

УДК 621.791.92:620.186.82

Исследование влияния параметров лазерной порошковой наплавки на качество износостойкого слоя контактной поверхности рабочих лопаток ТВД

Аракелян Артем Араратович¹

tema.arakelyan2017@yandex.ru

Ронжин Дмитрий Александрович²

kynavino@bk.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия² ПК «Салют» АО «ОДК», Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено применение технологии лазерной порошковой наплавки для повышения износостойкости контактной поверхности бандажной полки рабочих лопаток турбин высокого давления (ТВД). Представлено исследование влияния мощности лазерного излучения на качество наплавленного слоя, выполненное с использованием установки МЛ7 и кобальтсодержащего порошка ПР-КХ28В20Н5Ф. Показано, что при мощности ниже 270 Вт возникают несплавления и поры, становящиеся источниками трещин после термообработки. Оптимизация параметров (мощность 310–350 Вт) позволила сформировать бездефектный слой с диффузионной переходной зоной толщиной ~400 мкм. Определены зависимости количества дефектов от мощности лазерного излучения.

Ключевые слова: лазерная порошковая наплавка, рабочая лопатка, бандажная полка, ЖС26, поры, несплавления

Study of the influence of laser powder deposition parameters on the quality of the wear - resistant layer of the contact surface of high - pressure turbine blades

Arakelyan Artem Araratovich¹

tema.arakelyan2017@yandex.ru

Ronzhin Dmitry Alexandrovich²

kynavino@bk.ru

¹ BMSTU, Moscow, Russia² Salut Production Complex of UEC JSC, Moscow, Russia

Abstract. The article considers the use of laser powder cladding technology to improve the wear resistance of the contact surface of the shroud shelf of high-pressure turbine (HPT) blades. The study of the effect of laser radiation power on the quality of the deposited layer is presented, carried out using the ML7 installation and cobalt-containing powder PR-KH28V20N5F. It is shown that at a power below 270 W, incomplete fusion and pores occur, which become sources of cracks after heat treatment. Optimization of the parameters (power 310–350 W) made it possible to form a defect-free layer with a diffusion transition zone ~400 μm thick. The dependences of the number of defects on the laser radiation power are determined.

Keywords: *laser powder cladding, working blade, shroud shelf, ZhS26, pores, lack of fusion*

Введение. Рабочая лопатка турбины высокого давления (ТВД) является одним из ключевых элементов газотурбинного двигателя, подверженным воздействию высоких температур и значительных механических нагрузок. Контактная поверхность бандажной полки рабочих лопаток ТВД подвергается значительным механическим и термическим нагрузкам в процессе эксплуатации. Износ контактной поверхности существенно влияет на ресурс рабочих лопаток. В настоящее время в целях продления срока службы контактной поверхности рабочих лопаток применяются технологии нанесения износостойкого слоя, таких как напайка в вакууме и аргонодуговая наплавка [1–3].

Лазерная порошковая наплавка как новый метод нанесения износостойкого слоя выделяется высокой точностью, минимальной зоной термического влияния и возможностью автоматизации процесса, что делает ее особенно перспективной для обработки тонкостенных и термонагруженных деталей, таких как рабочие лопатки [4–6]. Согласно современным научным публикациям, порошки на основе кобальта обеспечивают хорошее сочетание жаростойкости и износостойкости за счет формирования устойчивых карбидов и интерметаллидных фаз. По данным исследований ВИАМ, применение легированных порошков, содержащих элементы Cr, W, V и B, позволяет существенно повысить стойкость к термическому растрескиванию и улучшить сплавление с основным материалом [7].

Целью работы является исследование влияния технологических параметров лазерной порошковой наплавки на качество наплавленного слоя износостойкого сплава контактной поверхности бандажной полки рабочих лопаток ТВД.

Материалы и методы. Исследование проводилось на установке лазерной порошковой наплавки МЛ7 (ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура»). Управление технологическим процессом осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения FlexCNC.

В качестве наплавливаемой детали использовалась рабочая лопатка ТВД. Материал основы лопатки представляет собой жаропрочный никелевый сплав ЖС26-ВИ, обладающий высокой прочностью и устойчивостью к термическому воздействию [8]. В качестве присадочного материала применялся порошок марки ПР-КХ28В20Н5Ф производства АО «Полема», фракцией 56–180 мкм (таблица). Порошок имеет кобальтовую основу с содержанием легирующих элементов.

Химический состав порошка, %

Co	C	Cr	W	Ni	V	B	Mn	Si	Fe	O
						Не более				
Основа	0,7–1,0	26–30	18–21	4–6	0,75–1,25	1	1	1	3	0,15

Эксперимент проводился на режимах лазерной порошковой наплавки с изменением мощности в диапазоне 210–350 Вт с шагом 10 Вт при фиксированных значениях расхода порошка (2,5 г/мин), защитного газа (4 л/мин) и скорости перемещения (500 мм/мин). Наплавка осуществлялась непрерывным движением по контактной поверхности лопатки без выключения лазера при разворотах по схеме, представленной на рис. 1.

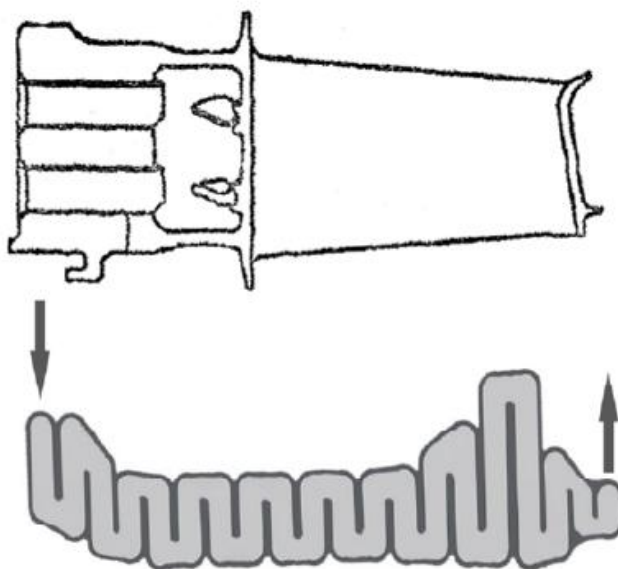


Рис. 1. Схема лазерной наплавки

Комплексная оценка качества сформированных наплавленных слоев проводилась на образцах рабочих лопаток ТВД, подготовка которых включала: разрезку с помощью отрезного станка, горячую запрессовку на прессе, механическую шлифовку и полировку. Исследование микроструктуры и химического состава отдельных частиц выполнялось на оптическом и электронном микроскопах.

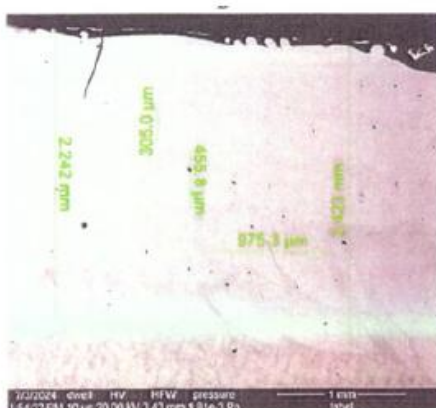
Результаты. На рис. 2 приведены результаты макроструктурных исследований. Все образцы имеют выраженное слоистое строение с преимущественно дендритной морфологией, типичной для направленного кристаллизационного роста при высокой скорости охлаждения.

Для оценки влияния технологических параметров лазерной порошковой наплавки на качество сформированных слоев был проведен количественный анализ наличия дефектов. На основе этих данных установлена зависимости между мощностью лазерного излучения и наличием пор и несплавлений в наплавленном слое (рис. 3).

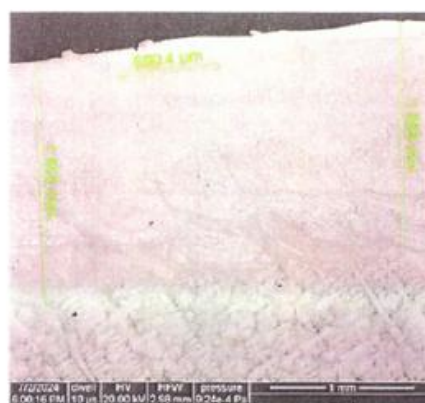
По результатам микроструктурного исследования наплавленного слоя на наличие дефектов установлено:

- при значениях мощности 210–270 Вт в наплавленном слое наблюдаются дефекты структуры, такие как поры и несплавления (60–70 дефектов на 3 см²) (рис. 2, а);

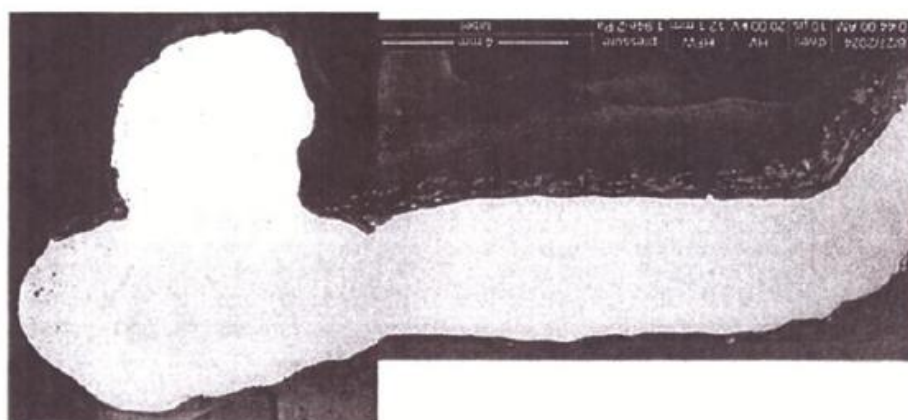
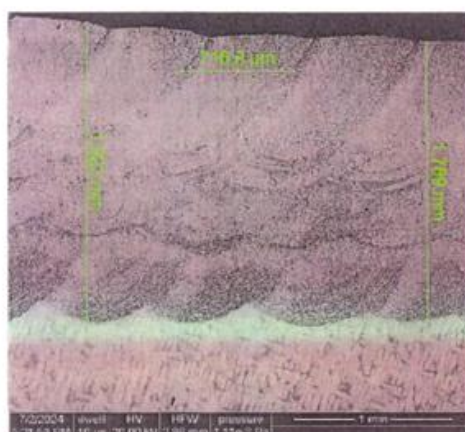
- при значениях мощности 270–310 Вт в наплавленном слое наблюдаются дефекты структуры только в виде пор (27–35 дефектов на 3 см^2) (рис. 2, б);
- при значениях мощности 310–350 Вт в наплавленном слое наблюдаются дефекты структуры в виде единичных пор (10–20 дефектов на 3 см^2) (рис. 2, в).



а



б



в

Рис. 2. Микроструктура наплавленных образцов по режимам:

- а — структура для режимов наплавки 210–270 Вт; б — структура для режимов наплавки 270–310 Вт;
в — структура для режимов наплавки 310–350 Вт

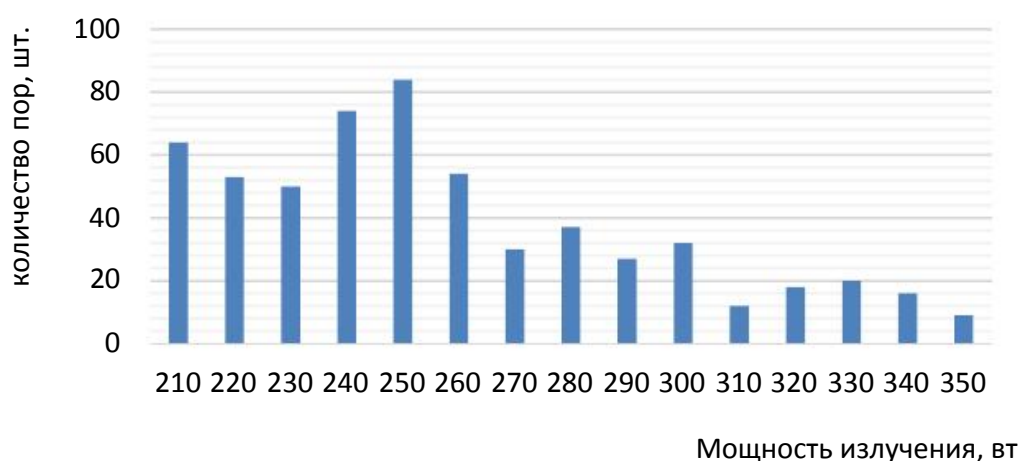


Рис. 3. График зависимости количества дефектов от мощности лазерного излучения

Рентгеноспектральный анализ показал наличие диффузионной переходной зоны между основным металлом и материалом наплавки (рис. 4). По элементному распределению удалось определить толщину переходной зоны, составляющую около 400 мкм, и зону термического влияния (ЗТВ) аналогичной протяженности. Концентрационный профиль свидетельствует о диффузии элементов: содержание никеля (Ni) снижалось, начиная с 900 мкм в направлении к наплавке, тогда как концентрации кобальта (Co), хрома (Cr) и алюминия (Al) возрастали. Такая картина указывает на наличие интенсивных процессов межфазной диффузии, обеспечивающих механическое и металлургическое сцепление наплавки с основным металлом. Это особенно важно для термонагруженных деталей, где высокая прочность границы раздела критически важна для надежности в эксплуатации.

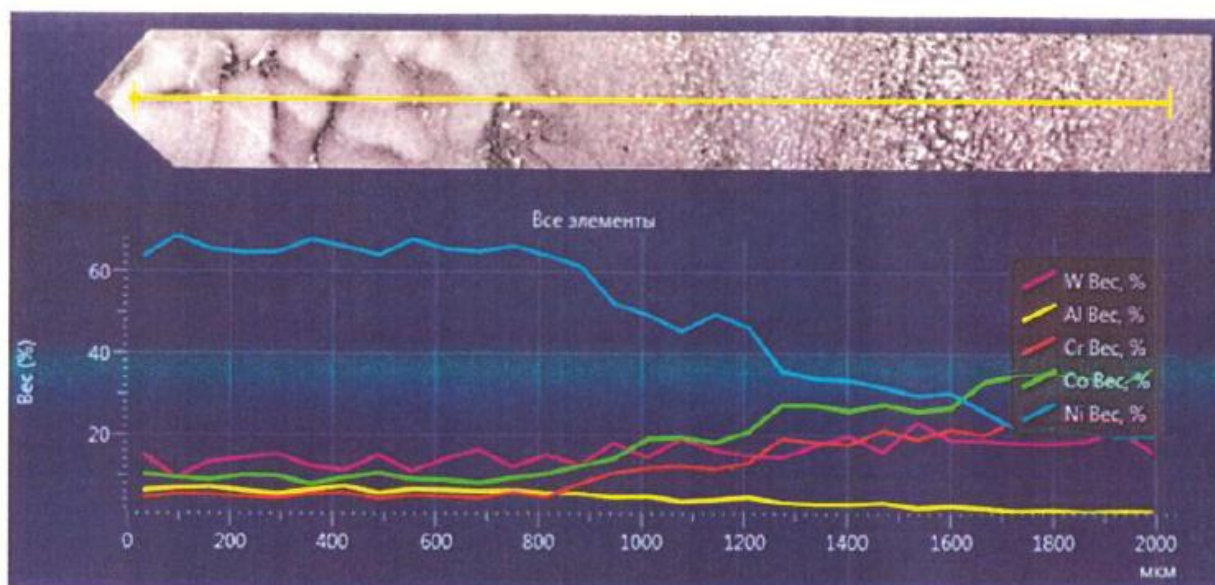


Рис. 4. Рентгеноструктурный анализ образца, наплавленного по режиму № 15

После процесса лазерной наплавки проводился отжиг, направленный на снятие напряжений, стабилизацию структуры и диффузионное выравнивание на границе раздела наплавки и основного металла [9, 10]. Для снятия остаточных напряжений, возникающих при лазерной наплавке, образцы подвергались поэтапной термообработке в вакуумной печи. Режим включал последовательный подъем температуры с выдержками на стадиях 400, 675 и 1000 °C при общей продолжительности цикла более 5 часов. Наличие технологических дефектов в наплавленном слое спровоцировало образование трещин. Появление трещин зафиксировано в образцах, содержащих несплавления между треками.

Обсуждение полученных результатов. Полученные результаты демонстрируют закономерное влияние мощности лазерного излучения на формирование структуры и плотности наплавленного слоя. Наличие дефектов свидетельствует о нарушениях параметров процесса. Образование несплавлений, возможно, связано с выбором траектории движения лазерной головки и параметров перекрытия треков, что приводит к локальному перенасыщению расплавленной ванны порошком, особенно в зонах разворота и стыковки треков, в результате чего возникает неравномерное плавление частиц и ухудшение условий для формирования межваликовых связей.

Результаты рентгеноспектрального анализа подтвердили наличие выраженной диффузионной зоны между основным металлом (ЖС26-ВИ) и наплавкой. Установлен плавный переход концентраций элементов, что свидетельствует о формировании металлургически прочного соединения. Полученная градиентность свидетельствует о хорошем сцеплении наплавленного материала с материалом лопатки без возникновения резких фазовых переходов.

Дополнительные испытания показали, что несплавления в результате проведения термической обработки (отжига) приводят к образованию трещин в зоне наплавленного слоя. Вероятной причиной является концентрация напряжений в зонах дефектов, которые при термическом расширении становятся инициаторами разрушения. Образцы, не подвергавшиеся отжигу, в аналогичных условиях не демонстрировали трещинообразования.

В дальнейшем для повышения качества наплавленного слоя планируется проведение дополнительных испытаний с реализацией траектории перемещения лазера вдоль контактной поверхности. Такой подход направлен на снижение риска образования несплавлений, особенно в зонах разворотов, и должен обеспечить более равномерное распределение тепловой нагрузки в направлении основного напряженного участка детали.

Заключение. Установлено, что мощность лазерного излучения напрямую влияет на качество наплавленного слоя: при мощности ниже 270 Вт наблюдается высокая плотность дефектов (60–70 пор и несплавлений на 3 см²), тогда как увеличение мощности до 310–350 Вт снижает количество дефектов до 10–20 на 3 см². Это связано с улучшением расплавления порошка и основного материала, что способствует формированию однородной структуры. Диффузионная переходная зона между наплавленным слоем

и основным материалом составила ~400 мкм, что обеспечило прочное металлургическое сцепление за счет диффузии элементов (Co, Cr, Al в область основного металла и Ni в наплавленный слой). Дефекты в наплавленном слое становятся концентраторами напряжений, приводящими к трещинообразованию после термообработки.

Список источников

- [1] Мигунов В.П., Чатынян Л.А., Иванов Е.В., Антонова Г.С., Соловьева Т.А. Износостойкие и антифрикционные материалы для узлов трения. *Авиационная промышленность*, 1982, № 8, с. 71–73.
- [2] Петрик И.А., Перимировский И.А. Дальнейшее развитие технологии упрочнения бандажных полок лопаток турбины из жаропрочных сплавов. *Технологические системы*, 2001, № 3, с. 90–92.
- [3] Пейчев Г.И., Замковой В.Е., Андрейченко Н.В. Сравнительные характеристики износостойких сплавов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2010, № 9, с. 102–104.
- [4] Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего. *Автоматическая сварка*, 2013, № 10, с. 23–32.
- [5] Евгенов А.Г., Неруш С.В., Василенко С.А. Получение и опробование мелкодисперсного металлического порошка высокохромистого сплава на никелевой основе применительно к лазерной LMD-наплавке. *Труды ВИАМ*, 2014, № 5, ст. 04. <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-5-4-4>
- [6] Неруш С.В., Евгенов А.Г., Ермолаев А.С., Рогалев А.М. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава на никелевой основе для лазерной LMD-наплавки. *Вопросы материаловедения*, 2013, № 4, с. 98–107.
- [7] Фарафонов Д.П., Базылева О.А., Рогалев А.М. Сплавы для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток ГТД. *Труды ВИАМ*, 2016, № 9, ст. 07. <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-7-7>
- [8] Жеманюк П.Д., Клочихин В.В., Лысенко Н.А., Наумик В.В. Структура и свойства литых лопаток авиационных двигателей из жаропрочного никелевого сплава ЖС26-ВИ после горячего изостатического прессования. *Вестник двигателестроения*, 2015, № 1, с. 139–146.
- [9] Рыбников А.И., Гецов Л.Б. Термическая обработка лопаток с покрытиями. *МиТОМ*, 1995, № 9, с. 21–25.
- [10] Филатов М.А., Судаков В.С. Влияние термической обработки на структуру и свойства жаропрочных никелевых сплавов. *МиТОМ*, 1995, № 6, с. 12–15.