

ЛАЗЕРНАЯ ПОРОШКОВАЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ НАПЛАВКА ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2016

- Р. С. Корсмик** аспирант кафедры «Сварка и лазерные технологии», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, r.korsmik@ltc.ru
- Г. А. Туричин** доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка и лазерные технологии», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, gleb@ltc.ru
- О. Г. Климова-Корсмик** кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и лазерные технологии», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, o.klimova@ltc.ru
- Е. В. Земляков** кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и лазерные технологии», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, e.zemlyakov@ltc.ru
- К. Д. Бабкин** ведущий инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, babkin.kd@mail.ru

В статье проведён анализ технологий восстановительной наплавки рабочих лопаток из жаропрочных никелевых сплавов. По результатам анализа показано, что наиболее распространённые технологии ремонта не соответствуют показателям эффективного производства. В рамках совместного комплексного проекта с индустриальным партнёром предложен автоматизированный комплекс лазерной наплавки, адаптированный для размерной наплавки торцов и гребешков бандажных полок рабочих лопаток из жаропрочных сплавов турбины высокого давления, турбины низкого давления, силовой турбины газотурбинной установки при выполнении ремонтных работ. Технология восстановительной наплавки, основанная на принципах аддитивного производства, позволяет сократить потери материала при последующей механической обработке и длительность её выполнения. В процессе экспериментальных исследований установлено, что производительность процесса восстановительной лазерной наплавки рабочих лопаток может достигать нескольких десятков штук в час. Металлографические исследования показали, что наплавленные слои не содержат макродефектов. Полученные результаты показывают высокую производительность комплекса по восстановительной наплавке, обеспечивающего высокое качество наплавленного материала.

Лазерная наплавка, жаропрочные никелевые сплавы, лопатки газотурбинного двигателя.

Цитирование: Корсмик Р.С., Туричин Г.А., Климова-Корсмик О.Г., Земляков Е.В., Бабкин К.Д. Лазерная порошковая восстановительная наплавка лопаток газотурбинного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 60-69.
DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-60-69

Введение

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) активно используются в авиационной и наземной технике и сфера их применения постоянно растёт. Только наземных и морских ГТД в мире производится более 1000 наименований. Более 70% из них применяется в энергетике в качестве приводов электрогенераторов на электростанциях в простом, когенерационном и комбинированном циклах. Они вырабатывают как электроэнергию, так и тепло в виде пара и горячей воды, удовлетворяя требованиям заказчиков в получении необходимых видов энергии. В энергетике применяется самый широкий мощностной ряд ГТД от 16 кВт до 300 МВт.

Неотъемлемой частью повышения срока эксплуатации ГТД является их техническое обслуживание и ремонт. В первую очередь это касается основных дорогостоящих и наиболее массово используемых элементов конструкции ГТД – лопаток компрессора,

причинами износа или поломки которых в процессе работы являются вибрации, удары, абразивный износ, работа при высоких температурах и другие негативные факторы. Также велика вероятность образования дефектов в виде врезов и утонений на лопатках в процессе их изготовления в составе монолитного колеса на 5-6 координатных обрабатывающих центрах с ЧПУ методом скоростного плунжерного фрезерования при сбое программы.

Технологии восстановления геометрии лопаток, используемые в отечественной и зарубежной промышленности, не позволяют покрыть весь диапазон требований, отвечающих современному трудо-, время-, материалу- и энергоэффективному производству. Данные требования состоят из высокой производительности процесса, высокого качества наплавленного слоя, минимальной последующей механической обработки, длительного ресурса межремонтной эксплуатации восстановленных лопаток, минимального процента брака при ремонте. Низкие значения коэффициентов выхода годной продукции и используемого материала (15-25% и 10-20% соответственно) свидетельствуют о существенных недоработках в технологии восстановительной наплавки.

Технологии восстановления с помощью аргоно-дуговой наплавки [1; 2], несмотря на широкое распространение в силу простоты процесса, имеют ряд недостатков. Вследствие прямого расплавления материала лопатки сварочной дугой, относительно малой плотности мощности в столбе дуги, низких скоростей процесса и квалификации сварщика происходит объёмный разогрев лопатки. Образуется значительная зона термического влияния с крупнозернистой структурой, требующая последующей термической обработки. Формируются припуски до нескольких миллиметров на последующую механическую обработку.

В отличие от дуговых источников энергии, лучевые (лазер и электронный луч) источники позволяют избегать трудностей, возникающих при наплавке дугой, и обрабатывать не только свариваемые и трудно-свариваемые, но и несвариваемые материалы. Высокие плотности мощности, достигаемые в пучках, позволяют избежать объёмного разогрева материала и повысить скорость обработки, тем самым исключив неблагоприятное формирование микроструктуры как в основном материале, так и в наплавленном слое. Известны случаи применения электронно-лучевых установок [3; 4] для наплавки лопаток ГТД, но широкое внедрение таких установок в производство сдерживается применением вакуумных камер, требующих довольно сложного оборудования для создания вакуума. Этому недостатка лишены установки лазерной наплавки. Защита расплавленного металла от отрицательного воздействия кислорода осуществляется с помощью защитного газа, который может подаваться либо локально в зону обработки, либо заполнять всё пространство рабочей камеры, если это необходимо. В качестве присадочных материалов для лазерной наплавки могут быть применены как проволоки [5; 6], так и порошки [7–9]. Технологии наплавки проволок более сложны, поскольку проволока должна точно позиционироваться по отношению к лазерному лучу и ванне расплава и должна целиком расплавляться в зоне обработки. В противном случае не будет происходить формирования наплавленного металла. Применение порошков позволяет упростить технологию наплавки за счёт неполного захвата порошка ванной расплава. Однако в масштабах производства необходимо стремиться к коэффициенту захвата порошка на уровне 0,6–0,8.

Следующим витком развития методов наплавки и лазерной порошковой металлургии являются аддитивные технологии, позволяющие создавать либо готовые металлические изделия, либо высокоточные заготовки, требующие минимальной последующей обработки (рис. 1). Достоинствами данных технологий являются возможность изготовления деталей сложной формы из дорогостоящих материалов с уникальными свойствами. Деформации выращиваемого изделия в процессе изготовления отсутству-

ют, зона термического влияния минимальна. Аддитивные технологии нашли применение и в ремонте деталей ГТД [10]. Несмотря на широкое распространение установок селективного лазерного сплавления (SLM), позволяющих создавать детали со сложной внутренней геометрией, их рабочая зона не превышает размеров 400×400×400 мм, а сам процесс наплавки занимает довольно длительное время. В отличие от установок селективного лазерного сплавления установки прямого лазерного выращивания (DLD) отличаются большей производительностью и не ограничены в размерами рабочей камеры.

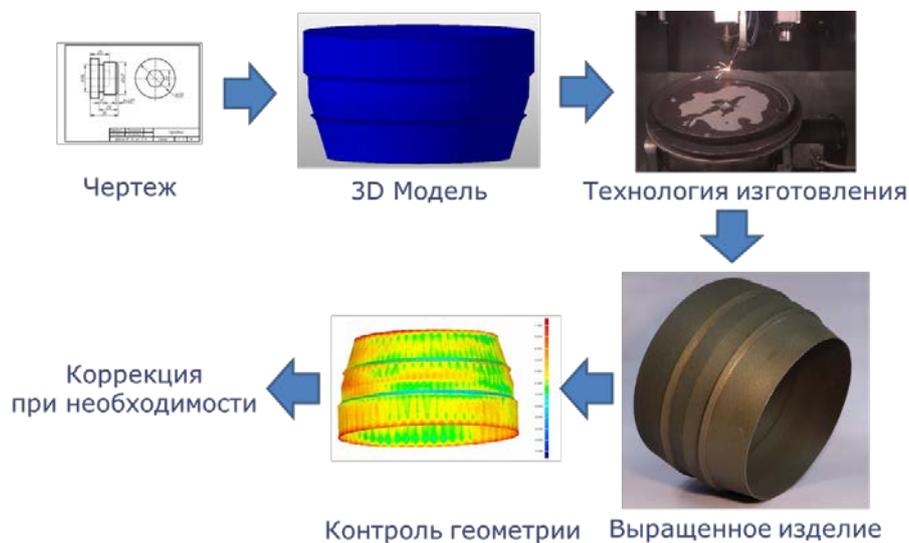


Рис. 1. Схема получения деталей с помощью аддитивных технологий

Следует отметить, что для повышения конкурентной способности для отечественного производителя наиболее актуальными становятся вопросы, связанные с созданием современных центров технического обслуживания и ремонта элементов ГТД, оснащённых высокотехнологичным оборудованием, обеспечивающим повышение межремонтного ресурса эксплуатации при снижении трудоёмкости и себестоимости их восстановления.

При реализации проекта «Создание производства восстановления рабочих лопаток газотурбинных двигателей методом лазерной наплавки», реализуемого в рамках ежегодного открытого конкурса по Постановлению Правительства № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» сотрудниками Института лазерных и сварочных технологий (ИЛИСТ) по заказу ЗАО «Плакарт» должен быть изготовлен адаптивный автоматизированный комплекс лазерной наплавки. В рамках проекта будет отработана технология лазерной наплавки, отличающаяся автоматизацией процесса; адаптацией к наплавке на высоколегированные сплавы на основе никеля; минимизацией последующей механической обработки; равномерностью структуры и минимальностью перемешивания металла основы с наплавленным слоем; малой зоной термического влияния; высоким качеством формирования и бездефектностью; отсутствием деформаций изделия, вызванных в процессе наплавки; отсутствием последующей термической обработки; возможностью наносить наплавленные слои большой площади.

Методика и материалы

Экспериментальная наплавка производилась на лабораторном стенде на базе волоконного лазера ЛС-5 мощностью 5кВт производства ИРЭ-Полнос. Излучение фокусировали с помощью технологической лазерной головки Highyag Vimo. Подача матери-

ала осуществлялась порошковым питателем Twin 10 производства Sulzer Metco. Для формирования газопорошковой струи использовали некоаксиальное сопло с диаметром выходного отверстия 2 мм, разработанное коллективом ИЛИСТ.

В качестве материалов для наплавки использовали порошковые жаропрочные сплавы EuTroLoy16625 (Inconel 625), EuTroLoy16006 (Stellite 6) производства Castolin Eutectic, ЭП648-ВИ производства ВИАМ. Фракционный состав порошка – 53-150 мкм, форма частиц – сферическая. Внешний вид порошка приведен на рис. 2, химический состав – в табл. 1.

Наплавку производили на гребешки лабиринтных уплотнений рабочих лопаток газотурбинного двигателя. Для наплавки были выбраны лопатки из жаропрочных никелевых сплавов ЖС32-ВИ и ЧС70-ВИ.

Металлографические исследования наплавленных образцов были проведены на микроскопе DMI 5000 (Leica) с программным обеспечением Tixomet.

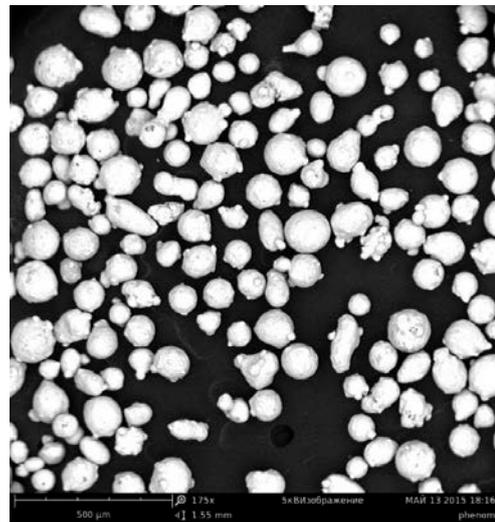


Рис. 2. Внешний вид порошка для лазерной наплавки

Таблица 1. Средний химический состав используемых материалов, %

Материал	Co	Cr	W	C	Ni	Mo	Fe	Nb	Al	Ti	Re	Ta	Прочие
Stellite 6	Осн.	30,0	5,0	1,2	<3,0	<1,0	<3,0	-	-	-	-	-	<1
Inconel 625	-	21,5	-	<0,02	Осн.	9,0	<2,0	3,6	0,02	0,02	-	-	
ЭП648-ВИ	-	34	4,5	<0,1	Осн.	3,0	<4,0	0,8	0,8	0,8	-	-	
ЖС32-ВИ	9,0	4,9	8,5	0,15	Осн.	1,0	-	1,6	5,9	-	4,0	4,0	
ЧС70-ВИ	10,5	15,9	5,3	0,09	Осн.	2,0	-	0,2	2,8	4,6			

При проведении технологических экспериментов варьировали мощность лазерного излучения, скорость перемещения фокусирующей головки относительно образца, скорость постепенного подъема фокусирующей головки для наложения следующего слоя, расход порошка. Диапазоны технологических параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2. Режимы наплавки

Мощность, Вт	Скорость перемещения, мм/с	Расход порошка, г/мин	Диаметр пятна, мм	Шаг слоя, мм	Расстояние между соплом и образцом, мм
300 – 700	5 – 10	3,6 – 7,2	1,2	0,25 – 0,55	2 – 6

Для обеспечения устойчивости процесса наплавки исследовали зависимость расхода порошка, шага поднятия фокусирующей головки и высоты наплавленного слоя. Среднюю высоту наплавленного слоя вычисляли при наплавке 10 проходов.

Для обеспечения припуска на механическую обработку в начале и конце наплавки производили остановку фокусирующей головки, образуя при этом на кромках наплавленные «выводные планки».

Результаты и их обсуждение

Прежде всего для обеспечения устойчивости процесса исследовалось влияние расхода порошка и шага поднятия на прирост высоты наплавленного валика. Результаты измерения высоты 10 наплавленных валиков приведены в табл. 3.

Таблица 3. Высота наплавленных валиков

		Шаг поднятия, мм			
		0,25	0,35	0,45	0,55
Расход порошка, г/мин	3,6	2,5	2,4	2,3	2,2
	5,4	3,7	3,5	3,2	2,9
	7,2	4,6	4,4	4,2	4,0

По усреднённым данным, полученным из измерений, была вычислена средняя высота одного наплавленного валика. Графики, приведённые на рис. 3, показывают две зависимости. Первая иллюстрирует, что при каждом расходе порошка при увеличении шага поднятия фокусирующей головки в ванну расплава попадает меньшее количество порошка, что отражается на высоте наплавленного валика. В итоге, при продолжении процесса дисбаланс шага поднятия и наплавленного слоя увеличивается. В случае, когда шаг поднятия меньше, чем высота наплавленного слоя, разница в расстояниях может привести к столкновению сопла, через которое подаётся газопорошковая струя, и наплаваемого образца. Вторая зависимость показывает для каждого расхода порошка одинаковые значения шага поднятия и высоты наплавленного слоя. Исходя из данного графика, процесс наплавки считается устойчивым.

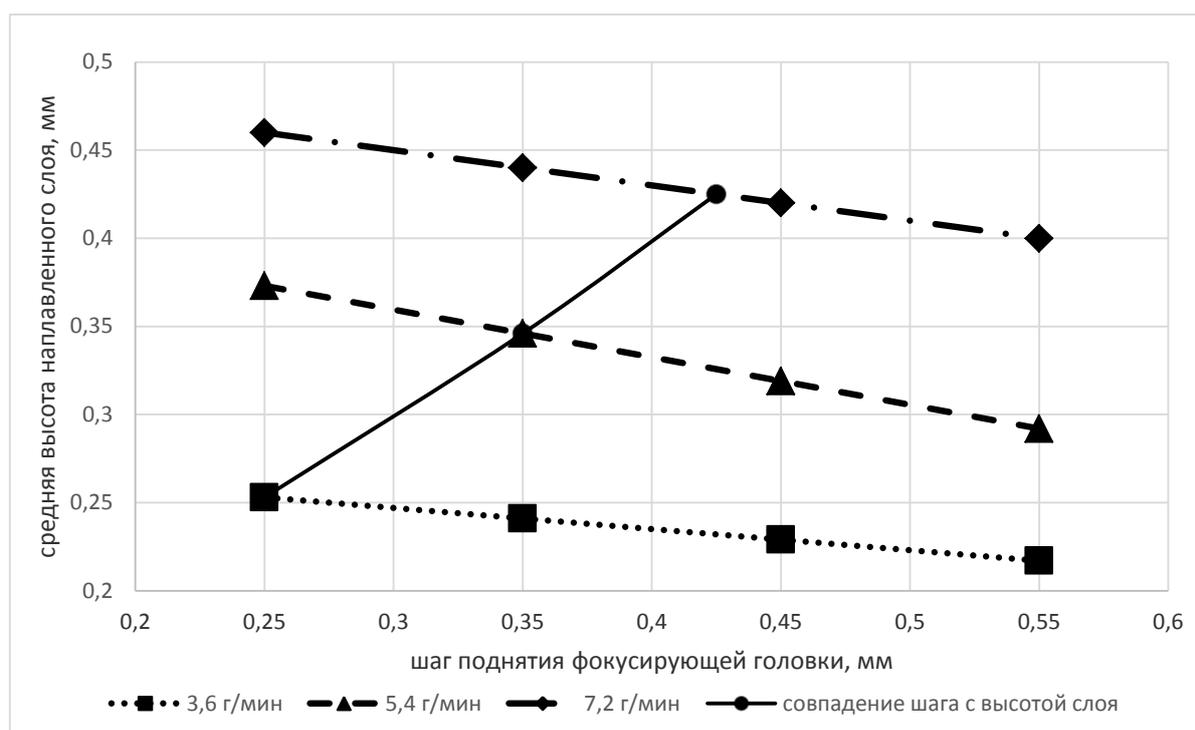
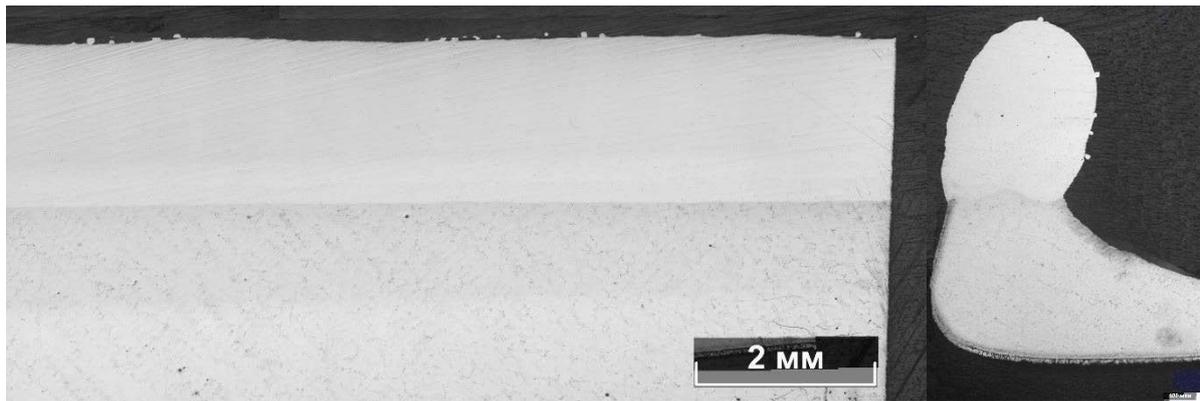


Рис. 3. Зависимость высоты наплавленного валика от расхода порошка и шага поднятия фокусирующей головки

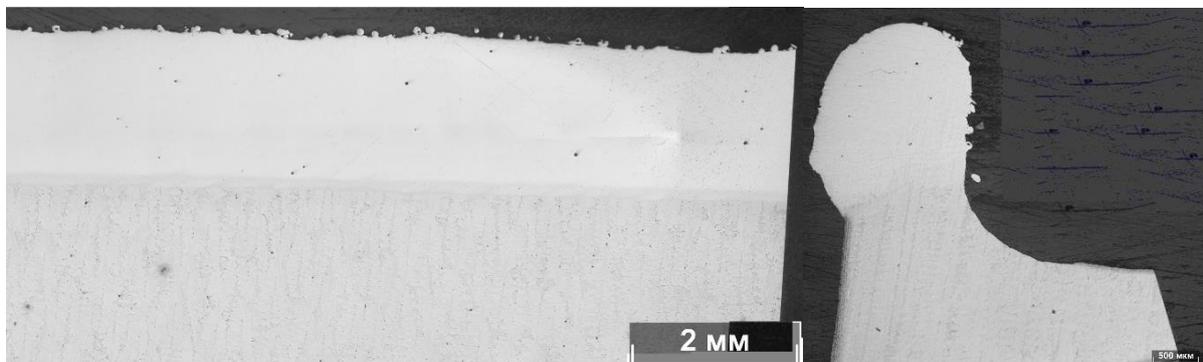
Исследования поперечных шлифов с наплавленными гребешками на рабочие лопатки показали, что во всех образцах в металле наплавки отсутствуют поры, оксидные прослойки и нерасплавленные частицы порошка. В металле наплавки, зоне сплавления, основном металле трещин не обнаружено. В случае наплавки Stellite 6 на лопатку из ЖС32-ВИ линия сплавления чёткая (рис. 4, а). При наплавке ЭП648-ВИ на лопатку из ЖС32-ВИ и Inconel 625 на лопатку из ЧС70-ВИ линия сплавления волнистая, с незначительным перемешиванием материалов (рис. 5, а; 6, а).



а

б

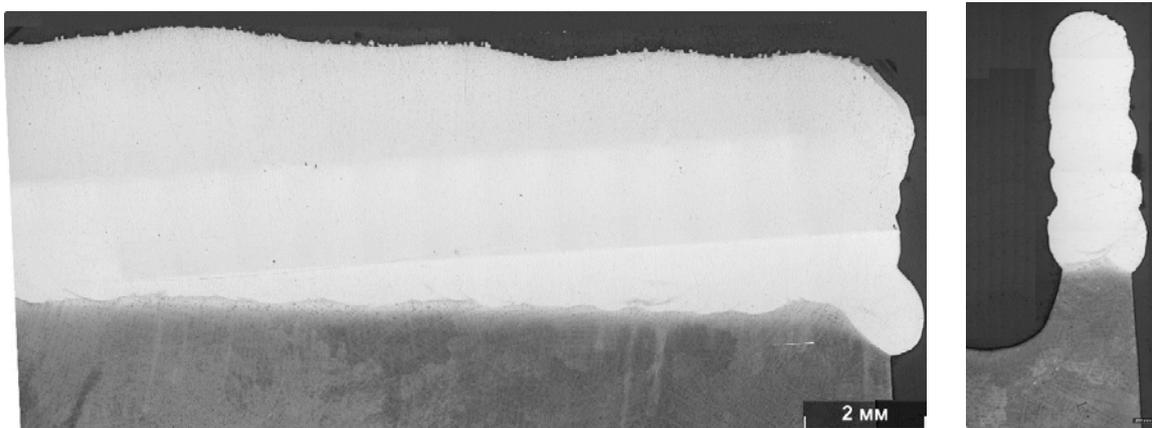
Рис. 4. Микрофотографии шлифов продольного (а) и поперечного (б) сечений гребешков из материала ЖС32-ВИ, восстановленных порошком Stellite 6



а

б

Рис. 5. Микрофотографии шлифов продольного (а) и поперечного (б) сечений гребешков из материала ЖС32-ВИ, восстановленных порошком ЭП648-ВИ



а

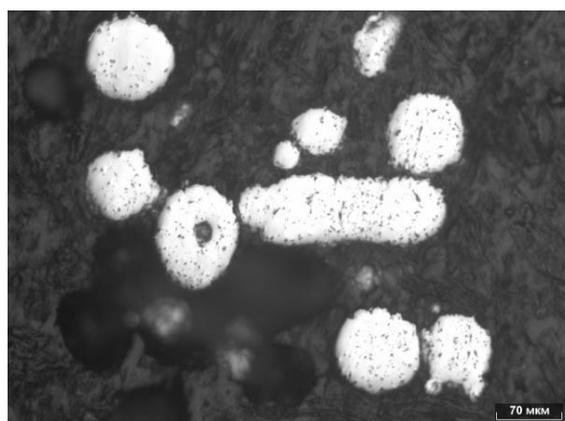
б

Рис. 6. Микрофотографии шлифов продольного (а) и поперечного (б) сечений гребешков из материала ЧС70-ВИ, восстановленных порошком Inconel 625

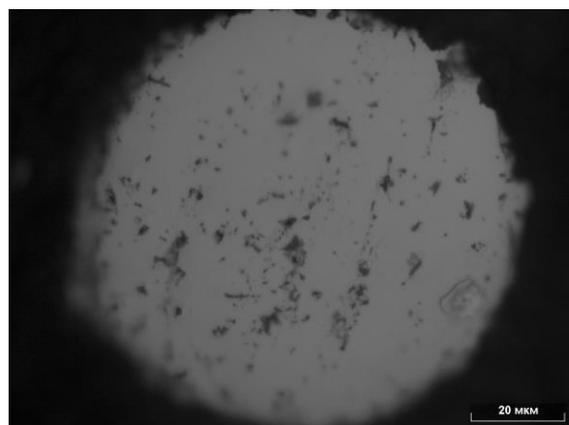
При наплавке с различной высотой валика изменяется качество боковой поверхности. При высоте наплавляемого валика 0,25 мм поверхность более ровная (рис. 4, б, 5, б) по сравнению с валиком высотой 0,5 мм (рис. 6, б). При наплавке с большей высотой слоя видны западания между проходами. При высоте наплавляемого слоя 0,25 мм производительность процесса наплавки может быть достигнута до 25 рабочих лопаток в час. При повышении производительности процесса и получении более грубой поверхности количество наплавленных лопаток за час может быть увеличено до 50 штук.

При проведении металлографических исследований в наплавленном металле обнаружены оксидные включения. Для наплавов порошков Stellite 6 и Inconel 625 размер включений не превышает 20 мкм (рис. 4, б). При анализе наплавленного порошка ЭП648-ВИ оксидных включений выявлено заметно больше и их размер достигает 40 мкм (рис. 5).

Для установления причин возникновения оксидных включений в наплавленном металле исходные порошки были подвергнуты металлографическому контролю, который показал, что порошки всех используемых марок, в большем или меньшем количестве, содержат оксидные включения. Больше всего окислов наблюдалось в порошке марки ЭП648-ВИ (рис. 7). Данный факт является подтверждением того, что окисление элементов произошло не в процессе восстановления, а оксиды перешли в наплавку из используемого материала. Таким образом, происходит наследование микроструктуры порошкового тела.



а



б

*Рис. 7. Микрофотографии илифлов порошка ЭП648-ВИ:
а – форма частиц и оксидные включения при малом увеличении;
б – оксидные включения при большом увеличении*

Заключение

1. Проведённый анализ существующих технологий показал, что большинство применяемых в промышленности технологий наплавки экономически не эффективны и не обеспечивают бездефектности изделия. Лучшими показателями по производительности и качеству наплавки обладают установки прямого лазерного выращивания.

2. В образцах восстановленных гребешков лабиринтного уплотнения отсутствуют поры, плёны и нерасплавленные частицы порошка. В металле наплавки, зоне сплавления, основном металле трещин не обнаружено.

Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации (Мин-обнауки России) в рамках реализации комплексного проекта «Создание производства восстановления рабочих лопаток газотурбинных двигателей методом лазерной наплавки». Договор № 02.G25.31.0215 от 27 апреля 2016 г.

Библиографический список

1. Сорокин Л.И. Аргонодуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов // Сварочное производство. 2004. № 7. С. 36-38.

2. Климов В.Г. Сравнение методов восстановления геометрии пера лопаток турбины из жаропрочных сплавов // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23, № 1. С. 86-97.

3. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Разработка технологического процесса электронно-лучевого ремонта и восстановления свойств лопаток турбины ГТД из сплава ЖС26НК с жаростойким покрытием Nicraly // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 3. С. 34-38.

4. Серков А.В., Лоншакова О.Н., Тихомиров А.Е., Бабич И.И., Гейкин В.А., Пузанов С.Г., Фокин Г.А., Кропанёв С.А., Матвеев А.Н. Способ ремонта поверхностных дефектов пера лопаток турбины ГТД: патент РФ № 2419526; опубл. 27.05.2011.

5. Сотов А.В., Смелов В.Г., Носова Е.А., Косырев С.А. Импульсная лазерная наплавка лопаток газотурбинных двигателей // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, № 6-4. С. 973-977.

6. Abioye T.E., Folkes J., Clare A.T. A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition // Journal of Materials Processing Technology. 2013. V. 213, Iss. 12. P. 2145-2151. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.06.007

7. Kasser D. Laser Powder Fusion Welding.
http://huffman-llc.com/pdf/Articles/LPFW%20Huffman_Kaser.pdf

8. Kathuria Y.P. Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry // Surface and Coatings Technology. 2000. V. 132, Iss. 2-3. P. 262-269. DOI: 10.1016/s0257-8972(00)00735-0

9. Shepeleva L., Medres B., Kaplan W. D., Bamberger M., Weisheit A. Laser cladding of turbine blades // Surface and Coatings Technology. 2000. V. 125, Iss. 1-3. P. 45-48. DOI: 10.1016/s0257-8972(99)00603-9

10. Kelbassa I., Albus P., Dietrich J., Wilkes J. Manufacture and repair of aero engine components using laser technology // Proceedings of the 3rd Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics. 2008. P. 208-213.

LASER POWDER WELD RECONDITIONING OF GAS TURBINE ENGINE BLADES

© 2016

- R. S. Korsmik** postgraduate student of the Department of Welding and Laser Technologies, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation, r.korsmik@lrc.ru
- G. A. Turichin** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Welding and Laser Technologies, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation, gleb@lrc.ru
- O. G. Klimova-Korsmik** Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Welding and Laser Technologies, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation, o.klimova@lrc.ru
- E. V. Zemlyakov** Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Welding and Laser Technologies, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation, e.zemlyakov@lrc.ru
- K. D. Babkin** senior engineer, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation, babkin.kd@mail.ru

The paper presents an analysis of technologies of weld reconditioning of gas turbine engine blades made of heat-resistant nickel alloys. The analysis shows that the most prevalent techniques of repair do not meet the demands of modern efficient production. An automated laser cladding machine adapted for fine cladding of blade elements of high-pressure turbines, low-pressure turbines and power turbines of gas turbine units during repairing is proposed within the framework of a joint project with an industrial partner. The weld reconditioning technology based on the principles of additive manufacturing makes it possible to reduce both the losses of material during the subsequent machining and the duration of the latter. Experimental studies on laser cladding showed that the productivity of the cladding process could be up to several tens of working blades per hour. Metallographic studies show that the deposited layers do not contain macroscopic defects. The results obtained by the authors allow predicting high productivity of the equipment for weld reconditioning, providing high quality of the material deposited.

Laser cladding, heat-resistant nickel alloys, gas turbine engine blades.

Citation: Korsmik R.S., Turichin G.A., Klimova-Korsmik O.G., Zemlyakov E.V., Babkin K.D. Laser powder weld reconditioning of gas turbine engine blades. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 60-69. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-60-69

References

1. Sorokin L.I. Argon-arc surfacing of shrouding flanges for blades made of superheat-resistant nickel alloys. *Svarochnoe Proizvodstvo*. 2004. No. 7. P. 36-38. (In Russ.)
2. Klimov V.G. Comparison of turbine blade wing of heat-resisting alloy geometry restoring techniques. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2016. V. 23, no. 1. P. 86-97. (In Russ.)
3. Shulov V.A., Paikin A.G., Bytzenko O.A., Teryaev D.A., Engelko V.I., Tkachenko K.I. Technological process development of electron beam repair and property recovery of gas turbine engine blades from GHS26NK alloy with NiCrAlY resistant coating. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2010. No. 3. P. 34-38. (In Russ.)
4. Serkov A.V., Lonshakova O.N., Tikhomirov A.E., Babich I.I., Gejkin V.A., Puzanov S.G., Fokin G.A., Kropanev S.A., Matveev A.N. *Sposob remonta poverkhnostnykh defektov pera lopatok turbiny GTD* [Method of repairing surface defects of gas turbine blade body]. Patent RF, no. 2419526, 2011. (Publ. 27.05.2011).

5. Sotov A.V., Smelov V.G., Nosova E.A., Kosyrev S.A. Impulse laser build-up welding blades of gas turbine engines. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2013. V. 15, no. 6-4. P. 973-977. (In Russ.)
6. Abioye T.E., Folkes J., Clare A.T. A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. V. 213, Iss. 12. P. 2145-2151. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.06.007
7. Kasser D. Laser Powder Fusion Welding. Available at: http://huffman-llc.com/pdf/Articles/LPFW%20Huffman_Kaser.pdf
8. Kathuria Y.P. Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry. *Surface and Coatings Technology*. 2000. V. 132, Iss. 2-3. P. 262-269. DOI: 10.1016/s0257-8972(00)00735-0
9. Shepeleva L., Medres B., Kaplan W.D., Bamberger M., Weisheit A. Laser cladding of turbine blades. *Surface and Coatings Technology*. 2000. V. 125, Iss. 1-3. P. 45-48. DOI: 10.1016/s0257-8972(99)00603-9
10. Kelbassa I., Albus P., Dietrich J., Wilkes J. Manufacture and repair of aero engine components using laser technology. *Proceedings of the 3rd Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics*. 2008. P. 208-213.