

УДК 621.373.826; 621.791.92; 621.431.75

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ НАПЛАВКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Климов В.Г.

*Самарский государственный технический университет,
СамГТУ, ул. Молодогвардейская, 244, Самара, 443100, Россия
e-mail: vadim3945@yandex.ru, ugs@kuznetsov-motors.ru*

Рассматривается возможность использования высокотемпературных порошковых припоев в качестве износостойких слоев, наносимых посредством лазерной импульсной наплавки, как альтернатива классическим износостойким композитам с примесью карбида вольфрама. Данные материалы апробируются для последующего восстановления высоты пера лопатки турбостартера турбовинтового авиационного двигателя НК-12МП и придания торцевой кромке износостойких свойств. На основе проведенных сравнительных исследований на электронном микроскопе и микротвердомере, испытаний на локальный абразивный износ и анализа различных порошковых материалов (ВПр11-40Н, ВПр24, ВПр27, Рок-Дюр 6740) при импульсной лазерной порошковой наплавке подтверждена пригодность некоторых порошковых припоев в качестве износостойких слоёв при восстановлении контактных поверхностей лопаток турбины.

Ключевые слова: лазерная наплавка, самофлюсующиеся припои, порошковая ванна, микротвердость, электронная микроскопия, локальный абразивный износ.

Введение

Наплавка как метод нанесения покрытий с определенными физико-механическими свойствами остается наиболее актуальным и распространенным методом повышения ресурса работы деталей машин.

Существуют различные способы восстановления геометрии лопаток газотурбинного двигателя (ГТД). Весьма распространен метод дуговой наплавки, описанный ещё в 1976 г. в работах И.А. Пермиловского (ИЭС им. Е.О. Патона), в 2000 г. — в патенте В.И. Колосова (ОАО «Пермский моторный за-

вод»), в 2004 г. — Л.И. Сорокиным (ФГУП «ВИАМ») [2—5]. Несмотря на доступность данного метода, он не лишен ряда недостатков, таких, как большая зона термического влияния и сложность при наплавке краевых элементов. Вследствие этого дуговая наплавка в среде защитного газа не получила широкого распространения при восстановлении дефектных мест жаропрочных лопаток из литейных сплавов типа ЖС. По причине перегрева лопатки от электрической дуги в зоне термического влияния образуется область обильной коагуляции

и растворения упрочняющей γ' -фазы, что приводит к разупрочнению материала подложки и образованию трещин в процессе наплавки и при последующей работе [1]. Способы борьбы с данной проблемой были описаны в работе Л.И. Сорокина [6], но сам автор отмечает сложность применения подобной технологии, ограничивающую её использование на производстве.

Альтернативным способом борьбы с износом деталей газовой турбины стала пайка высокотемпературными припоями в среде защитных газов или вакуума, что позволяет исключить образование трещин в области исправления дефекта [7, 8]. Объясняется это тем, что пайка происходит при температуре ниже структурных преобразований жаропрочных никелевых литейных сплавов.

Сегодня большинство крупных зарубежных компаний и отечественных производств успешно используют высокотемпературную пайку в защитных средах для ремонта узлов газовых турбин (рабочие лопатки, сопловые аппараты) и других деталей горячего тракта [9, 10].

Процесс пайки с общим нагревом происходит следующим образом: производят разделку дефектного места и подготовку поверхности основного материала под пайку. В разделку помещают порошок припоя на никелевой основе или смесь с порошком основного материала в виде пасты, замешанной с использованием 5%-ного раствора акриловой смолы БМК-5 на ацетоне. Затем осуществляется нагрев в печи с защитной атмосферой до температуры плавления припоя и определенной выдержкой. Стоит также обратить внимание, что при диффузионной пайке в вакууме из-за длительного термического цикла жаропрочность и пластичность поверхностного слоя основного материала детали горячего тракта снижаются, что, в свою очередь, снижает срок ее эксплуатации [10].

В настоящее время в промышленность внедряются технологии восстановительной наплавки, ранее не имевшие широкого распространения. Одной из таковых является лазерная наплавка, для которой характерна наименьшая зона термического воздействия среди всех остальных способов восстановления рабочих поверхностей деталей машин. В данной работе в исследованиях использовались лопатки, полученные методом литья в керамические оболочковые формы с равноосной кристаллизацией из сплава ЖС6-К (ТУ 1-809-1025-98, табл. 1).

Износ лопатки турбостартера (ТС) происходит по торцу пера лопатки и имеет абразивный характер, согласно ранее опубликованным материалам

[11, 12]. На основании вышесказанного при восстановлении геометрии пера была поставлена задача повышения стойкости его верхней кромки к абразивному изнашиванию.

На входе в турбину стартера турбовинтового двигателя НК-12МП температура составляет около 900 °С. Поэтому, учитывая невысокие температурные нагрузки на торец пера лопатки турбостартера (ТС), в качестве материала для его восстановления были выбраны порошковые высокотемпературные никелевые припои типа ВПр, разработанные ФГУП «ВИАМ» (г. Москва), и композитный порошковый материал из серии «Сфекорд Рок-Дюр» производства ООО «СП Техникорд» (г. Москва). В работе рассмотрена возможность использования высокотемпературных никелевых припоев в качестве материала для износостойких наплавки как альтернатива классическим композитам с примесью карбида вольфрама.

Методика исследований

В работе исследовалась наплавка следующих порошковых материалов:

— ВПр11-40Н (ТУ 1-809-108-91). Самофлюсующийся композитный порошковый литой высокотемпературный припой на основе никеля, дисперсность 100—250 мкм (табл. 1). Температура плавления 980—1020 °С. Обладает высоким уровнем самофлюсации;

— ВПр24 (ТУ 1-595-4-1218-2011). Самофлюсующийся порошковый литой высокотемпературный припой на основе никеля, дисперсность 100—315 мкм (табл. 1). Температура плавления 1150—1190 °С;

— ВПр27 (ТУ 1-595-4-1218-2011). Самофлюсующийся порошковый литой высокотемпературный припой на основе никеля, дисперсность 100—315 мкм (табл. 1). Температура плавления 1030—1080 °С;

— Рок-Дюр 6740 (ТУ 1526-001-86297481-2008). Композиционный материал на основе сплава Ni с литым карбидом вольфрама (WC-W₂C), плакированного сплавом на основе Ni. Температура плавления 980—1050 °С. По утверждению производителя, обладает высокой абразивной износостойкостью в сочетании с сопротивлением давлению, механическим и тепловым ударам, коррозии и кавитации.

Морфология используемых в наплавке порошков представлена на рис. 1.

Импульсная лазерная наплавка производилась на установке ALFA-300 (производство ООО «Лазер-Форм», г. Зеленоград, Россия). Перо лопатки помещалось в ванну с наплавляемым порошком. Лопатка размещалась в порошковой насыпи так, что-

Таблица 1

Классификация и рабочая температура материалов

Материал	ГОСТ, ТУ	Классификация	Основные компоненты	Рабочая температура, °С
ЖС6-К	ТУ 1-809-1025-98	Жаропрочный литейный сплав	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)	до 900
ВПр24	ТУ 1-809-838-89	Высокотемпературный порошковый припой	Ni-Co-Cr-Nb-W-Al-Mo-Ti-Si-B-C	до 1050
ВПр27	ТУ 1-595-4-1021-2007	Высокотемпературный порошковый припой	Ni-Co-Cr-W-Si-Mo-Al-Nb-B-C	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)]	До 700

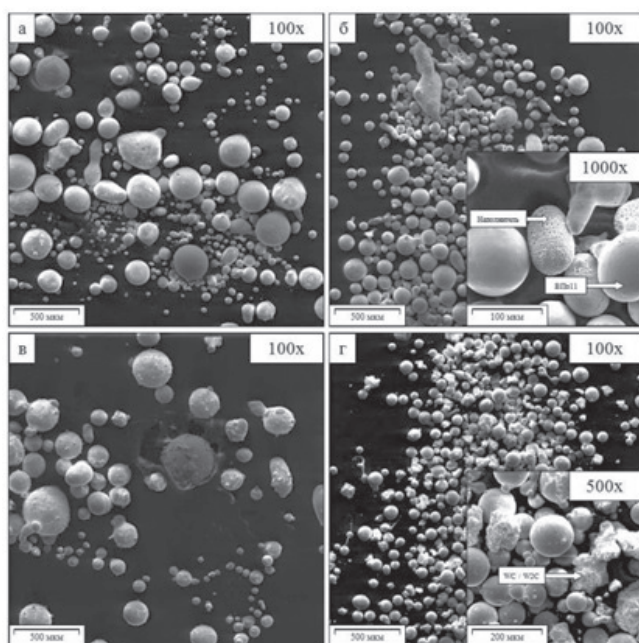


Рис. 1. Морфология порошков: а — ВПр27; б — ВПр11-40Н; в — ВПр24; г — Рок-Дюр 6740

бы ее перо и поверхность порошковой насыпи находились на одном уровне. Схема данного процесса показана на рис. 2 [11].

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 PrüfmaSchinen GmbH» (Австрия) DuraScan-10 на базе центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ) предприятия ПАО «Кузнецов».

Испытания на абразивный износ были проведены в лаборатории наноструктурированных покрытий СамГТУ на установке Универсал-1А, со-

бранной на базе сверлильного станка СС-13/350, обеспечивающей через систему датчиков и средств регистрации непрерывный контроль нормальной нагрузки и момента трения.

Результаты исследований

На рис. 3,а представлены: лопатка ТС двигателя НК-12МП, после наработки в двигателе с механическим абразивным износом кромки пера; лопатка, восстановленная лазерной порошковой наплавкой по торцу пера (рис. 3,б), а также восстановленная лопатка после механической обработки и травления для выделения наплавленного слоя (рис. 3,в).

Важным элементом конструкции турбостартера является металлокерамическая вставка как ответная часть к перу лопатки и имеющая твердость 46–94 HV по Викерсу. Вставку получают методом порошкового спекания с использованием графитового и никелевого порошка, а также кремния. При сборке зазор между лопаткой и вставкой выдерживается на уровне 0,6–0,8 мм. Однако при выходе на рабочую температуру (900 °С) за счет теплового расширения и центробежной силы зазор между лопаткой и вставкой уменьшается практически до нуля. Кроме того, при длительном воздействии температуры твердость вставки многократно возрастает — в отработанной металлокерамике твердость отдельных участков возрастает до 58 HRC (690–720 HV). Как показал анализ отработанных лопаток, перо лопатки имеет механический абразивный износ, о чем свидетельствуют явно выраженные острые края изношенных областей.

На рис. 4 представлена микроструктура образцов восстановленных лопаток ТС.

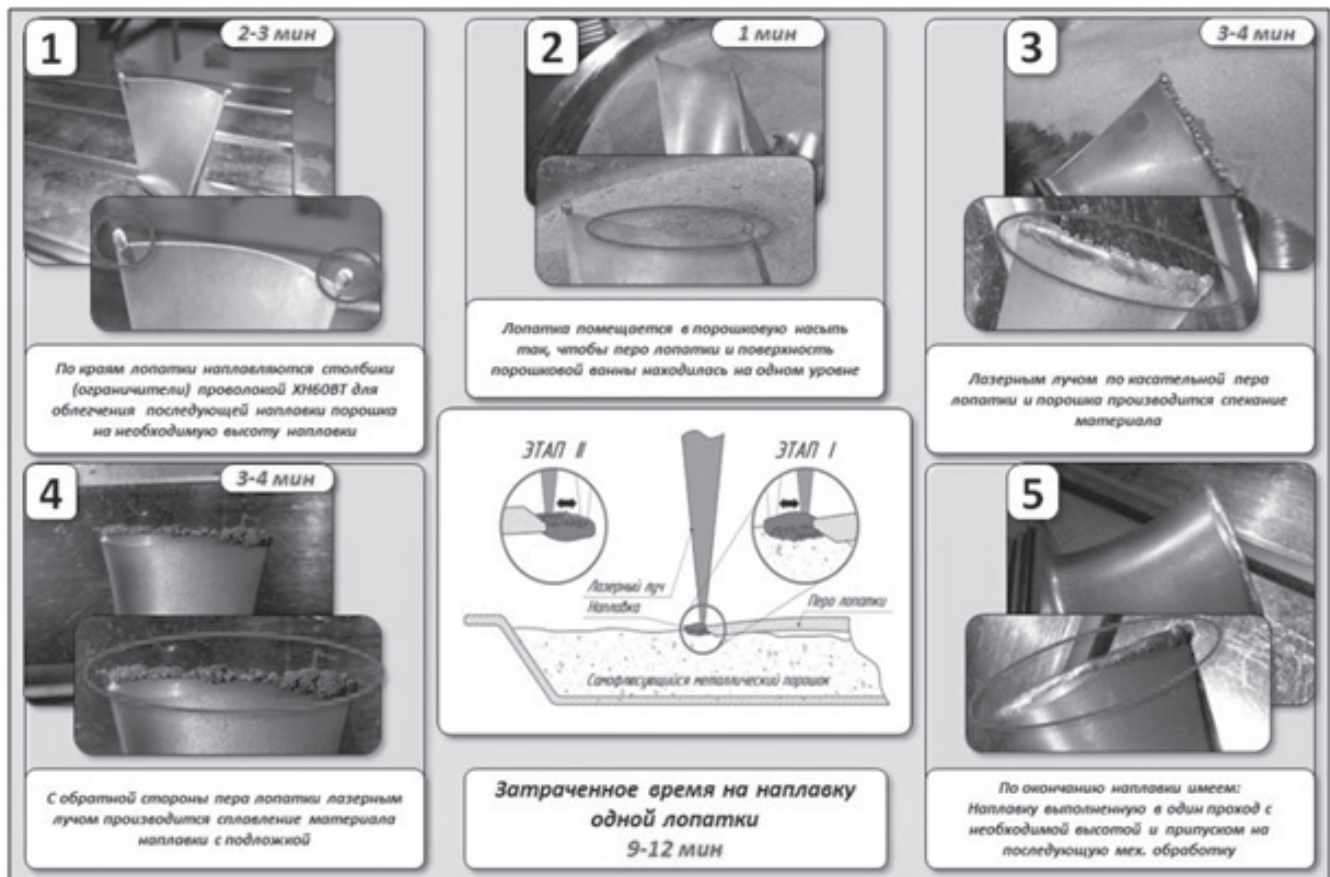
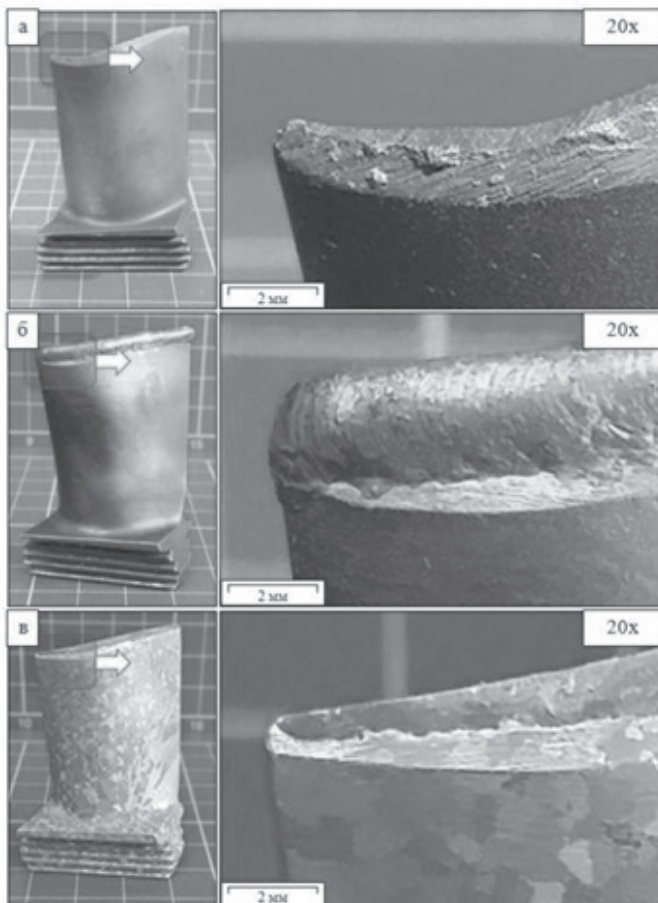


Рис. 2. Схема процесса импульсной лазерной наплавки в порошковой ванне



Зоны наплавки припоев ВПр11-40Н и ВПр24 имеют схожую структуру, представляющую собой сеть мелких аустенитных зерен на основе никеля размерами не более 10 мкм (рис. 4, а, б), по границам которых распределяются мелкодисперсные интерметаллиды на основе Cr, W и Nb. При наплавке ВПр27 (рис. 4, в) формируется ещё более мелкая структура, также схожая со структурой материалов, описанных выше. Из анализа микроструктуры можно сделать вывод, что лазерное излучение, как метод нанесения покрытия, формирует мелкодисперсную структуру наплавляемого порошкового материала припоев с предположительно интерметаллидной и карбидной сеткой и минимальным влиянием на структуру основного материала подложки (лопатки ТС).

Наплавка композитного порошка Рок-Дюр 6740 (рис. 4, д) формирует структуру с более выделенными в размере карбидами (WC / W_2C) размером порядка 20—80 мкм и равномерно распределенной эвтек-

Рис. 3. Лопатка ТС на разных стадиях: а — после наработки с механическим износом кромки пера; б — с наплавкой; в — обработанная после наплавки и травленная для выделения восстановленной области

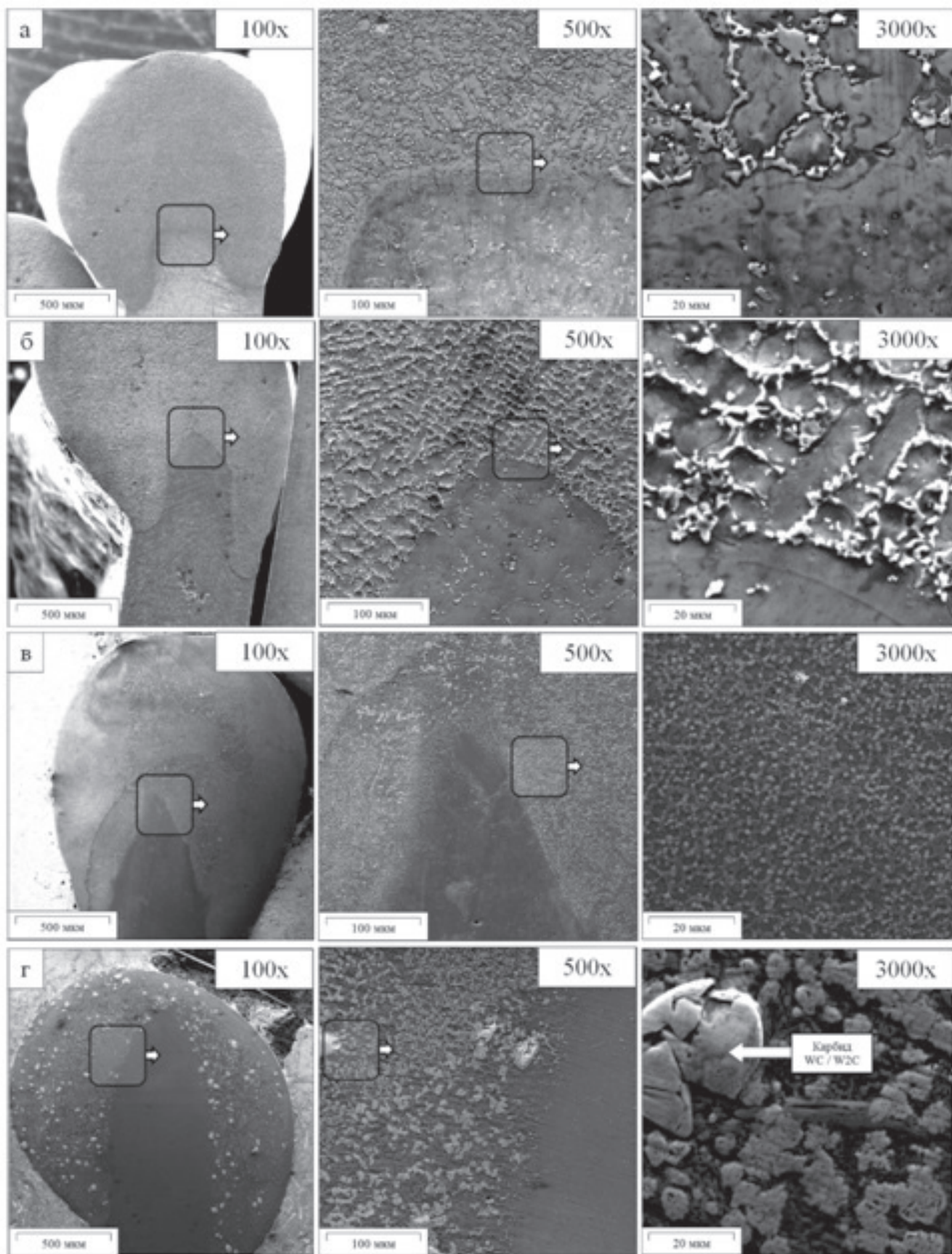


Рис. 4. Микроструктура зон лазерной импульсной наплавки при восстановлении лопатки ТС: *а* — наплавка порошка ВПр11-40Н; *б* — наплавка порошка ВПр24; *в* — наплавка порошка ВПр27; *г* — наплавка порошка Рок-Дюр 6740

тикой W по Ni-Co матрице, образовавшийся в результате распада карбида.

В табл. 2 приведены результаты измерения микротвердости подготовленных шлифов наплавки на лопатки ТС.

ным порошком дисперсностью 2–3 мкм. Площадь трения составляла $1,57 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

На основании проведенных испытаний установлено (табл. 3), что приемлемой износостойкостью, сравнимой со стойкостью карбидосодержащего

Таблица 2

Показания твердости порошковой наплавки

Материал	ВПр11-40Н	ВПр24	ВПр27	Рок-Дюр 6740
Средняя твердость по площади наплавки, HV	490 – 510	690 – 740	400 – 690	330 – 390
Тип упрочняющей фазы	Интерметаллиды и карбиды на основе Cr	Интерметаллиды на основе Cr, W и Nb	Интерметаллиды на основе Cr и W	Карбид вольфрама (WC / W ₂ C)
Твердость упрочняющей фазы, HV	Невозможно точно определить ввиду малого размера фазы			1500 – 2300

После наплавки высокотемпературных порошковых припоев наблюдался существенно меньший разброс в распределении твердости по всей толщине наплавки по сравнению с износостойким материалом Рок-Дюр 6740, что обусловлено образованием в наплавленной зоне мелкодисперсной структуры, содержащей интерметаллиды и мелкие карбиды.

Восстановленные лазерной наплавкой лопатки подвергались механической обработке для придания ей первоначального профиля. По результатам рентгеновского и люминесцентного контроля восстановленных лопаток, проведенных в лаборатории НМК предприятия ПАО «Кузнецов», не было выявлено ни внешних (трещины), ни внутренних дефектов (поры, несплавления).

Испытания на абразивный износ проводились локально в участке зоны наплавки, материал контртела — трубка из стали 40Х (закалка до HRC 46-48) с внешним диаметром 6 мм и толщиной стенки 1 мм. Испытания проходили при нормальной нагрузке в 30 кгс в течение 15 минут с частотой вращения шпинделя 600 об/мин. При испытаниях использовалась алмазная паста АСМ-3/2-НОМГ, соответственно износ образца осуществлялся алмаз-

материала Рок-Дюр 6740, обладают порошковые припой ВПр11-40Н и ВПр27. Стоит также учесть, что после обработки шлифованием припуска наплавки остается относительно небольшая зона износостойкого слоя. В случае использования для реставрации геометрии тела лопатки материала Рок-Дюр 6740 его неравномерно распределенная карбидная фаза (WC / W₂C) может оказаться в малом количестве в износостойком слое, что снизит общую стойкость восстановленной кромки. Формируемая мелкодисперсная структура и равномерно распределенная по площади наплавки упрочняющая фаза в жаропрочных никелевых припоях позволяет сохранить общую стойкость к износу кромки пера лопатки ТС после шлифования.

Вследствие того, что порошковый припой ВПр11-40Н показал наилучшие результаты по износостойкости, были проведены дополнительные исследования различных состояний припоя для выявления свойств его упрочняющей фазы. Стоит учесть, что припой ВПр11-40Н является механической смесью припоя ВПр11 (60%) и наполнителя (40%) на никелевой основе с незначительными добавками других элементов (рис. 5).

На рис. 6 представлена микроструктура подготовленных шлифов гранул порошкового припоя и

Таблица 3

Скорость локального абразивного изнашивания материалов

Материал	Скорость износа, мкм/час	Время проведения испытаний, мин
ЖС6-К (основной материал лопатки ТС)	323,5±31	15
ВПр11-40Н	114,5±11	
ВПр24	473,5±32	
ВПр27	236±50	
Рок-Дюр 6740	161,5±15	

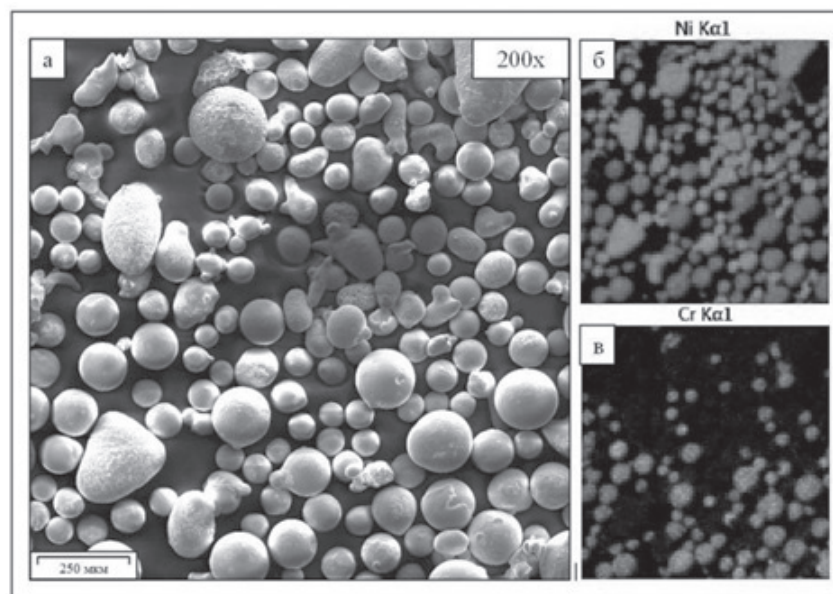


Рис. 5. Порошковый высокотемпературный припой ВПр11-40Н: *а* — внешний вид механической смеси припоя ВПр11-40Н; *б* — элементная карта с выделением никельсодержащих частиц (наполнитель 40Н); *в* — элементная карта с выделением хромосодержащих частиц (припой ВПр11)

образцов восстановленных лопаток ТС при помощи порошка ВПр11-40Н. Зона наплавки припоя ВПр11-40Н имеет глобулярную зёрненную структуру, свойственную для аустенита, с расположенными сложными карбидами на основе Cr по границе никелевых зерен (рис. 6, в), по границам которых распределяются мелкодисперсные интерметаллиды на основе Cr. В структуре изначального порошкового материала можно наблюдать множественные мелкодисперсные интерметаллидные образования с распределенными карбидными включениями хрома (рис. 6, а). Паяная структура припоя, в отличие от вышеописанных, изобилует ярко выраженными крупными карбидами хрома и эвтектикой на их основе (рис. 6, б). Из анализа разных фазовых состояний припоя ВПр11-40Н можно заключить, что, чем ниже скорость охлаждения расплава, тем более крупные карбиды на основе хрома образует структура. Также стоит отметить, что ни одна из восстановленных при помощи ВПр11-40Н зон не подвержена седиментации карбидной фазы, которая свойственна наплавкам, с использованием порошков с изначальным содержанием фракции карбида вольфрама.

В табл. 3 приведены результаты измерения микротвердости подготовленных шлифов различных структур ВПр11-40Н.

Исходя из результатов измерений микротвердости, можно заключить, что лазерная наплавка формирует структуру с равномерной твердостью по площади наплавки подобно гранулам изначального порошкового материала.

Выводы

1. Формируемая структура жаропрочных никелевых припоев при лазерной импульсной наплавке обладает равномерной твердостью по площади всего нанесенного слоя.
2. По результатам проведенных испытаний на локальный абразивный износ установлено, что припой ВПр11-40Н и ВПр27 обладают приемлемой износостойкостью, сравнимой со свойствами классического износостойкого материала Рок-Дюр 6740 с включениями карбида вольфрама (WC / W_2C).
3. Формируемая мелкодисперсная структура и равномерная по площади восстановленного слоя упрочняющая фаза в жаропрочных никелевых

Таблица 4

Показания твердости порошковой наплавки

Структура ВПр11-40Н	Изначальный порошковый материал ВПр11	Изначальный порошковый материал наполнителя	Лазерная наплавка	Паяная структура
Средняя твердость по площади наплавки, HV	760 – 780	320-380	490 – 550	340 – 670
Твердость карбидов на основе Cr, HV	1550-2590			

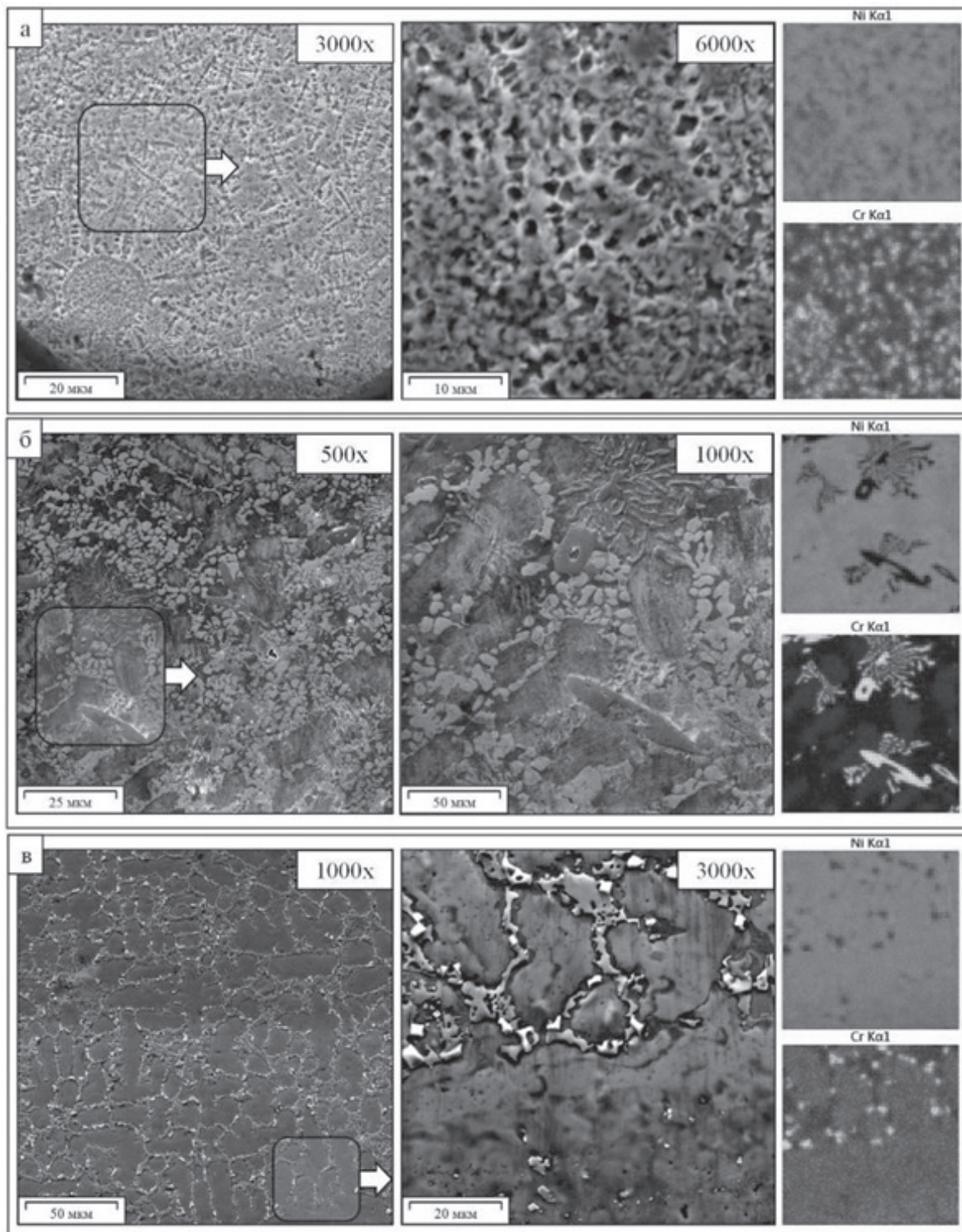


Рис. 6. Структура гранулы высокотемпературного припоя ВПр11-40Н: *а* — структура порошка припоя ВПр11; *б* — структура припоя ВПр11-40Н после печной пайки в вакууме; *в* — структура припоя ВПр11-40Н после лазерной импульсной наплавки

припоях ВПр11-40Н и ВПр27 предположительно позволит сохранить общую стойкость к износу кромки пера лопатки в работе, даже при небольшом объеме наплавки после удаления припуска. Также стоит отметить, что ни одна из восстановленных при помощи порошковых припоев зон не подвер-

жена седиментации упрочняющей фазы, которая свойственна наплавкам, с использованием порошков с изначальным содержанием фракции карбида вольфрама.

Библиографический список

1. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Назаркин Р.М., Колодочкина В.Г., Фесенко Т.В. Структура и свойства монокристаллов жаропрочного никелевого сплава, содержащего рений и рутений // *Металлургия машиностроения*. 2013. № 1. С. 12-18.
2. Пермиловский И.А., Гейченко В.С., Фруман И.И. Восстановление наплавкой турбинных лопаток авиационных двигателей // *Автоматическая сварка*. 1976. № 5. С. 54-56.
3. Пермиловский И.А., Казанцева Н.А. Физико-механические свойства наплавленных карбидохромовых сплавов // *Автоматическая сварка*. 1976. № 4. С. 52-54.
4. Колосов В.И. Способ восстановления длины пера лопаток компрессора газотурбинного двигателя и устройство для его осуществления // Патент РФ 2153965. Бюл. №1, 27.09.1999.
5. Сорокин Л.И. Аргодуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов // *Сварочное производство*. 2004. № 7. С. 20-26.
6. Сорокин Л.И., Лукин В.И., Багдасаров Ю.С. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6 // *Сварочное производство*. 1997. № 6. С. 12-17.
7. Корниенко А.Н., Жадкевич А. М. Состояние и проблемы внедрения пайки для ремонта лопаток газотурбинных двигателей // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2005. № 10. С. 9-12.
8. Квасницкий В.Ф. Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении. — Л.: Судостроение, 1986. — 224 с.
9. Ключников И.П., Гейкин В. А. Ремонт высоконагруженных деталей и узлов горячего тракта ГТД методом высокотемпературной пайки // *Пайка. Современные технологии, материалы, конструкции*. — М.: ЦРДЗ. 2001. Т. 2. С. 19-24.
10. Орлов А.В., Березников Ю.Н., Самсонова Т.С. Ремонт деталей газовых турбин методами пайки // *Энергомашиностроение*. 1984. № 2. С.33-34
11. 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.
12. Климов В.Г. Сравнение методов восстановления геометрии пера лопаток турбины из жаропрочных сплавов // *Вестник Московского авиационного института*. 2016. Т.23. №1. С. 86-97.

IMPLEMENTING LASER PULSE BUILDUP FOR GTE TURBINE ROTOR BLADES RECONDITIONING PROCESS DESIGN DEVELOPMENT

Klimov V.G.

Samara State Technical University,
SamSTU, 244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russia
e-mail: vadim3945@yandex.ru, ugs@kuznetsov-motors.ru

Abstract

The gas turbine engine advancement goes hand in hand with the development of its basic component, namely, gas turbine as the key source of efficiency enhancement of the engine in aggregate. With each turn of gas turbine development, materials and technologies used for its manufacturing became more and more complicated and, as a consequence, expensive. Russia is one of global manufacturers of gas turbine engines.

The cost of engines for aviation and power industry applications is considerably high. Thus, on this background its reduction remains the main criterion of manufacturer's competitiveness on the market. Besides, we should bear in mind that the gas turbine engines maintenance costs in the course of the engine life might exceed its original cost. Without effective maintenance technologies, manufacturing would incur permanent losses. One of the basic specifics of gas turbine engines consists in their significantly high production costs of a

number of their parts and subassemblies with relatively short lifetime, requiring permanent replacement. Rotor blades present precisely these parts. They can be damaged by a great number of factors from changes in the structure to loss of geometry. The latter is the most frequent factor even in the case of insignificant geometry loss. From the maintenance technologies viewpoint turbine blades restoration is the most cost-effective, compared to the other parts of the engine. But the complexity of this task remains the major obstacle to its realization.

This article discusses the possibility of using high-temperature solder powders as wear-resistant layers applied by laser pulse buildup, as an alternative to classic wear-resistant composites with tungsten carbide admixture. These materials are undergoing testing for further pen height recovery on the example of the turbine blade of the turboprop starter for NK-12MP aircraft engine, and attaching wear-resistant to its end edge.

Based on the conducted studies with Tescan VEGA3 LM electron microscope and Hardness DuraScan-10 micro-hardness meter, together with local abrasive wear tests and various powder materials, such as VPr11-40N, VPr24, VPr27 Rock-Dur 6740, analysis while pulse laser powder buildup, the authors confirmed the applicability of several solder powders as wear-resistant layers for turbine blades contact surfaces recovery. Further, comparative studies of the basic material, soldered and built-up structures of VPr11-40N (having the best figures) solder were conducted to detect hardening wear-resistant phases. The cooling rate dependencies of shaping and VPr11-40N solder strengthening phase size were revealed.

Keywords: laser buildup, self-fluxing solders, powder bath, micro-hardness, electron microscopy, local abrasive wear.

References

1. Petrushin N.V., Elyutin E.S., Nazarkin P.M., Kolodochkina V.G., Fesenko T.V. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2013, no. 1, pp. 12-18.
2. Permilovskii I.A., Geichenko V.S., Fruman I.I. *Avtomaticheskaya svarka*, 1976, no. 5, pp. 54-56.
3. Permilovskii I.A., Kazantseva N.A. *Avtomaticheskaya svarka*, 1976, no. 4, pp. 52-54.
4. Kolosov V.I. *Patent RF 2153965*, 27.09.1999.
5. Sorokin L.I. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2004, no. 7, pp. 20-26.
6. Sorokin L.I., Lukin V.I., Bagdasarov Yu.S. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 6, pp. 12-17.
7. Kornienko A.N., Zhadkevich A.M. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2005, no. 10, pp. 9-12.
8. Kvasnitskii V.F. *Svarka i paika zharoprochnykh splavov v sudostroenii* (Welding and brazing heat-resistant alloys in shipbuilding), Leningrad, Sudostroenie, 1986, 224 p.
9. Klyuchnikov I.P., Geikin V.A. *Paika. Sovremennye tekhnologii, materialy, konstruktсии*, Moscow, TsRDZ, 2001, vol. 2, pp. 19-24.
10. Orlov A.V., Bereznikov Yu.N., Samsonova T.S. *Energomashinostroenie*, 1984, no. 2, pp. 33-34.
11. Klimov V.G., Zhatkin S.S., Shchedrin E.Yu., Kogteva A.V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2015, vol. 17, no. 2-4, pp. 782-788.
12. Klimov V. G. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 86-97.