

УДК 669-1

А.С. Ермолаев¹, А.М. Иванов¹, С.А. Василенко¹,
В.С. Бабиков¹, Р.М. Мубаракишин², Е.В. Кондрашов¹

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-37-43

Рассмотрены примеры применения лазерного раскроя, трехкоординатной лазерной резки, сварки и порошковой наплавки LMD (Laser Metal Deposition) при изготовлении различных компонентов авиационного двигателя и ремонте ответственных деталей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов компрессора высокого давления и камеры сгорания, описаны преимущества, которые способствуют внедрению лазерной обработки в производство.

Ключевые слова: лазерная адаптивная наплавка, ремонт, блиск, лопатка, компрессор высокого давления, лазерная сварка, перфорация отверстия, технология.

Examples of application of 3D laser cutting, weldings and laser powder cladding LMD (Laser Metal Deposition) in manufacturing of various components of the aviation engine and repair of responsible parts from heat resisting nickel and titanium alloys of the high pressure compressor and the chamber of combustion are considered, the advantages allowing to achieve introduction of laser processing in manufacture are described.

Keywords: laser adaptive cladding, repair, blisk, blade, high pressure compressor, laser welding, punching of an aperture, technology.

¹Открытое акционерное общество «Авиадвигатель» [Open Joint Stock Company «Aviadvigatel»]
E-mail: office@avid.ru

²Общество с ограниченной ответственностью «Урал Инжиниринг Консалтинг» [Limited Liability Company «Ural Engineering Consulting»] E-mail: zpt@uralinco-centr.ru

Введение

Лазерные технологии находят все более широкое применение, открывая новые возможности высококачественной, производительной, экономичной объемной резки и сварки сложных деталей из алюминия, титана, конструкционной и легированной сталей, для термической обработки и наплавки деталей с целью их упрочнения и ремонта. Основные преимущества лазерных технологий: высокая гибкость процесса, возможность обработки нежестких конструкций из труднообрабатываемых материалов, уменьшение затрат на подготовку производства, устранение ряда вспомогательных операций и технологической оснастки. Наряду с областями, где применяют стандартные машины для двух- и трехкоординатной лазерной обработки, существует широкий спектр задач, для решения которых технологическая система должна характеризоваться как специальными свойствами, так и возможностью быстрой переналадки. В этих случаях необходимы гибкие, соответствующие требованиям установки, которые должны быть изготовлены на базе агрегатно-модульной конструкции с включением специальных компонентов. Принцип модульности и гибкости необходимо применять по отношению к следующим основным характеристикам и элементам лазерной установки [1]:

– параметрам рабочего пространства;

– кинематике пространственных перемещений лазерного инструмента и детали;
– системам передачи и фокусировки лазерного луча;
– рабочим инструментам, оптике для резки, сварки, термообработки и наплавки;
– параметрам управления процессом, таким как рабочий и защитный газы, специальный сварочный флюс;
– системам дозирования и подачи порошка для наплавки; системе адаптивного контроля процесса для взаимного определения детали, инструмента и зоны обработки в пространстве;
– вспомогательным средствам автоматизации для расширения технологической системы и интеграции новых элементов, например вращательных столов с вертикальной и горизонтальной осью вращения.

Высокий уровень гибкости и широкий спектр технологических возможностей особенно актуальны при производстве прототипов новых изделий, например, при производстве деталей и узлов газотурбинного двигателя (ГТД). Требования к технологиям производства ГТД постоянно возрастают, прежде всего, из-за ужесточения конструктивных, прочностных, динамических, температурных, весовых и других критериев. В этой связи к числу наиболее важных технологических задач при изготовлении прототипа ГТД, для ре-

нения которых целесообразно применение лазерных технологий, относятся:

- объемная 3D-резка наружных и внутренних контуров в тонкостенных нежестких корпусах, включая отверстия диаметром 0,5–1 мм;
- объемная 3D-сварка деталей и сборочных единиц (ДСЕ);
- восстановление сложнопрофильных поверхностей деталей лазерной наплавкой;
- термическая обработка с целью упрочнения поверхности и повышения износостойкости.

Оборудование и методы

Соответствующая вышеприведенным задачам лазерная система модульного исполнения внедрена на ОАО «Авиадвигатель» (рис. 1) для решения различных задач, связанных с производством деталей и узлов авиационного двигателя.



Рис. 1. Лазерный центр для обработки деталей ГТД

Прецизионный центр для трехмерной лазерной обработки имеет семь управляемых осей с точностью позиционирования 0,08 мм по линейным координатам и характеризуется высокими (до 173 м/мин) скоростями перемещения и ускорениями по осям. Лазерный центр оснащен источником с твердотельным дисковым лазером мощностью 2 кВт, КПД которого достигает 30%.

Система ЧПУ управляет осями координат и функциональными подсистемами центра и обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- «горячее» подключение оптико-волоконного кабеля без выключения лазера;
- программное управление настройкой фокусного расстояния для обработки материалов различного типа и различных толщин; фокусировка лазера остается постоянной в любой точке рабочей зоны;
- позиционирование лазерного пучка и оптическое перемещение «нулевой» точки в любое место старта на детали для начала обработки.

Для 3D-программирования параметров и режимов обработки используется внешнее программное обеспечение.

Применение средств адаптивного контроля

процессов обеспечивает высокую производительность и качество обработки при проведении работ по восстановлению лопаток ГТД. Поскольку реальная геометрическая форма каждой лопатки после эксплуатации отличается от номинальной геометрической формы САД-модели, при ремонте лопаток необходимо применение методов адаптивной лазерной наплавки LMD (Laser Metal Deposition) для определения в пространстве кромки детали. Для этого в установке используется средство контроля контактного действия – измерительный щуп типа Renishaw и применяется специализированное программное обеспечение.

Лазерный центр оснащен оборудованием для решения различных технологических задач.

Оборудование для технологии наплавки методом LMD состоит из дозатора сферического порошка с размером частиц 40–80 мкм, программируемого расходомера газа производительностью 5–10 л/мин и обрабатывающей оптики с коаксиальным соплом с пятном «контакта» 0,19–1,9 мм.

Оборудование для лазерной резки в среде газов с фокусным расстоянием оптики $f=150$ мм.

Оборудование для лазерной сварки с фокусным расстоянием оптики $f=200$ мм.

Обрабатывающая оптика фиксируется с помощью постоянного магнита на фланце поворотной оси посредством прецизионных позиционирующих элементов. За счет магнитной фиксации головки минимизируется время простоев при ее смене. В случае столкновения по любой оси срабатывает защитное отключение привода, что уменьшает вероятность повреждения системы. Наличие неподвижного стола для загрузки и наклонно-поворотного CNC-управляемого стола существенно расширяет технологические возможности, например, для обработки камеры сгорания и моноколеса. Благодаря модульной конструкции лазерной установки и основных рабочих элементов обеспечивается возможность быстрой переналадки со сварки на наплавку и резку для решения различных технологических задач. Результаты некоторых экспериментальных работ приведены далее.

Лазерная наплавка ДСЕ

Восстановление входной кромки лопатки сектора моноколеса

В узлах компрессоров низкого и высокого давления (КНД и КВД) современных авиационных двигателей используются новые элементы конструкции – моноколеса, так называемые *blisk* («блиск») – лопатки и диск, выполненные как единая целая конструкция. В процессе эксплуатации лопатки моноколеса испытывают вибрации и удары, подвергаются абразивному износу, воздействию высоких температур, возможны повреждения в результате попадания посторонних предметов и т. п.

Это приводит к образованию трещин, забоин, искажению геометрической формы профиля

отдельных лопаток и изменению прочностных и эксплуатационных характеристик ГТД. Традиционные методы ремонта здесь неприменимы. Ввиду высокой стоимости моноколеса ремонт лопаток является актуальной задачей, так как затраты на изготовление новой детали на порядок выше. Одним из решений данной проблемы является применение технологий лазерной газопорошковой наплавки LMD [2, 3]. Использование метода LMD для восстановления деталей ГТД обусловлено локальностью термического воздействия и небольшой зоной термического влияния (в сравнении с плазменной наплавкой), что приводит к снижению дефектов поверхности и величины коробления деталей.

Экспериментальные работы по наплавке проводили путем восстановления входной кромки лопатки сектора моноколеса из титанового сплава. Для решения поставленной задачи были подготовлены лопатки в составе сектора моноколеса из материала на основе титана с предварительно отфрезерованной под наплавку входной кромкой (рис. 2).

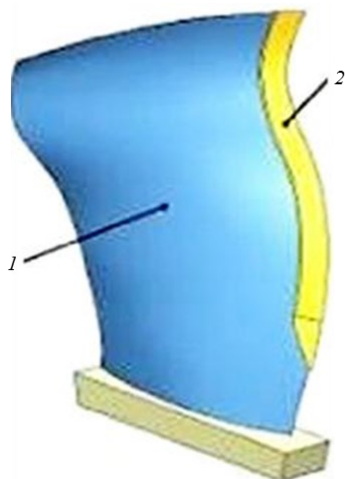


Рис. 2. Форма наплавляемой кромки:
1 – лопатка сектора моноколеса; 2 – наплавляемая зона

Для наплавки применялся сферический порошок из материала системы Ti–6Al–4V с размером гранул 45–75 мкм. Процесс восстановления входной кромки лопатки и наплавленная входная кромка лопатки сектора моноколеса приведены на рис. 3.

Металлографические исследования качества наплавленной зоны показали, что между основным материалом и материалом наплавки имеется четкая граница раздела. На границе раздела и в материале наплавки дефектов типа трещин и пористости не выявлено. Микроструктура имеет мелкоигольчатое строение, что, вероятнее всего, свидетельствует о высокой скорости охлаждения наплавленного металла.

Восстановление конической поверхности стенки жаровой трубы камеры сгорания

Наплавку конической поверхности стенки жаровой трубы камеры сгорания из жаропрочного никелевого сплава производили порошком из аналогичного сплава, разработанного и изготовленного на оборудовании по технологии ФГУП «ВИАМ» [4]. Предварительно с помощью конической поверхности тестовой заготовки (рис. 4) толщиной 1,2 мм экспериментально подобран режим наплавки и определены геометрические параметры наплавленных слоев (ширина и высота).

Процесс наплавки LMD и полностью восстановленная поверхность стенки жаровой трубы после механической обработки приведены на рис. 5.

Металлографические исследования тестовых образцов и визуальный осмотр (рис. 6) не выявили в зоне наплавки дефектов типа трещин, микропор и несплавлений.

Лазерная объемная резка и перфорация отверстий в жаровых трубах камеры сгорания

В конструкциях изделий авиационной техники широкое применение находят детали с фасонными стенками небольшой толщины. Одним из ак-

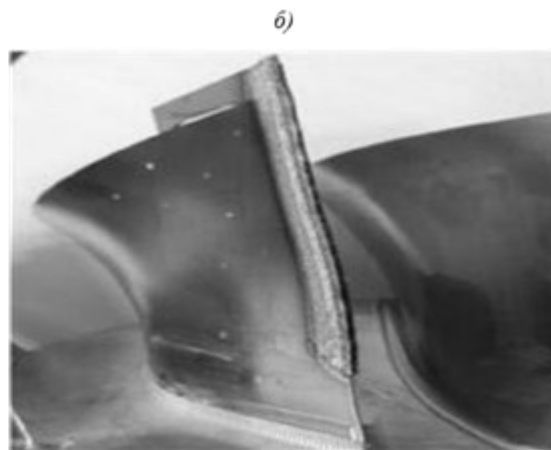
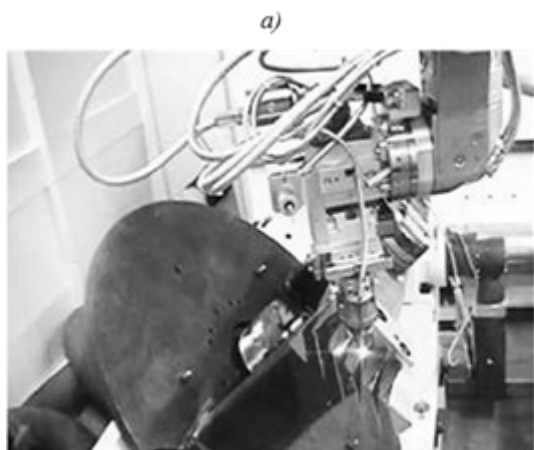


Рис. 3. Процесс восстановления входной кромки лопатки (а) и наплавленная входная кромка лопатки (б) сектора моноколеса

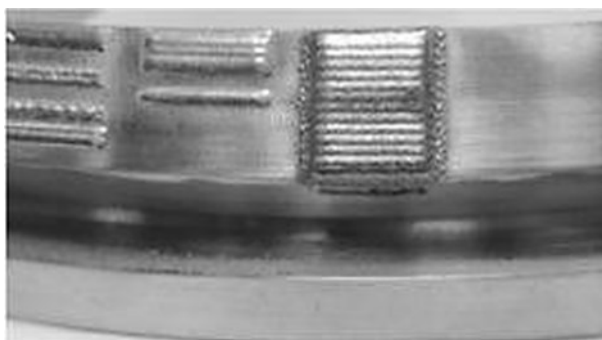


Рис. 4. Наплавленные слои на конической поверхности тестовой заготовки

а)

б)

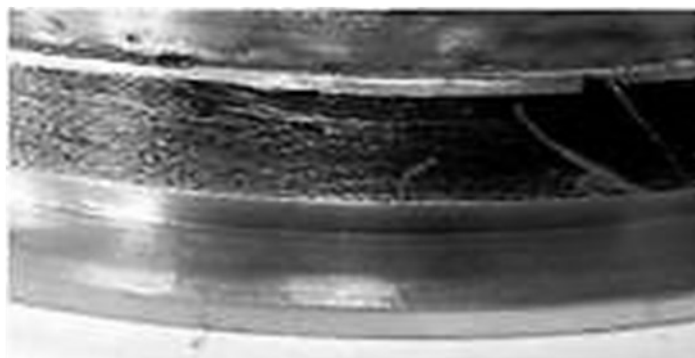


Рис. 5. Процесс наплавки LMD на поверхность восстанавливаемой стенки жаровой трубы камеры сгорания (*а*) и поверхность после механической обработки (*б*)

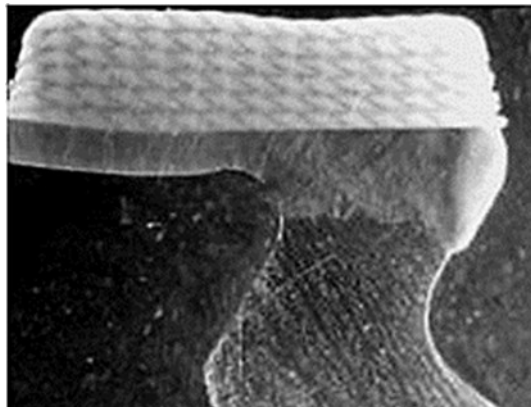


Рис. 6. Поперечный макрошлиф наплавленных слоев

а)

б)

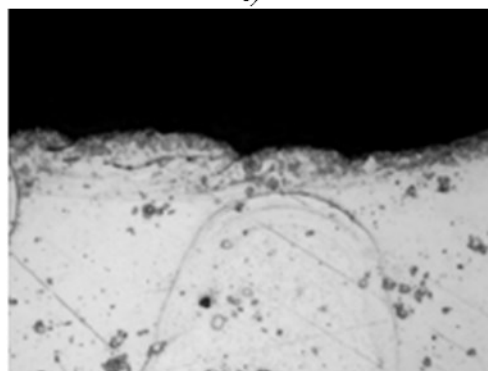
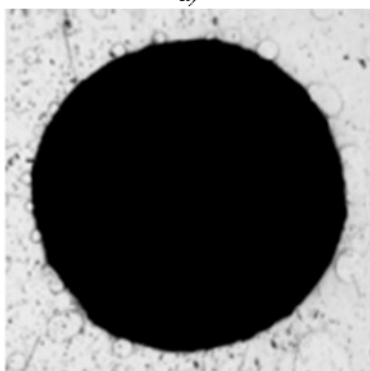


Рис. 7. Форма отверстий (*а*) и характер измененного слоя (*б*) на поперечных микрошлифах

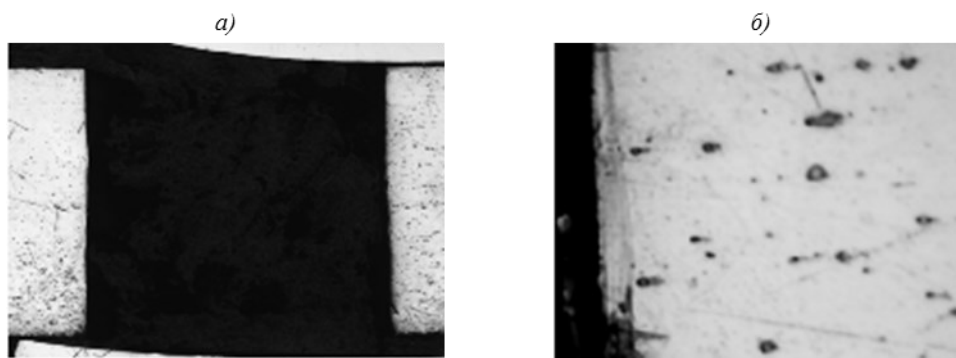


Рис. 8. Форма отверстий (а) и характер измененного слоя (б) на продольных микрошлифах

туальных трудоемких процессов при изготовлении, например, деталей камеры сгорания является операция сверления большого количества отверстий, в том числе малых диаметров – менее 1,5 мм, с допуском на диаметр $+0,05$ мм. Технология лазерной резки позволяет выполнить резку и перфорацию отверстий с высокой точностью, с минимальной зоной термического влияния.

Режимы лазерной резки отрабатывали на листовой заготовке толщиной 1,2 мм из жаропрочного никелевого сплава. Внешний осмотр показал, что форма отверстий после лазерной резки ровная – в виде окружности, со стороны входа и выхода луча на кромках имеются незначительные выплески металла, шероховатость поверхности составляет $R_a=2,7-3,5$ мкм.

Металлографические исследования на поперечных микрошлифах (рис. 7) поверхности отверстий выявили наличие измененного слоя. Глубина измененного слоя по контуру отверстий – от 6 до 14 мкм, максимальная глубина слоя 54 мкм наблюдается в месте входа и выхода луча по контуру отверстия, конусность составляет 0,02–0,05 мм. Микротвердость измененного слоя по контуру отверстия 3020–3360 МПа, в сердцевине материала образца 2580–2700 МПа. Трещин в измененном слое не обнаружено.

В результате металлографического анализа продольных микрошлифов установлено, что стенки отверстий параллельны относительно друг друга, края отверстий скруглены. На поверхности отверстий имеется измененный слой, равномерный по глубине и длине отверстий – от 4 до 14 мкм (рис. 8). Трещин в измененном слое не обнаружено.

По результатам экспериментальных работ установлены оптимальные режимы обработки, в том числе разработаны управляющие программы ЧПУ для пятиосевой обработки деталей камеры сгорания. Программа ЧПУ включала предварительный контроль положения корпуса на столе и обмер фактических координат поверхностей детали для исключения по-

грешностей из-за ее коробления и возможных деформаций. Данные измерений вводились в систему ЧПУ, после чего выполнена лазерная резка и перфорация отверстий. Суммарная продолжительность лазерной резки детали, включая вспомогательное время подготовки и контроля, составила ~ 6 ч. Лазерная резка – в сравнении с ранее применяемой электроэрозионной обработкой – позволяет сократить время обработки в 7–10 раз.

Лазерная объемная сварка форсунок ГТД

Лазерная сварка отличается определенной спецификой воздействия на материал и характеризуется [5]:

- значительной величиной удельной мощности теплового источника, которая может изменяться в широких пределах – от 10^5 до 10^7 Вт/см²;
- высокой точностью позиционирования лазерного луча;
- возможностью объемной сварки путем одновременного или раздельного перемещения детали и лазерной головки относительно друг друга;
- минимальной зоной термического влияния в результате локального воздействия луча лазера;
- постоянством параметров процесса сварки и формированием качественного сварного шва с помощью системы контроля.

Работы по лазерной сварке проводили на форсунках камеры сгорания в несколько этапов:

- подбор режима лазерной сварки, обеспечивающего технические требования по глубине провара на образцах-имитаторах;
- лазерная сварка контрольного образца форсунки на экспериментальных режимах и металлографические исследования сварного шва;
- лазерная сварка комплекта форсунок.

Согласно чертежу на форсунке предусмотрено выполнение двух швов на деталях из сплава на никелевой основе:

- шов 1 – сварка втулки и корпуса форсунки с глубиной провара 1–1,5 мм;
- шов 2 – сварка стакана и корпуса форсунки с глубиной провара 0,5–1,5 мм.

Сварка контрольного образца форсунки (рис. 9) выполнена за два прохода.



Рис. 9. Лазерная сварка форсунки

Внешний осмотр при увеличении показал, что шов равномерный по ширине, открытой пористо-

сти и подрезов в зоне шва не выявлено. При контроле сварных швов методом цветной дефектоскопии (ЦМ-15) поверхностные дефекты не выявлены (рис. 10).

Металлографический анализ глубины провара сварных швов 1 и 2 установил, что глубина провара сварных швов 1 и 2 составляет (согласно техническим требованиям чертежа) 1 и 1,5 мм соответственно (рис. 11). Неметаллические включения, пористость, трещины в сварном шве и околошовной зоне не обнаружены. Швы расположены симметрично относительно стыка свариваемых деталей.

Продолжительность машинной сварки швов 1 и 2 составила 1,5 и 2 мин соответственно. Вспомогательное время сварки швов 1 и 2, связанное с позиционированием деталей в системе координат и заданием «нулевой» точки, а также с установкой и снятием детали, составило 6 и 15 мин соответственно.

В итоге производительность процесса лазерной сварки комплекта форсунок (24 шт.) оказалась в 5 раз выше по сравнению с производитель-

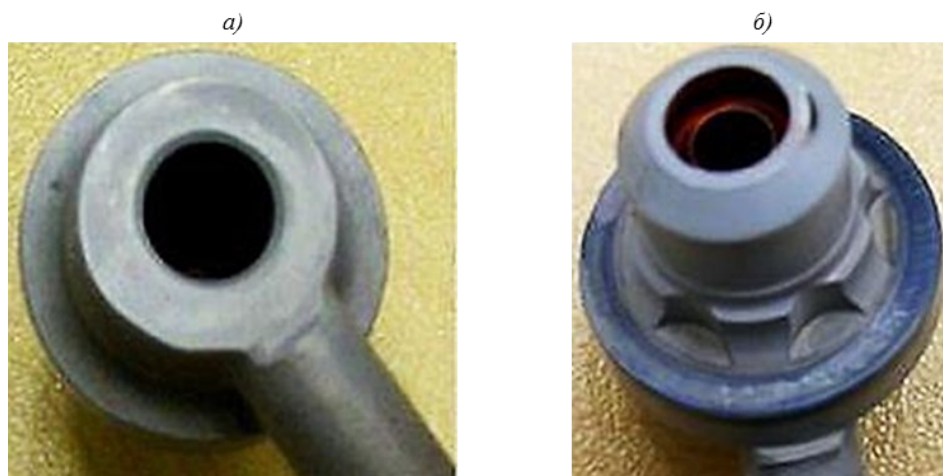


Рис. 10. Сварные швы 1 (а) и 2 (б) форсунки после контроля методом ЦМ-15

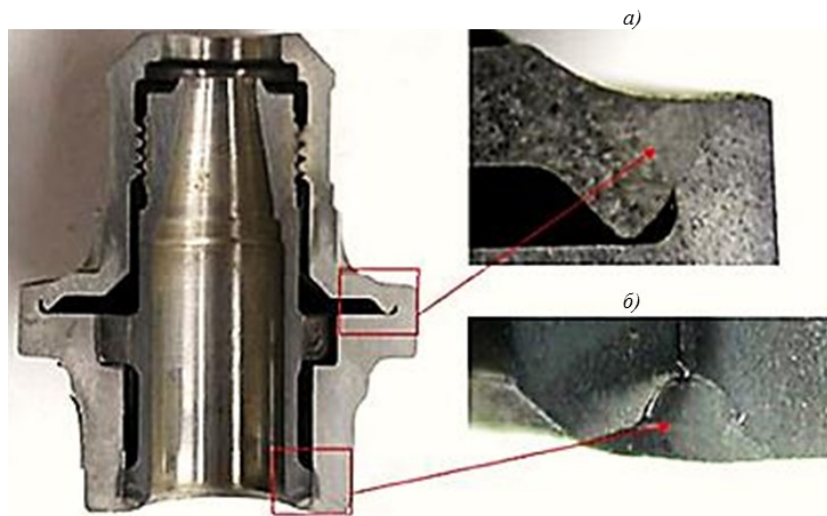


Рис. 11. Продольный шлиф сварных швов форсунки 2 (а) и 1 (б)

ностью ранее применяемой электронно-лучевой сварки (ЭЛС).

Результаты

Результаты выполненной работы показывают, что лазерная сварка в сравнении с ЭЛС существенно снижает продолжительность машинной сварки и трудоемкость подготовительных работ – не требуется большого количества специальной оснастки, а также отсутствует необходимость применения вакуумных камер и т. п.

Обсуждение и заключения

В результате проведенной работы показана эффективность применения модульной лазерной установки и реализуемых на ее базе технологий при производстве деталей и узлов авиационного двигателя. Лазерная резка, сварка и наплавка жаропрочных никелевых, титановых сплавов позволяет оптимизировать производственный процесс, снизить трудоемкость изготовления деталей и узлов авиационного двигателя и продлить ресурс деталей благодаря внедрению технологий ремонта.

Показана возможность применения техноло-

гии лазерной адаптивной наплавки LMD для ремонта лопаток моноколес компрессора и отработана технология восстановления входной кромки лопатки сектора моноколеса.

Применение лазерной резки отверстий обеспечивает:

- минимальную зону термического влияния;
- автоматизацию процесса при обработке сложных объемных заготовок без применения специальной дорогостоящей оснастки и быстроизнашиваемых дорогостоящих инструментов;
- возможность получения методом перфорации отверстий с минимальным диаметром 0,4 мм.

Лазерная резка отверстий имеет на порядок более высокую производительность в сравнении с электроэрозионной и электрохимической обработкой, обеспечивает технические требования по качеству.

Применение лазерной сварки повышает производительность процесса сварки комплекта форсунок в 5 раз по сравнению с ЭЛС, снижает трудоемкость процесса и время подготовительных работ и обеспечивает требуемое качество сварного шва. Уменьшается количество требуемой оснастки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мубаракшин Р.М., Бенцингер М. Гибкий лазерный модуль // Сварочное производство. 1996. №3. С. 25–29.
2. Келбасса И., Гассер А., Виссенбах К. Лазерное напыление как метод ремонта дисковых лопаток из титановых и никелевых сплавов, используемых в авиационных двигателях / В сб. трудов I Тихоокеанской междунар. конф. по применению лазеров и оптики. 2004.
3. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн“» // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
5. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 664 с.