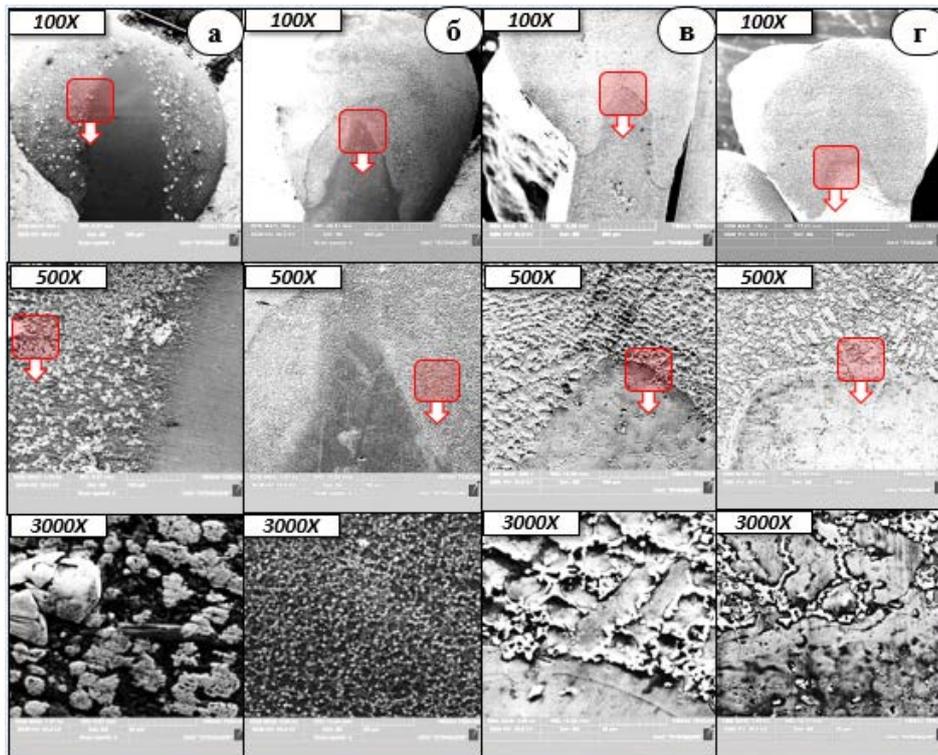


Рис. 5. Структура зон лазерной наплавки:
а - Рок-Дюр 6740; б – ВПр27; в –ВПр24; г – ВПр11-40Н

Наплавленные слои порошковых материалов ВПр11-40Н и ВПр24 имеют схожую структуру, аустенитные зерна не более 10 мкм, с выделением по границам интерметаллидов на основе Cr и W. В зоне наплавки ВПр27 формируется высокодисперсная структура. В структуре наплавленного слоя композитного материала Рок-Дюр 6740 ярко выражены выделения карбидов WC/W₂C размерами 20-80 мкм. Все наплавленные слои имеют хорошую

зону сплавления с материалом лопатки. Результаты измерения микротвердости представлены в табл. 3. 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. Результат измерения КТЛР приведен на графике (рис. 6).

Таблица 3. Микротвердость наплавленных слоев и материалов лопатки

| Материал | Средняя твердость по Виккерсу, HV | Наиболее предполагаемые фазы | Твердость фаз |
|--------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---|
| ЖС6-К | 436-456 | - | - |
| ВПр11-40Н | 490-510 | интерметаллиды и карбида на основе Cr | невозможно точно определить ввиду малого размера фазы |
| ВПр24 | 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 |

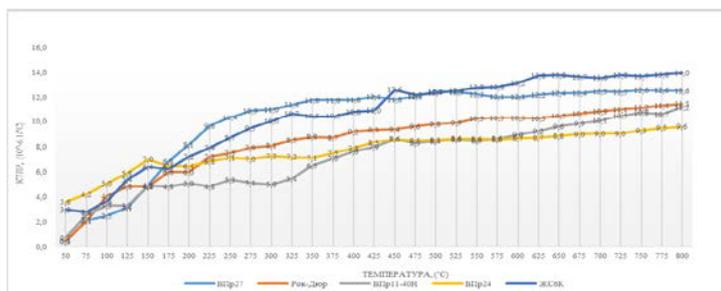


Рис. 6. График зависимости КТЛР от материалов, участвующих в наплавке

Согласно графику, материал лопатки ЖС6-К имеет КТЛР наиболее близким по значению КТЛР к материалу лопатки является ВПр27, следовательно, отслоение наплавленного слоя при нагреве не произойдет. Показания скорости абразивного изнашивания материалов приведены в табл. 4. По сравнению с материалом лопатки, наиболее высокую стойкость к абразивному изнашиванию имеют: ВПр11-40Н, Рок-Дюр 6740, ВПр27.

Таблица 4. 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 |

Выводы:

1. После лазерной импульсной порошковой наплавки формируется однородная дисперсная структура наплавленного слоя. При этом обеспечивается высокая адгезия наплавленного слоя с материалом лопатки.
2. Наиболее подходящим порошковым материалом из выбранных для восстановления лопаток из сплава ЖС6-К является высокотемпературный порошковый припой ВПр27. Наплавленный слой этого

припоя имеет высокодисперсную структуру, приемлемую твердость и значение КТЛР наиболее близкое к значению материала лопатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Сорокин, Л.И. Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов // Сварочное производство. 1999. №12. С. 11-17.
2. Сорокин, Л.И. Свариваемость литейных жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6 / Л.И. Сорокин, В.И. Лукин, Ю.С. Багдасаров // Сварочное производство. 1997. №6. С. 12-17.
3. Сорокин, Л.И. Аргоно-дуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов // Сварочное производство. 2004. №7. С. 36-39.
4. Сотов, А.В. Импульсная лазерная наплавка лопаток газотурбинного двигателя / А.В. Сотов и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 6(4). С. 973-977.
5. Каблов, Е.Н. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой / Е.Н. Каблов, И.Л. Светлов, Н.В. Петрушин // Материаловедение. 1997. № 4. С. 32-39.
6. Климов, В.Г. Особенности восстановления геометрии пера газотурбинного двигателя методом лазерной порошковой наплавки / В.Г. Климов, С.С. Жаткин, Е.Ю. Щедрин, А.В. Когтева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17, №2(4). С. 782-788.

RESEARCH THE INFLUENCE OF ADDITIVE MATERIALS ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF LASER CLADDING ZONES AT GTE BLADES

© 2017 A.M.Khakimov^{1,2}, V.G. Klimov^{1,2}, S.S. Zhatkin², D.A. Baranov^{1,2}, I.A. Dyagovtsov¹, A.S. Popov¹, A.V. Peskova¹

¹ PJSC “Kuznetsov”, Samara
² Samara State Technical University

In article influence of the additive powder materials Vpr24, Vpr27, Vpr11-40H, Rock Dyur 6740 on structure and properties of laser cladding zones on the butt end of a worn-out feather of turbostarter blade of gas-turbine engine NK-12MP is considered. Results of researches are given, recommendations about the choice of additive material, the most suitable for blades restoration are formulated.

Key words: laser cladding, self-fluxing solder, powder bath, defect, local abrasive wear

Aleksey Khakimov, Engineer at the Welding Bureau, Master. E-mail: ugs@kuznetsov-motors.ru; Vadim Klimov, Head of the Department/ Post-graduate Student. E-mail: vadim3945@yandex.ru, ugs@kuznetsov-motors.ru; Sergey Zhatkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Foundry and High Effective Technologies. E-mail: laser@samgtu.ru, sergejat@mail.ru; Dmitriy Baranov, Engineer at the Welding Bureau, Post-graduate Student; Igor Dyagovtsov, Engineer at the Soldering Bureau. E-mail: diagovtsov@yandex.ru; Alexander Popov, Engineer at the Equipment Bureau, Post-graduate Student; Anastasiya Peskova, Engineer at the Metallographic Laboratory, Master