

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ПЕРА ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Климов В.Г.

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

Рассматривается процесс восстановления геометрии пера лопатки турбостартера (ТС) авиационного турбовинтового двигателя НК-12МП. Проведен сравнительный анализ четырех видов восстановления: аргонодуговой наплавкой (АрДС) проволокой ХН60ВТ; путем пайки с порошковым припоем ВПр24 в керамических формах; лазерной наплавкой с проволочной присадкой ХН60ВТ и лазерной наплавкой в порошковой ванне с припоем ВПр24. На основе проведенного сравнительного анализа методов восстановления пера лопатки установлено, что наиболее эффективной в этом случае является импульсная лазерная наплавка. При этом наплавка в порошковой ванне обеспечивает более высокую производительность процесса по сравнению с лазерной наплавкой присадочной проволокой. Выявлены основные отличия лазерной наплавки от классических методов (АрДС и пайки) восстановления геометрии лопаток турбины. Приведен сравнительный анализ структуры восстановленных слоев посредством электронной микроскопии с элементным анализом поперечных шлифов образцов. Проведено измерение КТЛР (коэффициента линейного расширения материала) материалов, участвующих в восстановлении.

Ключевые слова: лазерная наплавка, аргонодуговая наплавка, самофлюсующиеся припои, порошковая ванна, коэффициент линейного расширения, восстановительный ремонт, электронная микроскопия, элементный анализ, микротвердость, пайка.

Введение

Восстановительный ремонт является неотъемлемой составляющей эксплуатации деталей машин, и увеличение их ресурса работы считается важной задачей, связанной с экономической эффективностью производства и снижением затрат на эксплуатацию различных изделий.

Применяемые методы восстановления деталей зависят во многом от оснащенности мастерских, производственных мощностей, от числа ремонтируемых деталей и многих других факторов. Ремонт деталей может быть осуществлен несколькими способами: под ремонтный размер, сваркой и наплавкой, металлизацией, электролитическим наращиванием, электроискровым способом, с помощью токов высокой частоты, пайкой и пр.

Сварку и наплавку применяют для восстановления изношенной поверхности, при поломке деталей и устранении трещин. Широкое применение электросварки при ремонте машин объясняется существенными преимуществами этого способа: высокой эксплуатационной надежностью восстановленных деталей, простотой процесса, несложностью

оборудования, возможностью наплавки износостойких материалов, невысокой стоимостью ремонта.

Применение наплавки для нанесения покрытий с определенными физико-механическими свойствами остается наиболее актуальным и распространенным методом повышения ресурса работы деталей машин.

В ряду высокотехнологичных процессов восстановительной наплавки широко применяется лазерная наплавка, в том числе и для восстановления лопаток газотурбинных двигателей [1–3]. На рис. 1 представлена лопатка турбостартера двигателя НК-12МП после наработки и механического износа на торце пера. Данную лопатку получают литьем по выплавляемым моделям из сплава ЖС6-К (ТУ 1-809-1025-98) с крупнозернистой структурой металла (рис. 1, б). Среднее зерно в сечении составляет 2500–3500 мкм [4].

В большинстве случаев износ торца лопаток происходит из-за механического контакта с ответной деталью (специальными прирабатываемыми покрытиями, вставками, сотовыми уплотнениями и пр.) Способы восстановления лопаток очень раз-

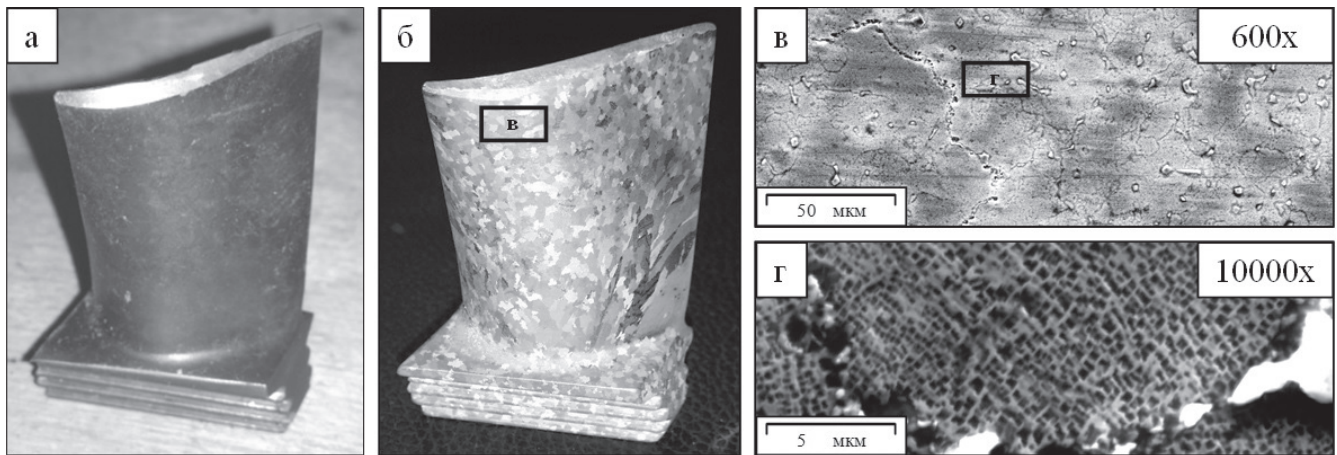


Рис. 1. Лопатка ТС двигателя НК-12МП: а — общий вид лопатки; б — общий вид лопатки после травления; в — структура лопатки под увеличением 600х; г — структура лопатки под увеличением 10000х

нообразны. Среди них используются также аргонодуговая наплавка, восстановление методом печной пайки с использованием припоя (пасты) и армированной составляющей (сетки или проволоки), а также восстановление импульсной лазерной наплавкой с присадочной проволокой. Апробирование и сравнительный анализ данных методов и были проведены на ОАО «Кузнецов».

Методика исследований

В исследованиях использовались лопатки из жаропрочного литейного сплава ЖС6-К (ХН65КМВЮТЛ), высокотемпературный порошковый припой ВПр24 и проволока из жаропрочного сплава ХН60ВТ. Характеристики материалов приведены в табл. 1.

Химический состав материалов, участвующих в наплавке, приведен в табл. 2.

Восстановление геометрии пера лопатки (высо-ты) турбостартера проводилось следующими мето-дами:

- 1) аргонодуговой наплавкой с присадкой из проволоки ХН60ВТ диаметром 0,8 мм;
- 2) печной пайкой с использованием керамиче-ских форм и высокотемпературного порошкового припоя ВПр24 дисперсностью 100—315 мкм;
- 3) импульсной лазерной наплавкой с присадоч-ной проволокой из сплава ХН60ВТ диаметром 0,5 мм;
- 4) импульсной лазерной порошковой наплавкой высокотемпературным порошковым припоем ВПр24 дисперсностью 100—315 мкм.

Наплавка на торец лопатки проводилась на ар-гонодуговом сварочном аппарате Tetrix 230 AC/DC (производство «EWM», Германия); восстановление методом печной пайки проходило в вакуумной печи

Таблица 1

Рабочая температура материалов

Материал	ГОСТ, ТУ	Классификация	Рабочая температура, °С
ЖС6-К (ХН65КМВЮТЛ)	ТУ 1-809-1025-98	Жаропрочный литейный сплав	До 1000
ВПр24	ТУ 1-809-838-89	Самофлюсующийся высокотемпературный порошковый припой	До 1050
ХН60ВТ	ТУ 14-1-997-74	Жаропрочная сварочная проволока	До 1100

Таблица 2

Химический состав материалов

Материал	Ni, %	Al, %	C, %	Si, %	Cr, %	Fe, %	W, %	Mo, %	Co, %	Ti, %	B, %	Pb, %	Nb, %
ЖС6-К	Основа	5-6	0,1-0,18	≤0,4	9,5-12,5	≤2,0	4,5-5,5	3,5-4,5	4,0-5,5	2,5-3,2	-	-	-
ВПр24	Основа	4-5	0,1-0,15	2-3	6-7	-	8,5-9,5	1,6-2	8,5-9,5	0,3-0,9	0,2-0,35	0,5	10-11
ХН60ВТ	Основа	0,5	0,1	≤0,8	23	≤4,0	13-16	3,5-4,5	-	0,3-0,7	-	-	-

сопротивления СНВЭ-2.4.2/16 (производство ЗАО «Призма», Россия); восстановление посредством импульсной лазерной наплавки — на установке ALFA-300 (производство ООО «ЛазерФорм», Россия).

В данной работе был выбран метод пайки, отличный от классических способов с использованием армирующих компонентов (проволоки или сетки) и пастообразного припоя, описанного, например, в патенте В.И. Колосова (ОАО «Пермский моторостроительный завод») [5]. Предлагаемый способ обеспечивает более простую стадию подготовки и имеет повышенный выход годных изделий. Метод заключается в использовании порошкового припоя, который засыпается на дно керамической литниковой формы (рис. 2,а) с последующей установкой в нее восстанавливаемой лопатки и проведением процесса пайки в вакуумной печи сопротивления. На рис. 2,б можно видеть результат восстановления.

В случае лазерной порошковой наплавки применялся метод восстановления из порошковой ванны. Наплавка проводилась помещением пера лопатки в ванну с наплавляемым порошком. Лопатка размещалась в порошковой насыпи так, чтобы ее перо и поверхность порошковой насыпи находились на одном уровне. Воздействие лазерным лучом осуществлялось по касательной пера лопатки и порошка. Схема процесса приведена на рис. 3. На этапе I происходит лазерное воздействие на порошок непосредственно в области прилегания его к перу лопатки, а на этапе II проводится обработка спеченного порошкового материала с противоположной стороны лопатки уже вне порошковой ванны. По предлагаемой схеме время наплавки составляло не более 10—12 мин, в то время как при наплавке проволокой оно в несколько раз выше (до одного часа, в зависимости от геометрии пера лопатки) [6].

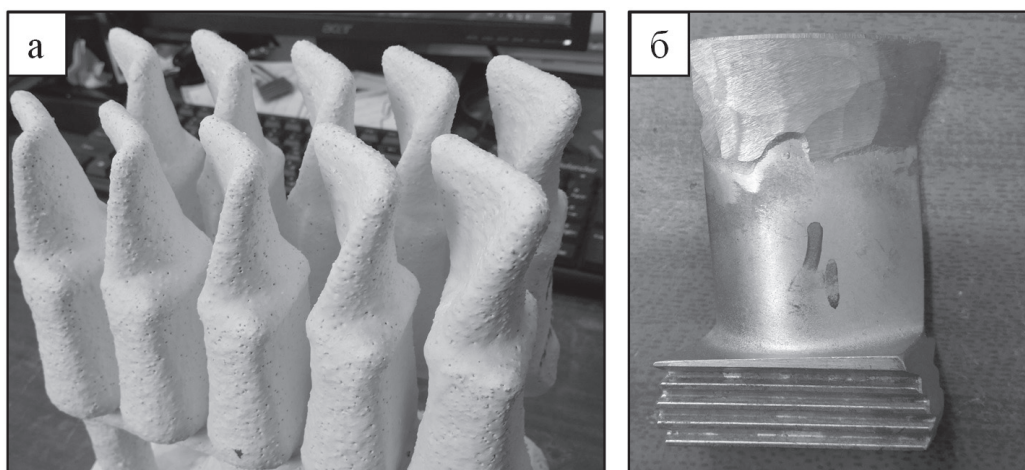


Рис. 2. Способы восстановления пера лопатки печной пайкой с использованием керамической формы: а — керамические литниковые формы; б — лопатка после процесса восстановления

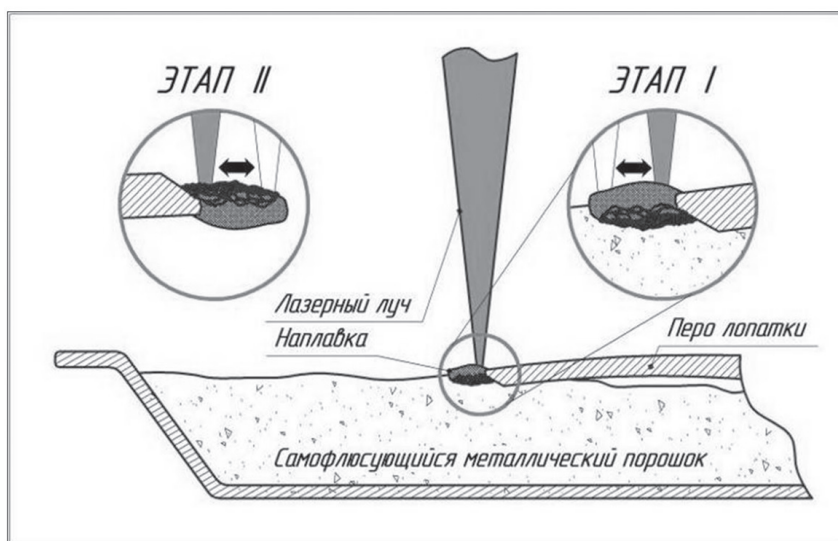


Рис. 3.Схема процесса импульсной лазерной наплавки в порошковой ванне

Восстановленные зоны исследовались на металлографическом микроскопе МИМ-8 и 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 ЦЗЛ предприятия ОАО «КУЗНЕЦОВ».

Измеренные значения по табличным данным переводились в значения твердости по Роквеллу. Рентгеновский и люминесцентный контроль проводился на базе лаборатории НМК (неразрушающих методов контроля) предприятия ОАО «КУЗНЕЦОВ».

Коэффициент линейного расширения наплавленного материала измерялся на специально собранной установке ДМК-1, позволяющей проводить измерения до 1000 °С. Рентгеновский и люминесцентный контроль проводился на базе лаборатории НМК предприятия ОАО «КУЗНЕЦОВ».

Результаты исследований и их анализ

Важным элементом конструкции турбостартера (рис. 4) является металлокерамическая вставка как ответная часть к перу лопатки, имеющая твердость 46-94 HV по Викерсу (\geq HRC по Роквеллу).

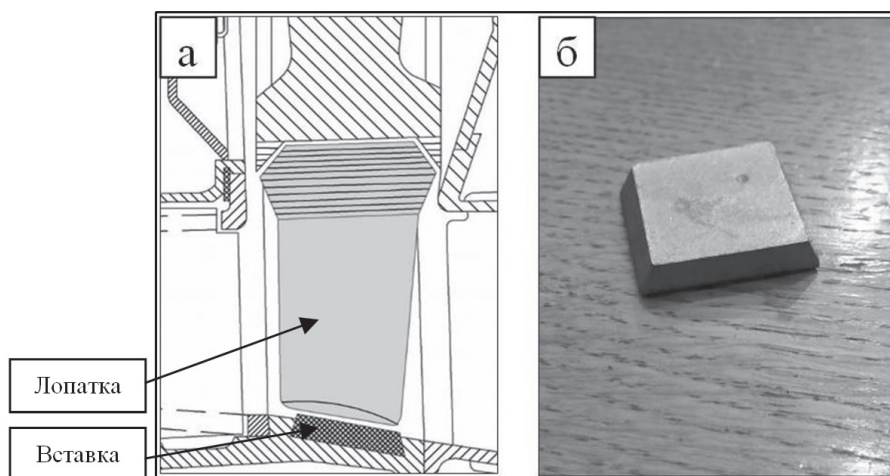


Рис. 4. Схема взаимного расположения лопатки и металлокерамической вставки: а — схема расположения; б — металлокерамическая вставка

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, под длительным воздействием температуры твердость вставки многократно возрастает. В отработанной металлокерамике при исследовании на микротвер-

дость встречались участки твердостью до 58 HRC (694 Hv). Как показал анализ отработанных лопаток, перо лопатки имеет механический абразивный износ, о чем свидетельствуют явно выраженные острые края изношенных областей (рис. 5).

Таким образом, в исследованиях при выборе режима наплавки исходили из условия, чтобы наплавленный материал имел твердость на уровне или выше твердости материала лопатки (43-45 HRC) для сохранения или улучшения износостойких свойств.

На рис. 6 представлена микроструктура образцов восстановленных лопаток ТС.

По нормам предприятия ОАО «КУЗНЕЦОВ», существует определенная структура для лопаток, допускаемых в дальнейшую работу в составе двигателя. Жаропрочные литейные никелевые сплавы, используемые для работы при высоких температурах, упрочняются высокодисперсными выделениями γ' -фазы на основе соединений Ni_3Al с упорядоченной плотноупакованной кристаллической структурой $L1_2$ [7]. Данная структура представляет собой частицы γ' -фазы кубической формы. Химическое и структурное сродство этой фазы с аустенитной матрицей, близкие коэффициенты линей-

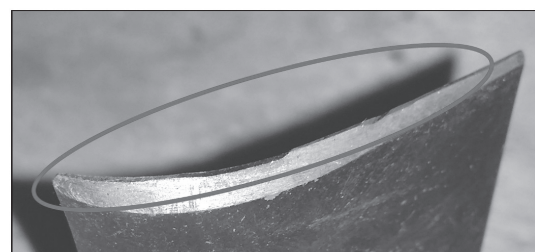


Рис. 5. Износ по торцу пера лопатки ТС с абразивным характером

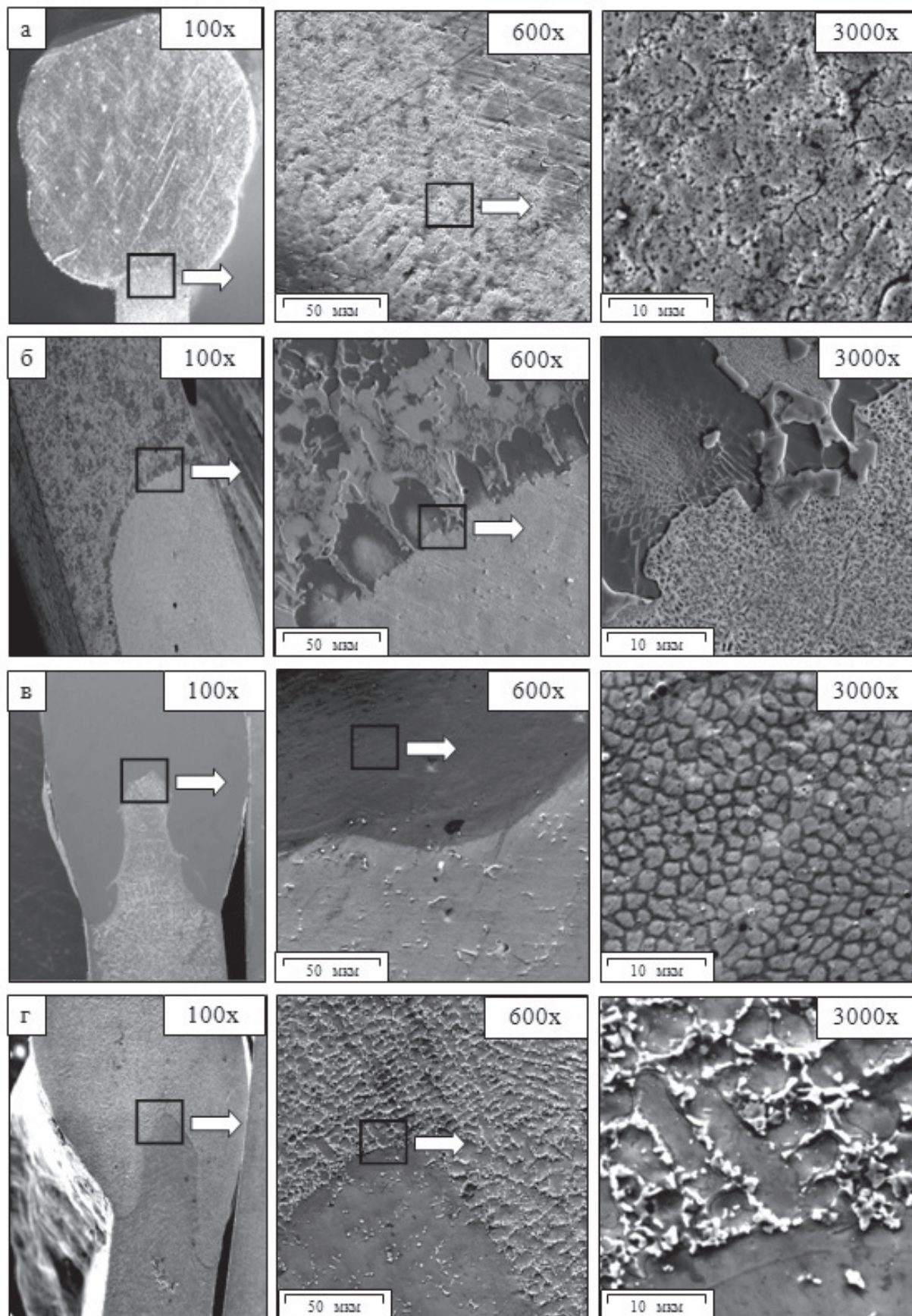


Рис. 6. Микроструктура зон наплавки восстановленных лопаток: *а* — аргодуговая наплавка с присадкой ХН60ВТ; *б* — восстановление печной пайкой с припоем ВПр24; *в* — лазерная импульсная наплавка с присадкой ХН60ВТ; *г* — лазерная импульсная порошковая наплавка ВПр24

ного расширения, а также большая её объемная доля определяют запас пластичности и прочности сплава в сочетании с высокой способностью к сопротивлению и разрушению при эксплуатации. Потеря данной структуры (вследствие повышенных температур или механической деформации) приводит к разупрочнению сплава и снижению его характеристик при испытаниях на усталость, длительную жаропрочность. Обычно разупрочнение связывают с потерей когерентности γ' -фазы [7]. На рис. 7 представлены снимки допустимой структуры для лопаток ТС из сплава ЖС6-К с четко различимой кубической формой γ' -фазы.

Исходя из вышеперечисленного можно сделать следующие выводы.

Метод аргодуговой наплавки с использованием присадочной проволоки ХН60ВТ имеет одно-

родную структуру наплавки и отчетливо заметную зону термического влияния (ЗТВ) на основной материал лопатки. Также в ЗТВ на расстоянии 200—310 мкм (от наплавки) наблюдается область с нарушенной кристаллической структурой сплава ЖС6-К и потерей когерентности и кубической формой γ' -фазы (рис. 8), что является признаком разупрочнения и недопустимо по нормам предприятия.

После пайки в вакуумной печи с использованием керамических форм и порошкового припоя ВПр24, несмотря на кратковременный (выдержка 15 мин) нагрев всего тела лопатки до температуры пайки (1250 °С), изменение структуры основного материала не последовало, что можно наблюдать на рис. 6,б. Структура лопатки ТС сохранила допустимые нормы (кубическую структуру γ' -фазы)

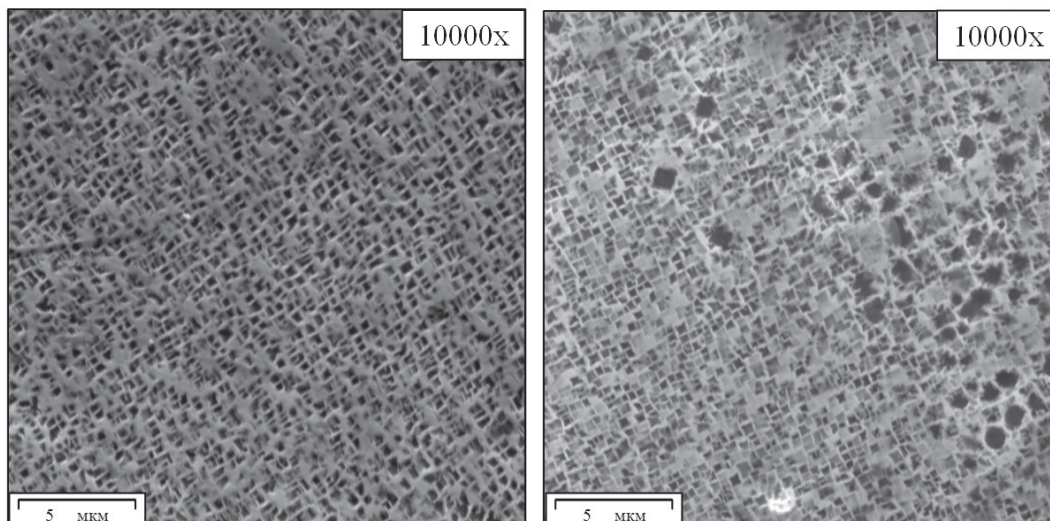


Рис. 7. Допустимая структура лопаток ТС из сплава ЖС6-К

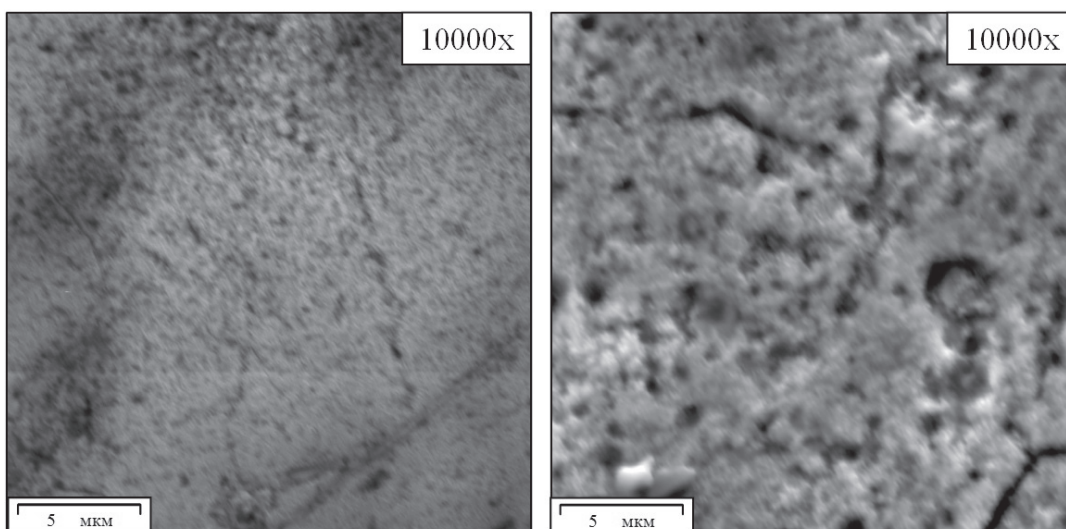


Рис. 8. Нарушение кристаллической структуры γ' -фазы сплава ЖС6-К в ЗТВ при аргодуговой наплавке

вплоть до места спаивания. Элементный анализ показал наличие в структуре припоя предположительно сетки сложных интерметаллидов, а также карбидов вольфрама и хрома (рис. 9). Данные соединения обладают высокой твердостью и повышенной температурой плавления, что должно положительно

сказаться на механической износостойкости при повышенных температурах, однако интерметаллидные соединения также склонны к хрупкости [8].

Метод импульсной лазерной наплавки с присадочной проволокой ХН60ВТ показал практически полное отсутствие изменения структуры материала

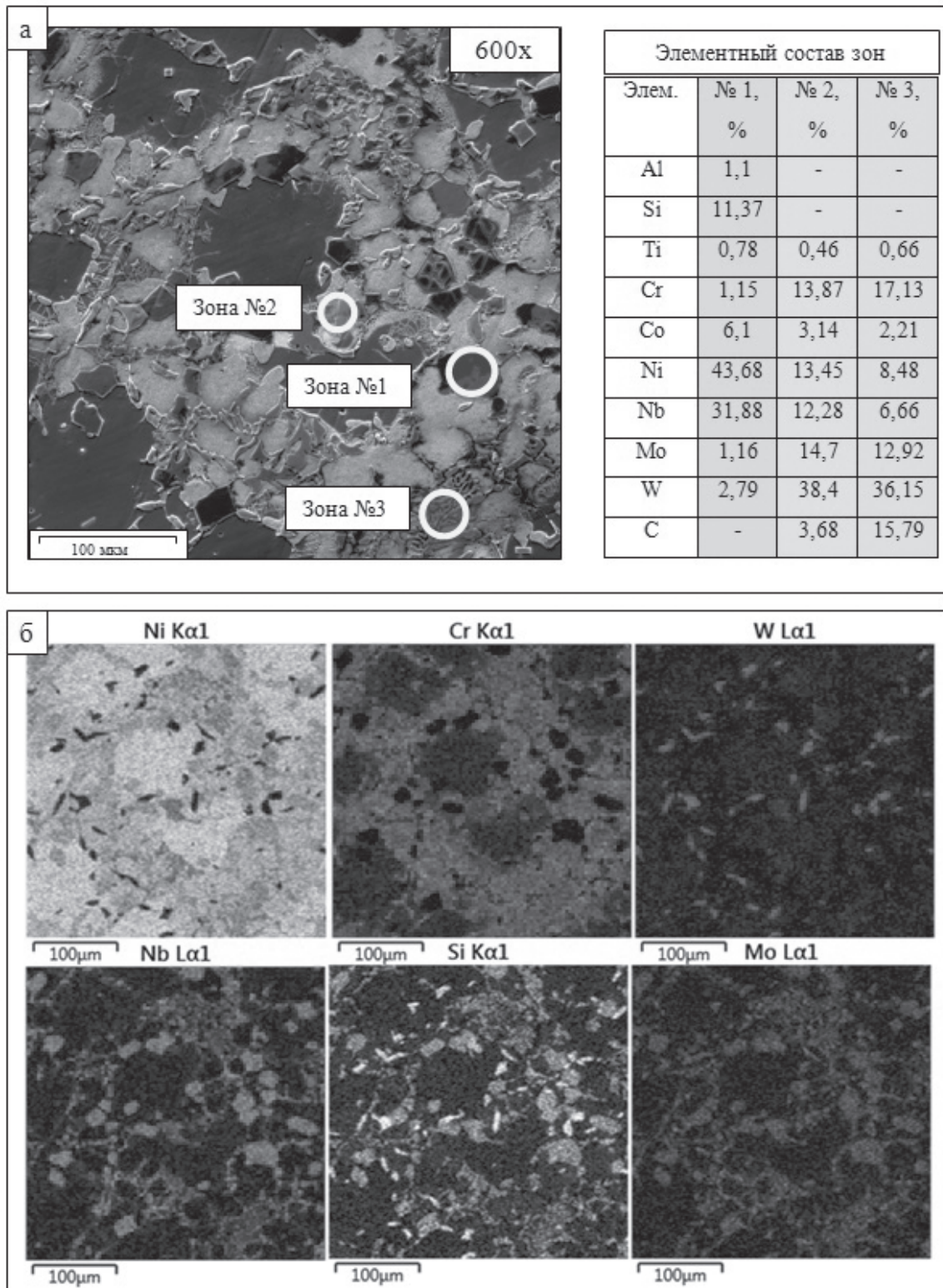


Рис. 9. Структура припоя ВПр24 после печной пайки: а — структура припоя и зональный элементный анализ; б — элементные карты структуры припоя ВПр24 после пайки

ла лопатки даже непосредственно у границы с наплавленной зоной (рис. 10). Лазерная наплавка образует мелкозернистую равномерную структуру с размером зерен порядка 3—6 мкм (см. рис. 6, в), что положительно сказывается на износостойкости и сопротивлении трещинообразованию.

плавления материала с карбидной сеткой и минимальным влиянием на структуру основного материала подложки (лопатки ТС). Также следует отметить, что зона сплавления (10—20 мкм) содержит в меньшей степени легирующие элементы и возможные интерметаллиды, а состоит преимуще-

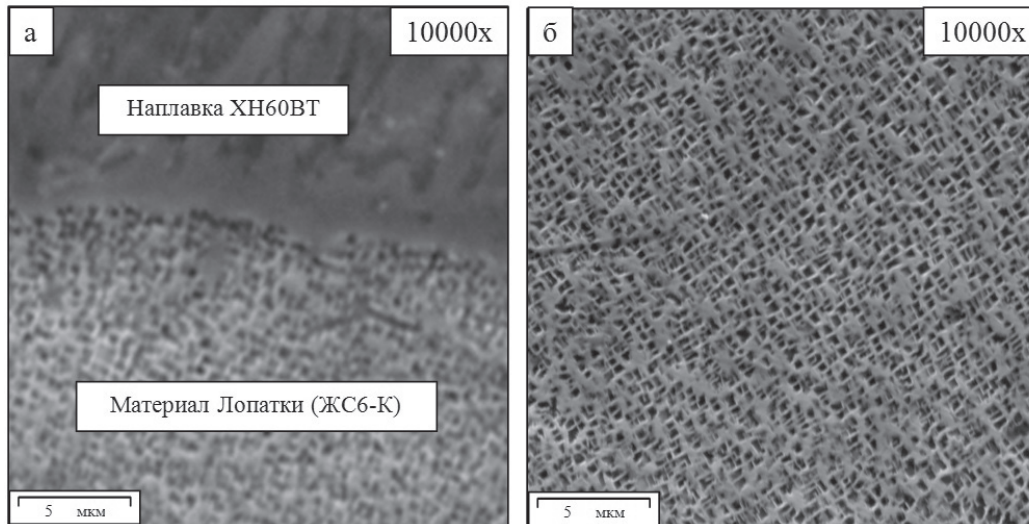


Рис. 10. Отсутствие влияния лазерной наплавки на структуру материала лопатки ТС: а — зона сплавления; б — структура вдалеке от наплавки (основание пера лопатки)

При импульсной лазерной порошковой наплавке структура наплавленного припоя ВПр24 кардинально отличается от его структуры после пайки. Структура стала представлять собой сеть мелких зерен (предположительно содержащих интерметаллиды) на основе никеля размерами не более 10 мкм (рис. 11, зона 2). Наибольшее содержание легирующих элементов наблюдается по границам зерен (в том числе углерода и тугоплавких карбидообразующих, зона 1). Поэтому, помимо возможных интерметаллидных соединений, здесь содержатся мелкодисперсные карбиды вольфрама и хрома или более сложные карбиды на их основе. Состав зоны 3 соответствует практически химсоставу сплава лопатки ЖС6-К (см. табл. 2). Из элементного анализа и микроструктуры можно сделать вывод, что лазерное излучение как метод нанесения покрытия, формирует более мелкодисперсную структуру на-

столько из никеля. Это можно наблюдать на элементных картах (рис.11, б).

Измеренные значения микротвердости в поперечных шлифах по табличным данным переводились в значения твердости по Роквеллу. В табл. 3 показаны значения твердости, распределенные по сечению лопатки.

В случае аргонодуговой наплавки с присадочной проволокой ХН60ВТ формируется наплавленный слой с низкой твердостью и наблюдается повышение твердости основного материала в зоне термического влияния [9].

При печной пайке с использованием керамических форм и порошкового припоя ВПр24 наблюдается большой разброс твердости по сечению восстановленного слоя, что обусловлено наличием твердых соединений интерметаллидов. Исследования также показали, что твердость интерметалли-

Таблица 3

Показания твердости восстановленных лопаток ТС

Твердость зон наплавки, HRC	Аргонодуговая наплавка (ХН60ВТ)	Восстановление пайкой (ВПр24)	Лазерная порошковая наплавка (ВПр24)	Лазерная наплавка (ХН60ВТ)
Зона сплавления	49,6 – 54,5	48,5 – 65,4	50,1 – 52,3	42,2 – 47,5
Центр наплавки	22,5 – 29,5	40,7 – 77,2	58,4 – 62,8	29,5 – 36,5
Материал лопатки	51,1-53,9	41,1-44,9	47,4 – 51,8	49,1-50,7

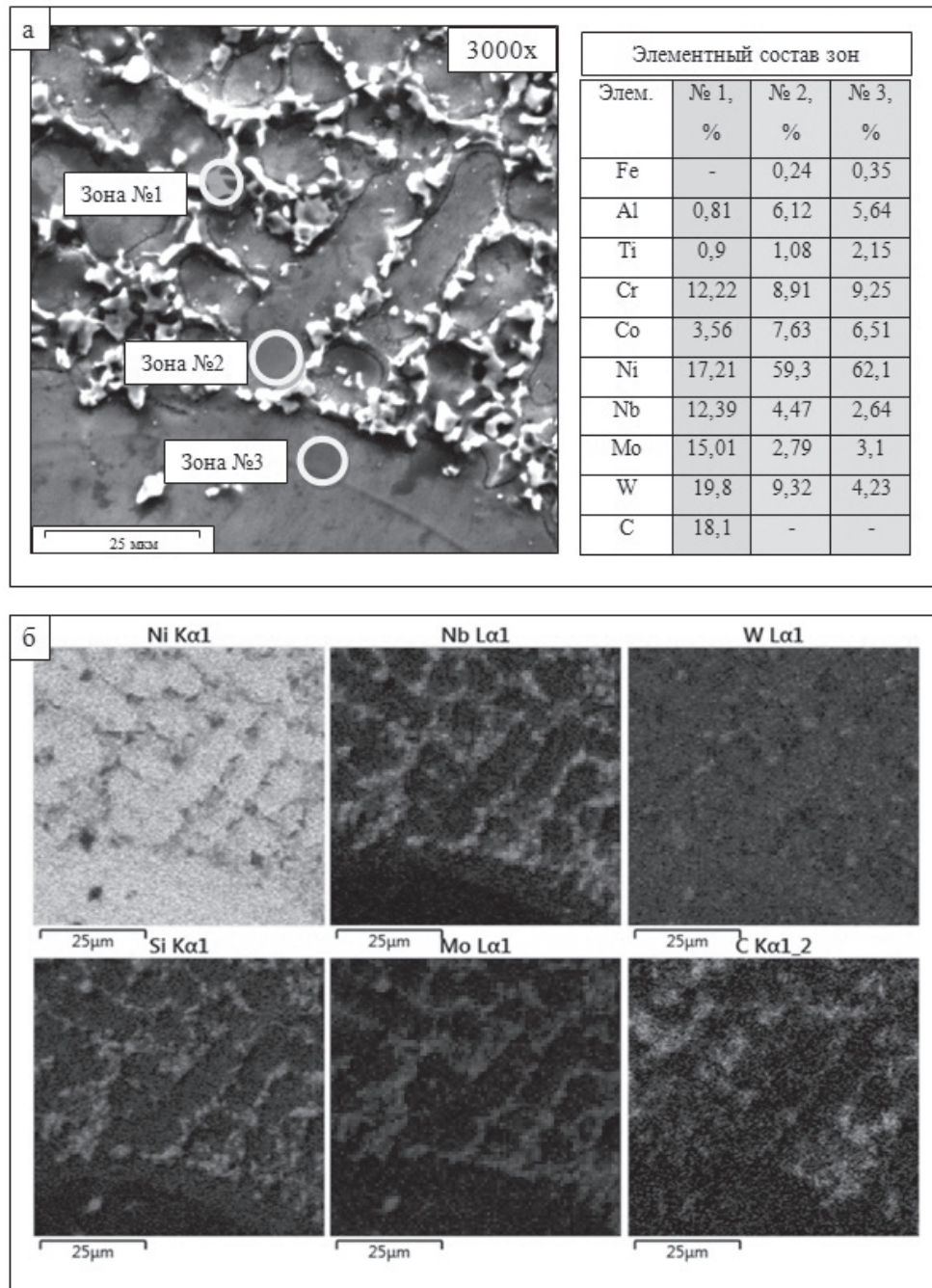


Рис. 11. Структура припоя ВПр24 после лазерной наплавки; а — структура припоя и зональный элементный анализ; б — элементные карты структуры припоя ВПр24 после лазерной наплавки

дов колеблется в пределах 67–75 HRC (1020–1469 Нv).

После импульсной лазерной наплавки с присадочной проволокой ХН60ВТ, отмечаются более высокие значения твердости наплавленного слоя по сравнению с аргодуговой наплавкой, однако они значительно ниже, чем у материала лопатки.

После импульсной лазерной порошковой наплавки ВПр24 наблюдается существенно меньший разброс в распределении твердости по всей толщине наплавки по сравнению с пайкой, что обусловлено образованием в наплавленной зоне мелкодис-

перной структуры, содержащей интерметаллиды и мелкие карбиды. Можно заключить, что подобная упрочненная структура будет иметь больший ресурс в эксплуатации, чем метод пайки. Значения КТЛР для материалов, участвующих в восстановлении при рабочей температуре лопатки ТС (900 °С), приведены в табл. 4.

В идеале КТЛР материала подложки и наплавки должны совпадать. Различия (особенно когда КТЛР наплавки ниже, чем у подложки) могут привести к образованию трещин в процессе наплавки и непосредственно в процессе работы.

Таблица 4

Значения КТЛР используемых материалов

Материал	Значения КТЛР ($10^{-6} 1/^\circ\text{C}$) при 900°C
ЖС6-К	14,9
ХН60ВТ	14,1
ВПр24	15,8
Металлокерамическая вставка (ответная деталь лопатки ТС)	12,9

После наплавки лопатки подвергались механической обработке для придания ей первоначального профиля. По результатам рентгеновского и люминесцентного контроля восстановленных лопаток (рис. 12), проведенных в лаборатории НМК предприятия ОАО «КУЗНЕЦОВ», не было выявлено ни внешних (трещины), ни внутренних дефектов (поры, несплавления).

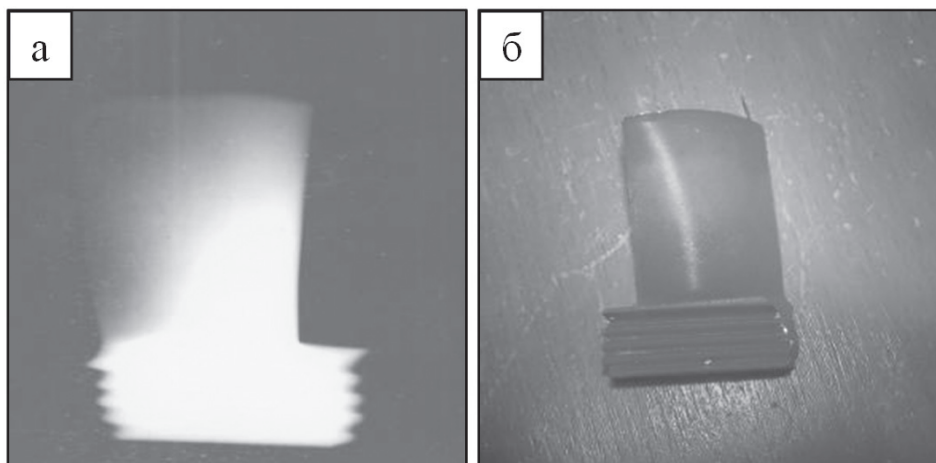


Рис. 12. Результаты рентгеновского (а) и люминесцентного (б) контроля

Выводы

1. Метод аргонодуговой наплавки показал себя с отрицательной стороны (низкая твердость наплавки, большая ЗТВ и как следствие — нарушение структуры γ' -фазы и разупрочнение сплава) по сравнению со всеми остальными методами и не имеет преимуществ, за исключением дешевизны.

2. Метод печной пайки в керамических формах является доступным способом восстановления пера лопатки (учитывая наличие всего необходимого практически на любом заводе авиационной отрасли) и имеет положительные результаты в технологическом плане. Однако высокотемпературные припои с рабочей температурой выше 1000°C в силу особенностей химического состава в условиях медленного охлаждения печи склонны к образованию

твердых интерметаллидов с крупной структурой, способных охрупчивать восстановленный слой.

3. Метод восстановления лазерной наплавкой с присадочной проволокой обеспечивает минимальное влияние на структуру подложки и формирование мелкозернистой структуры с размером зерна 3—6 мкм. Однако слабой стороной данного метода являются его низкая производительность и низкая твердость полученной наплавленной зоны (ниже твердости основного материала ЖС6-К).

4. Проведенные предварительные исследования показали, что для восстановления пера лопатки ТС наиболее перспективной является лазерная наплавка самофлюсующимся порошковым припоем ВПр24. При этом по сравнению с методом пайки формируется мелкодисперсная структура припоя ВПр24 с равномерно распределенными упрочняющими интерметаллидными и карбидными фазами, обладающими твердостью выше твердости матери-

ала лопатки, что положительно скажется на его стойкости к абразивному изнашиванию в работе.

5. Процесс лазерной наплавки в порошковой ванне является наиболее производительным по сравнению с лазерной наплавкой при подаче присадочной проволоки, а совмещение наплавляемого торца лопатки с порошковой ванной исключает потери порошка при наплавке.

Библиографический список

1. *Torims T.* The application of laser cladding to mechanical component repair, renovation and regeneration // DAAAM International Scientific Book. 2013. Vol. 12, pp. 587-608.
2. *D'Oliveira A.S., da Silva P.S., Vilar R.M.* Microstructural features of consecutive layers of Stellite 6 deposited by laser cladding // Surface and Coatings Technology. 2002. № 153, pp. 203-209.

3. Фомичев Е.О., Воронин Н.Н. Анализ существующих способов восстановления лопаток компрессора газотурбинного двигателя // Двигатель. 2013. № 5 (89). С. 18-19.
4. Заббаров Р. Материалы и технологические процессы изготовления заготовок и отливок аэрокосмического назначения. — Самара: СГАУ, 2008. — 92 с.
5. Колосов В.И. Способ восстановления длины пера лопаток газотурбинного двигателя // Патент РФ № 2138382, Заявка №98117725/02 от 24.09.1998, опубликовано: 27.09.1999, МПК 6 В 23 Р 6/00.: <http://ru-patent.info/21/35-39/2138382.html>
6. Сотов А.В., Смелов В.Г., Носова Е.А., Косырев С.А. Импульсная лазерная наплавка лопаток газотурбинных двигателей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6(4). С. 973-977.
7. Кишкин С.Т., Морозова Г.И., Беляев М.С., Гневшева А.И., Сорокина Л.П. Фазовые превращения в жаропрочном никелевом сплаве ЖС6У, испытанном на усталость // Физика металлов и металловедение. 1984. Т. 58. № 6. С. 1171-1178. URL: <http://viam.ru/public/files/1983/1983-198975.pdf>
8. Светлов И.Л., Абузин Ю.А., Бабич Б.Н., Власенко С.Я., Ефимочкин И.Ю., Тимофеев О.Б. Высокотемпературные ниобиевые композиты, упрочненные силицидами ниобия // Журнал функциональных материалов. 2007. Т. 1. № 2. URL: <http://viam.ru/public/files/2006/2006-204646.pdf>
9. Сорокин Л.И., Лукин В.И., Багдасаров Ю.С. Свариваемость литейных жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6 // Сварочное производство. 1997. № 6. URL: <http://viam.ru/public/files/1997/1997-202262.pdf>

COMPARISON OF TURBINE BLADE WING OF HEAT-RESISTING ALLOY GEOMETRY RESTORING TECHNIQUES

Klimov V.G.

Samara State Technical University,
SSTU, 244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russia
e-mail: vadim3945@yandex.ru

Abstract

Compressors and turbines of aviation gas turbine engines are the main components that determine the engine performances. Turbine blades are the most costly elements while their production. Rejection of an unfit turbine blade usually happens due to insignificant defects and consequently, their restoring is economically sound.

This article considers the process of geometry restoring (height) of aviation turboprop engine NK-12MP turbine starter's (TS) blade wing. A comparative analysis of four types of restoration has been carried out: argon-arc surfacing with filler wire XH60BT; soldering with solder powder VPr24 in ceramic forms; laser surfacing with filler wire XH60BT; laser surfacing in powder bath with VPr24 solder.

The furnace soldering in ceramic forms technique consists in placing the blade in a specially prepared form repeating the ceramic blade profile with the necessary allowance for further machining, with further powder solder filling. Then the soldering process in a vacuum furnace begins.

The technique of laser welding in a powder bath consists in surfacing of the blade wing placed in a bath filled with facing powder. The blade was placed in the powder fill so that its wing and the surface of the powder

fill were at the same level. The laser beam worked on the tangent of the blade wing and the powder.

Based on blade restoration techniques comparative analysis I concluded that the most effective technique in this case is pulse laser surfacing. Surfacing in powder bath herewith provides higher performance compared to laser surfacing with filler wire. Laser surfacing main differences from the classical techniques of turbine blades geometry restoring are revealed. The paper presents comparative analysis of the restored layers structure by electronic microscopy with elemental analysis of transverse sections of the samples. The degree of the effect of each technique on the blade basic material was revealed. It is found that the furnace soldering and laser surfacing techniques exert least effect on the strengthening phase γ' of the cast alloy GC-6K. The elemental analysis revealed the presence of, presumably, the grid of complex intermetallic compounds, as well as tungsten and chromium carbides in the solder structure. Microhardness (Hv) of the recovered layers and various phases of powdered solder VPr24 was determined, and the CTLEM (coefficient of thermal linear expansion of material) involved in the restoration process was measured.

Keywords: laser surfacing, argon-arc surfacing, self-fluxing brazing alloys, powder bath, coefficient of linear expansion, restoring repair, electron microscopy, elemental analysis, microhardness, soldering.

Abstract

1. Torims T. The application of laser cladding to mechanical component repair, renovation and regeneration. *DAAAM International Scientific Book*, 2013, vol. 12, pp. 587-608.
2. D'Oliveira A.S., da Silva P.S., Vilar R.M. Microstructural features of consecutive layers of Stellite 6 deposited by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 2002, no. 153, pp. 203–209.
3. Fomichev E.O., Voronin N.N. *Dvigatel'*, 2013, no. 5 (89), pp. 18-19.
4. Zabbarov R. *Materialy i tekhnologicheskie protsessy izgotovleniya zagotovok i otlivok aerokosmicheskogo*

naznacheniya (Materials and technological processes of aerospace billets and castings manufacturing). Samara, SGAU, 2008, 92 p.

5. Kolosov V.I. *Patent RU 2138382*, 27.09.1999.
6. Sotov A.V., Smelov V.G., Nosova E.A., Kosyrev S.A. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2013, vol. 15, no. 6(4), pp. 973-977.
7. Kishkin S.T., Morozova G.I., Belyaev M.S., Gnevshva A.I., Sorokina L.P. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1984, vol. 58, no. 6, available at: <http://viam.ru/public/files/1983/1983-198975.pdf>
8. Svetlov I.L., Abuzin Yu.A., Babich B.N., Vlasenko S.Ya., Efimochkin I.Yu., Timofeev O.B. *Zhurnal funktsional'nykh materialov*, 2007, vol. 1, no. 2, available at: <http://viam.ru/public/files/2006/2006-204646.pdf>
9. Sorokin L.I., Lukin V.I., Bagdasarov Yu.S. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 6, available at: <http://viam.ru/public/files/1997/1997-202262.pdf>