



# ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Е.В. Земляков, к.т.н., *e.zemlyakov@ltc.ru*,  
К.Д. Бабкин, Р.С. Корсмик, М.О. Скляр,  
М.В. Кузнецов,  
Институт лазерных и сварочных технологий  
(СПбПУ)

Лазерная наплавка как технология ремонтных работ широко используется для восстановления деталей, эксплуатируемых в агрессивных средах и подвергаемых поверхностному износу. Это относится к машинам и механизмам, используемым в двигателестроении, атомной энергетике, нефтехимическом производстве, в горнодобывающей и металлообрабатывающей отраслях промышленности. В статье представлен анализ технологий и оборудования для восстановления геометрии лопаток компрессоров газотурбинных двигателей и парогенераторов, применяемых в мировой практике. Предложен отечественный комплекс лазерной наплавки. В отличие от других отечественных комплексов он имеет кассетную оснастку, которая разрешает легкий переход от штучной наплавки каждой лопатки к автоматизированной наплавке набора однотипных лопаток.

## ВВЕДЕНИЕ

Требования к эксплуатационным характеристикам деталей и узлов машин постоянно возрастают. Это стимулирует ускоренное развитие высокоэффективных технологий создания новых функциональных материалов. Соответственно возрастает спрос на оборудование для придания рабочим поверхностям изделий, эксплуатируемых в сложных климатических и механических условиях, повышенных антикоррозионных, трибологических и прочностных характеристик. Весьма перспективными технологиями в области инженерии поверхности становятся лазерные

# PROSPECTS OF USE OF LASER CLADDING TECHNOLOGY FOR RESTORATION OF COMPRESSOR BLADES OF GAS TURBINE ENGINES

*E.V. Zemlyakov, Candidate of Engineering,  
e.zemlyakov@ltc.ru, K.D. Babkin,  
R.S. Korsmik, M.O. Sklyar, M.V. Kuznetsov,  
Institute of Laser and Welding Technologies (SPbPU)*

Laser cladding as technology of repair operations is in demand for the restoration of the parts, which were operated in aggressive media and subjected to surface wear. It is applicable to the machines and mechanisms, which are used in engine building, nuclear power engineering, petrochemical production, mineral resource and metal-working industries. Analysis of technologies and equipment for the restoration of compressor blades of gas turbine engines and steam generators applied in the world practice is given. The domestic complex of laser cladding is suggested. Against the background of domestic complexes it is distinguished by the presence of cassette accessories, which allows easy transition from single-piece cladding to automated cladding of the set of one-type blades.

## INTRODUCTION

Requirements to the operational characteristics of machine parts and units are constantly growing. It stimulates the accelerated development of high-efficiency technologies for design of new functional materials. Respectively, the demand in equipment intended for allotment of higher anticorrosive, tribological and strength characteristics to operating surfaces of the products, which are operated under adverse climatic and mechanical conditions, is growing. Laser technologies become very prospective technologies in surface engineering area. At the expense of creation of high density of heat power in the area of impact on the surface, they allow performing its treatment without need in volume heating of part and ensure reaching ultrahigh speeds of heating and cooling of laser impact area. As a result, the capabilities of

технологии. Благодаря высокой плотности тепловой мощности в зоне воздействия на поверхность они позволяют проводить ее обработку без необходимости объемного разогрева детали и обеспечивают достижение сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения зоны лазерного воздействия. В результате обеспечиваются возможности создания поверхностных слоев механических изделий с уникальными эксплуатационными характеристиками.

Лазерная наплавка как технология ремонтных работ потенциально востребована компаниями, которые занимаются восстановлением деталей, используемых в двигателестроении, атомной энергетике, нефтехимическом производстве, горнодобывающей, металлообрабатывающей и других отраслях промышленности, где используемые машины и механизмы подвергаются воздействию агрессивных сред и поверхностному износу.

В работе рассмотрены примеры использования и перспективы развития лазерных технологий применительно к ремонту рабочих лопаток газотурбинных двигателей.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) широко применяются в авиационной и наземной технике, и сфера их применения постоянно растет. Во всем мире из всех производимых ГТД 70% приходится на долю энергетики. В этой области применяется самый широкий мощностной ряд ГТД от 16 кВт до 300 МВт. Их используют в качестве приводов электрогенераторов на электростанциях в простом, когенерационном и комбинированном циклах, вырабатывая электроэнергию и тепло, передаваемые потребителю в виде пара и горячей воды. Ежегодный объем продаж газотурбинного оборудования составляет примерно 20–22 млрд. долларов США. Необходимость сохранения конкурентоспособности отечественных ГТД на мировом рынке очевидна. На выбор ГТД влияют не только технические и эксплуатационные характеристики изделия, а также его цена и стоимость эксплуатации.

Надежность газотурбинных двигателей в значительной степени зависит от надежности работы лопаток компрессора и турбины, поскольку они являются наиболее нагруженными деталями. Лопатки подвергаются действию статических, динамических и циклических нагрузок. Кроме того, лопатки турбины испытывают

generation of surface layers of mechanical products with unique operational characteristics arise.

Laser cladding as technology of repair operations is in potential demand by the companies, which are involved in the restoration of the parts used in engine building, nuclear power engineering, petrochemical production, mineral resource, metal-working and other industries where used machines and mechanisms are subjected to the impact of aggressive media and surface wear.

The examples of use and development prospects of laser technologies in respect to the repair of operating blades of gas turbine engines are considered in the article.

### TASK DESCRIPTION

At the present time, the gas turbine engines (GTE) are broadly applied in aviation and ground equipment, and the range of their application is constantly expanding. More than 1000 pieces of only ground and marine GTEs are produced in the world, and 70% of them account for the power engineering sector. In this area the broadest capacity range of GTE is applied, from 16 kW to 300 MW. They are used in the capacity of drivers of electric generators in power plants in simple, cogeneration and combined cycles producing electric energy and heat, which are supplied to consumers in the form of steam and hot water. The annual sales volume of gas turbine equipment is approximately 20–22 billion US dollars. The need of maintenance of competitive capacity of domestic GTE at the world market is obvious. Not only technical and operational characteristics of goods influence on the selection of GTE but also its price and operation cost.

Reliability of gas turbine engines mainly depends on the operation reliability of compressor and turbine blades because they are the most loaded parts. The blades are exposed to the static, dynamic and cyclic loads. Besides, the turbine blades experience the cyclic thermal stresses, they operate under the conditions of aggressive gas media at high temperature and they are subjected to gas corrosion [1]. GTE blades have complex spatial geometry and they are produced from difficult-to-deform materials: heat-resistant, titanium and aluminum alloys. Therefore, higher requirements by the structure of metal, its chemical composition, mechanical properties, geometry and elimination of defects are made in relation to them. The special attention is paid to such defects as forging folds, perforations, burnings, thermal damages [2].



циклические термические напряжения, они работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре и подвергаются газовой коррозии [1]. Лопатки ГТД имеют сложную пространственную геометрию и изготавливаются из труднодеформируемых материалов: жаропрочных, титановых и алюминиевых сплавов. Поэтому к ним предъявляют повышенные требования по структуре металла, его химическому составу, механическим свойствам, геометрическим размерам, минимизации дефектов. Из дефектов особое внимание привлекают заковы, прострелы, пережоги, прижоги [2].

По правилам эксплуатации рабочие лопатки турбины ГТД имеют установленный разработчиком ресурс (обычно 25 000 часов). После выработки ресурса рабочие лопатки подлежат ремонту. В общем случае ремонт заключается в выполнении следующих операций: демонтаж лопаток, чистка, дефектация, восстановление микроструктуры основного материала, восстановление геометрии и формы, восстановление покрытий, контроль качества.

Наиболее простым и распространенным методом ремонта рабочих лопаток ГТД является аргонодуговая наплавка. Но этот метод обладает рядом отрицательных факторов: вследствие прямого расплавления основного металла дугой формируется значительная зона термического влияния с крупнозернистой структурой, требующая последующей термической обработки; формируются припуски до нескольких миллиметров, требующие последующей механической обработки.

Для снижения зоны термического влияния предложен метод аргонодуговой наплавки путем равномерного пленочного расплавления основного металла на глубину 0,2–0,3 мм, снижающий образование трещин в околошовной зоне (ОШЗ) [3]. В данном методе основной металл расплавляется за счет теплоты расплавленного наплавляемого материала. Предложенный метод не исключает образования деформаций. Но объемные деформации заменяются линейными. Для снятия напряжений восстановленные лопатки требуют последующего отжига при температуре 950 °С в течение 3 часов. Необходима и последующая механическая обработка. Существующие дуговые методы восстановления рабочих лопаток промышленных ГТД характеризуются низкой эффективностью – коэффициент выхода годного составляет 15–25%, коэффициент использования материала 10–20%.

According to operation rules, the operating turbine blades of GTE have the service life set by developer (usually 25000 hours). After the depletion of service life, the operating blades are subject to repair. In general case, the repair consists in execution of the following operations: dismantling of blades, cleaning, flaw detection, restoration of microstructure of base material, restoration of geometry and shape, restoration of surfaces and quality control.

The most simple and common methods of repair of GTE operating blades is argon-arc welding. But this method has a number of adverse factors: due to direct fusion of the base metal by arc the significant zone of thermal influence with large-grained structure is formed, which requires the further heat treatment; the excess materials with the size of several millimeters are formed, which require the further mechanical treatment.

In order to reduce the heat-affected area, the method of argon-arc welding by homogeneous membranous fusion of base metal at the depth of 0.2–0.3 mm, which decreases the risk of crack formation in heat-affected area (HAA), is suggested [3]. In this method, the base metal is fused at the expense of heat of fused facing material. Suggested method does not exclude the generation of deformations. But volume deformations are replaced with linear ones. In order to remove the stresses, restored blades require the further annealing at the temperature 950 °C within 3 hours. Also, the further mechanical treatment is needed. Existing arc methods of restoration of operating blades of industrial GTE are characterized by low efficiency – the yield factor is 15–25%, material utilization rate is 10–20%.

### LASER TECHNOLOGIES OF REPAIR CLADDING OF GTE OPERATING BLADES

Minimum allowance for the further mechanical treatment (about 200 μm), narrow heat-affected area (up to 100 μm), presence of fine-grained structure of built-up layer, minimum (local) energy deposition, increase of repair area of GTE blade surface, absence of heat treatment, higher mechanical characteristics of built-up layer refer to the characteristics of laser technology as opposed to argon-arc welding [3, 4]. Also, flexibility of the process, which allows using the metal powder and wire in the capacity of filler, must be mentioned here [5–7].

Results of laser cladding with the use of repetitively-pulsed solid-state Nd:YAG laser

### ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТНОЙ НАПЛАВКИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД

Для лазерной технологии в отличие от аргонодуговой наплавки [3, 4] характерны минимальный припуск под последующую механическую обработку (около 200 мкм), узкая зона термического влияния (до 100 мкм), наличие мелкозернистой структуры наплавленного слоя, минимальный (локальный) энергозатрат, увеличение ремонтной площади поверхности лопатки ГТД, отсутствие термической обработки, повышенные механические характеристики наплавленного слоя. Также необходимо отметить гибкость процесса, позволяющего в качестве присадочного материала использовать как металлический порошок, так и проволоку [5-7].

Результаты лазерной наплавки с использованием импульсно-периодического твердотельного Nd:YAG-лазера (HTS-Mobile 300 – ОКБ "Булат") представлены в работе [8]. Однако основной недостаток разработанной технологии – отсутствие автоматизации технологического процесса: присадочную проволоку в зону воздействия лазерного излучения в процессе наплавки оператор подает вручную. В линейке ОКБ "Булат" присутствует технологический комплекс для импульсной лазерной наплавки с системой автоматической подачи проволоки, автоматической фокусировки лазерного луча и перископической насадкой. Такая автоматизация позволяет повысить качество и производительность процесса ремонта. Технологии импульсной лазерной наплавки позволяют



**Рис.1.** Комплекс для лазерной наплавки: а) LRS-PRO (ОКБ "Булат"); б) PSM 400 (Schunk)

**Fig. 1.** Complex for laser cladding: a) LRS-PRO (EDB "Bulat"); b) PSM 400 (Schunk)

(HTS-Mobile 300 – Experimental Design Bureau "Bulat") are given in the paper [8]. However, the main disadvantage of developed technology consists in the absence of automation of technological process: filler wire is manually supplied by operator into the area of laser radiation during the cladding process. There is technological complex for pulse laser cladding with the system of automatic supply of wire, automatic focusing of laser beam and periscopic nozzle in the production range of EDB "Bulat". Such automation allows enhancing the quality and efficiency of repairing process. Technologies of pulse laser cladding allow building up the alloys based on nickel, cobalt and titanium [9]. Examples of domestic and foreign complexes based on repetitively-pulsed solid-state lasers are shown in Fig. 1.

наплавлять сплавы на никелевой, кобальтовой и титановой основах [9]. Примеры отечественного и зарубежного комплексов на базе импульсно-периодического твердотельного лазера представлены на рис.1.

Но и эти комплексы не лишены недостатков: у них отсутствует кассетная оснастка, которая разрешает легкий переход от штучной наплавки каждой лопатки к автоматизированной наплавке набора однотипных лопаток.

Результаты порошковой наплавки хорд и торцов компрессорных лопаток из титанового сплава с использованием непрерывного волоконного лазера максимальной мощностью 1 кВт приведены в работе [10]. Наплавка проводилась на установке LENS 850R фирмы OPTOMEC (США) (рис.2).

Приведенные в работе результаты подтвердили принципиальную возможность использования данного класса оборудования для восстановительного ремонта рабочих лопаток. При этом такие факторы, как значительный припуск под механообработку, увеличение микротвердости наплавленного металла по сравнению с основой в 1,5-2,5 раза, широкая зона термического влияния (около 0,9 мм), нерасплавленные частицы порошка на поверхности наплавленного слоя, внутренние дефекты, полученные авторами в ходе экспериментов, доказывают сложность технологического процесса лазерной наплавки и необходимость его оптимизации с использованием как теоретических, так и экспериментальных методов.

Перспективным видится путь развития ремонтных технологий через разработку комплексов, которые объединили бы в себе системы контроля, механообработки (как предварительной, так и последующей) и лазерной наплавки.

Такой подход был реализован в проекте Reclaim, который выполняет консорциум английских компаний: Renishaw, ElectroX, TWI, Precision Engineering Technologies, Cummins Turbo Technologies, Airfoils Technology International и университет Де Монфор. Программное обеспечение разрабатывалось компанией Delcam. Британское Государственное Управление технологической стратегии инвестировало в проект более полумиллиона фунтов.

Результаты восстановления турбинных лопаток двигателей с использованием автоматизированного технологического ком-



**Рис.2.** Комплекс порошковой лазерной наплавки LENS 850R фирмы OPTOMEC (США)

*Fig. 2. Complex of powder laser cladding LENS 850R produced by OPTOMEC (USA)*

But even these complexes have disadvantages: they do not have cassette accessories, which allow easy transition from single-piece cladding of each blade to automated cladding of the set of one-type blades.

Results of powder building-up of chords and edges of compressor blades from titanium alloy using the continuous-wave fiber laser with maximum capacity of 1 kW are given in the paper [10]. Building-up was performed using the device LENS 850R produced by OPTOMEC (USA) (Fig. 2).

Results given in the paper proved the principal ability to use this category of equipment for the restoration repair of operating blades. At the same time, the significant allowance for mechanical treatment, increase of microhardness of built-up metal in comparison with the base by 1.5-2.5

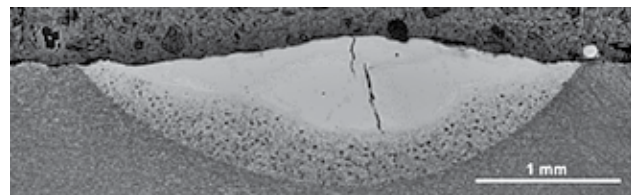


**Рис.3.** Ротор парогенератора

*Fig. 3. Rotor of steam generator*

плекса RECLAIM описаны в работе [11]. Технологию адаптивной лазерной наплавки и оборудование, схожее по техническим характеристикам с комплексом RECLAIM, предлагают сотрудники института Фраунгофера и компании Veam Machines [12, 13].

Интересен опыт восстановительной наплавки входных кромок лопаток парогенератора, реализованный на валу ротора [14] (рис.3). В качестве источника лазерного излучения использовали диодный лазер мощностью 3 кВт. К основным положительным результатам данной работы следует отнести возможность восстановления лопаток моноколеса парогенератора на валу ротора. В результате обеспечивается существенная экономия средств, поскольку технологии, требующие устранения дефектной лопатки из состава моноколеса [15], оцениваются, по словам авторов, в 2,3-4,5 млн. долларов США. К недостаткам работы следует отнести появление пористости в зоне сплавления лопатки и наплавляемого слоя, а также невозможность применять данную технологию для восстановления больших площадей из-за появления значительных деформаций и трещин (рис.4).



**Рис.4.** Трещины и пористость в наплавленном слое на лопатку паровой турбины

**Fig. 4.** Cracks and porosity in built-up layer on the blade of steam turbine

times; broad heat-affected area (about 0.9 mm), unfused powder particles on the surface of built-up layer, presence of internal defects obtained by the authors in the course of the experiments prove the complexity and multiple factors of the technological process of laser cladding and necessity of its optimization with the use of theoretical and experimental methods.

The way of development of repair technologies through design of the complexes, which would combine control, mechanical treatment (preliminary and further) and laser cladding systems, seems to be prospective.

Известны методы изготовления и ремонта деталей авиадвигателей методами прямого лазерного выращивания (ПЛВ) и селективного лазерного плавления [16]. Достоинствами данных технологий являются возможность изготовления деталей сложной формы из дорогостоящих материалов с уникальными свойствами и минимальным припуском на последующую механическую обработку; деформации в процессе изготовления/ремонта отсутствуют, зона термического влияния минимальна. Недостатками являются не полностью проверенная технология применительно к восстановлению изношенных частей турбинных лопаток, а также использование импортного оборудования.

Восстановление лопаток из жаропрочных сплавов на основе титана и никеля, установленных на моноколесе в компрессоре ГТД ПД-14 на установке TruLaserCell 7020 фирмы Trumpf описано в работе [17] (рис.5). Результаты металлографических исследований показали существование четкой границы раздела основного и наплавленного металла, отсутствие дефектов и мелкоигольчатую структуру наплавленного слоя, свидетельствующую о высоких скоростях охлаждения. К преимуществам используемого метода авторы относят, в том числе, его адаптивность, что актуально для различно изношенных поверхностей лопаток.

Для восстановления поверхности лопаток компрессора ГТД ряд авторов предлагают использовать технологию электронно-лучевой наплавки [18, 19]. Несмотря на преимущества, схожие с преимуществами лазерной наплавки, данный способ имеет ограничения по габаритным размерам восстанавливаемых заготовок, зависящих от размеров вакуумной камеры, на создание вакуума в которой также требуется время.

Результаты лазерного восстановления лопаток газоперекачивающих станций с использованием в качестве присадочного материала порошков на никелевой основе Inconel 625 и Inconel 738 приведены в работе [20]. В качестве источника лазерного излучения использовали твердотельный лазер с длиной волны 1,07 мкм. В обоих вариантах получены качественные валики, при этом в случае материала Inconel 738 дополнительно использовали последующий подогрев зоны наплавки. Также авторы отмечают преимущества волоконного лазера перед CO<sub>2</sub>-лазером. Положи-



**Рис.5.** Процесс восстановления узлов: а) входной кромки лопатки (и наплавленная входная кромка лопатки); б) сектора моноколеса  
**Fig. 5.** Process of restoration of units of: a) entrance edge of blade (and built-up entrance edge of blade); b) bladed disk sector

Such approach was implemented in Reclaim project executed by the consortium of English companies: Renishaw, ElectroX, TWI, Precision Engineering Technologies, Cummins Turbo Technologies, Airfoils Technology International and De Montfort University. The software was developed by Delcam company. The British State Administration of Technological Strategy invested more than half a million pounds into this project.

Results of restoration of engine turbine blades using the automated technological complex RECLAIM are described in the paper [11]. The technology of adaptive laser cladding and equipment, which is similar to RECLAIM complex by its technical characteristics, are offered by the employees of Fraunhofer Institute and Beam Machines company [12, 13].

The experience of restoration building-up of entrance edges of steam generator blades implemented at the rotor shaft is of interest [14] (Fig. 3).

Diode laser with the capacity of 3 kW was used in the capacity of laser radiation source. The main positive results of this paper should include the capability of restoration of blades of steam generator bladed disk at the rotor shaft, which provides the significant economy of monetary resources in comparison with the technologies requiring the removal of defective blade from the structure of bladed disk [15], which can reach 2.3-4.5 million US dollars according to authors. The disadvantages of paper results include the occurrence of porosity in the area of welding of blade and built-up layer and impossibility to apply this technology for the restoration of large areas



тельным результатом стало наличие системы контроля геометрии наплавленных валиков с целью обеспечения минимального припуска на последующую механическую обработку, а также оценки технологической возможности "лечения" поверхностных трещин лопаток из никелевых сплавов при лазерной наплавке [21-23].

Анализ работ в области ремонта рабочих лопаток ГТД показал заинтересованность отрасли во внедрении лазерных технологий. Проведена серия работ по опробованию технологий лазерной наплавки лопаток различной номенклатуры с использованием установок разных типов. Авиационное и энергетическое машиностроение относятся к стратегически важным отраслям промышленности. В связи с этим требуется повышение уровня технологической импортнезависимости производственных процессов выпуска новой продукции, а также ремонта и обслуживания продукции, бывшей в эксплуатации. Большая часть технологических комплексов лазерной обработки, используемых в настоящее время на предприятиях авиационного двигателестроения и ремонта, импортного производства.

due to the occurrence of significant deformations and crack formation (Fig. 4).

The methods of fabrication and repair of aircraft engine parts by the direct laser growth (DLG) and selective laser melting are well known [16]. The advantages of such technologies include the capability to make parts with irregular shapes from expensive materials with unique properties and minimum allowance for the further mechanical treatment; there are no deformations in the process of fabrication/repair; heat-affected area is minimal. The disadvantages include absence of technology testing in respect to the restoration of worn-out parts of turbine blades and use of import equipment.

Restoration of the blades of heat-resistant alloys based on titanium and nickel, which are installed at bladed disk in GTE compressor PD-14, using the device TruLaserCell 7020 produced by Trumpf is described in the paper [17] (Fig. 5). Results of metallographic studies showed the existence of clear boundary between the base and built-up material, absence of defects and fine-needled structure of built-up layer indicating high cooling speeds. In respect to the advantages of used methods the authors also mentioned its adaptivity,

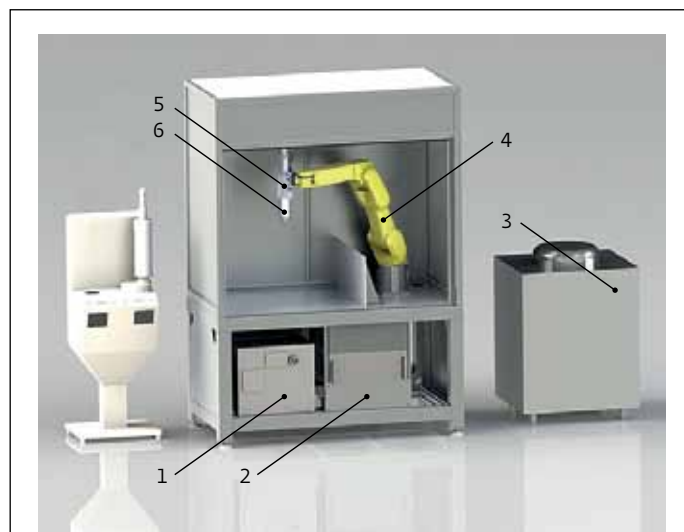


### РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

Для создания производства восстановления рабочих лопаток ГТД методом лазерной наплавки при поддержке Правительства России (Минобрнауки РФ) в рамках Постановления Правительства № 218 сотрудниками Института лазерных и сварочных технологий Политехнического университета Петра Великого (ИЛИСТ СПбПУ, Санкт-Петербург) по заказу ЗАО "Плакарт" разрабатывается роботизированный технологический комплекс лазерной наплавки. Общая концепция комплекса представлена на рис.6. В состав комплекса входят: волоконный лазер мощностью 700 Вт (1), система управления (2), система водяного охлаждения (3), промышленный робот-манипулятор (4), лазерная наплавочная головка (5), порошковый питатель (6). Особое внимание при разработке комплекса будет уделено созданию сопловой части технологической головки, позволяющей обеспечить коэффициент использования наплавляемого порошка не менее 0,5 при ширине наплавленных валиков 0,8-1,5 (2) мм. Также будет разработана кассетная оснастка для установки набора однотипных лопаток, что позволит значительно увеличить производительность процесса наплавки, сократив временные затраты, связанные с установкой отдельных лопаток.

Технические параметры разрабатываемого комплекса были определены на основе результатов предварительных технологических экспериментов по наплавке жаропрочных сплавов на никелевой и кобальтовой основе (в виде порошков) на рабочие лопатки ГТД из материалов ЖС32-ВИ и ЧС70-ВИ (рис.7).

Металлографические исследования шлифов и рентгеновский анализ восстановленных гребешков рабочих лопаток показали, что во всех образцах отсутствуют поры, трещины, пленки и нерасплавленные частицы порошка. В случае наплавки порошка Stellite 6 на лопатку из ЖС32-ВИ линия сплавления четкая (см. рис.7а). При наплавке Inconel 625 на лопатку из ЧС70-ВИ и ЭП648 на лопатку из ЖС32-ВИ линия сплавления волнистая, с незначительным перемешиванием материалов (см. рис.7б, с). Все слои были наплавлены с минимальным припуском под последующую механическую обработку (рис.8).



**Рис.6.** Макет адаптивного автоматизированного комплекса лазерной наплавки

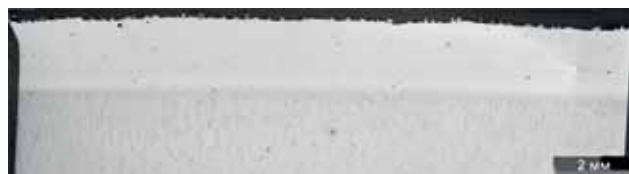
*Fig. 6. Model of adaptive automated complex of laser cladding*



a)



b)

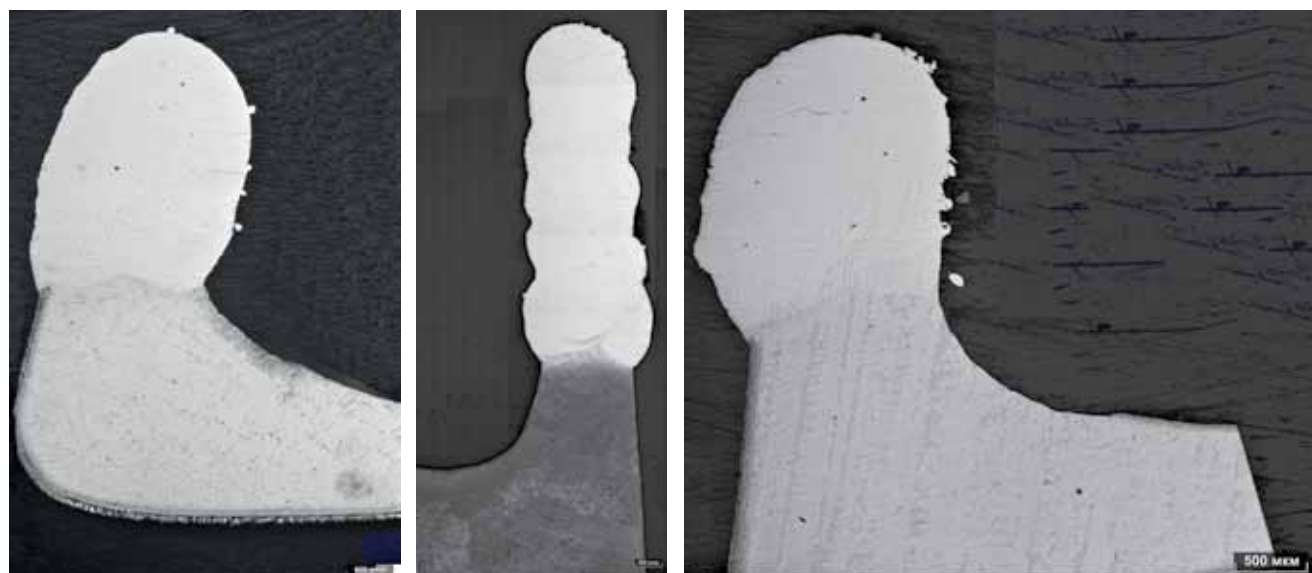


c)

**Рис.7.** Продольные шлифы наплавленных гребешков:

a) Stellite 6 на лопатку из ЖС32-ВИ; b) Inconel 625 на лопатку из ЧС70-ВИ; c) ЭП648 на лопатку из ЖС32-ВИ  
*Fig. 7. Longitudinal thin sections of built-up ridges: a) Stellite 6 on the blade made of ZhS32-VI; b) Inconel 625 on the blade made of ChS70-VI; c) EP648 on the blade made of ZhS32-VI*





a)

b)

c)

**Рис. 8.** Поперечные сечения наплавленных гребешков: а) Stellite 6; б) Inconel 625; в) ЭП648.

**Fig. 8.** Cross sections of built-up ridges: a) Stellite 6; b) Inconel 625; c) EP648

## ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показали, что технология лазерной наплавки способна заменить используемые технологии восстановления лопаток газотурбинных двигателей, снизив себестоимость ремонтного цикла и повысив ресурс их межремонтной эксплуатации. Изготовление адаптивного автоматизированного комплекса также позволит реализовать технологию лазерной наплавки, обеспечив независимость отечественного производителя от импортного оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И.** Производство газотурбинных двигателей" / Под ред. В.В. Крымова. – М.: Машиностроение- Полет, 2002.
2. **Казаков Р.А.** Изготовление лопатки ВНА компрессора ГТД изотермической штамповкой. – Рыбинск: Изд-во ОАО "НПО Сатурн", Конструкторско-технологическое бюро перспективного развития.
3. **Сорокин Л.И.** Аргоно-дуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов. – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.viam.ru/public>.
4. **Климов В.Г.** Сравнение методов восстановления геометрии пера лопаток турбины из жаропрочных сплавов. – Вестник Московского авиационного

which is relevant for blade surfaces with various degrees of wear.

In order to restore the surface of GTE compressor blades, a number of authors suggest using the technology of cathode-ray building-up [18, 19]. Despite the advantages, which are similar to the advantages of laser cladding, this method has restrictions by overall dimensions of restored workpieces depending on the size of vacuum chamber, for the generation of vacuum in which the time is also needed.

Results of laser restoration of the blades of gas transmission stations using nickel-based powders Inconel 625 and Inconel 738 as fillers are specified in the paper [20]. Solid-state laser with the wavelength of 1.07  $\mu\text{m}$  was used in the capacity of laser radiation source. In both variants, high-quality beads were obtained; in case with the material Inconel 738 the following heating of building-up area was additionally used. Also, authors mention the advantages of fiber laser in comparison with  $\text{CO}_2$  laser. The positive result consisted in the presence of control system of weld bead geometry for the purpose of provision of minimum allowance for the further mechanical treatment; also the evaluations of technological capacity of "treatment" of surface cracks of the blades of nickel alloys during the laser cladding were mentioned in the papers [21-23].



- института, 2016, № 1, т.23, с.86-97.
5. **Kasser D.** Laser Powder Fusion Welding. – Электронный ресурс. Режим доступа: [http://huffman-llc.com/pdf/Articles/LPFW%20Huffman\\_Kaser.pdf](http://huffman-llc.com/pdf/Articles/LPFW%20Huffman_Kaser.pdf).
  6. **Kathuria Y.P.** Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry. – Surface and Coatings Technology, 2000, 132, p.262-269.
  7. **Shepeleva L., Medres B., Kaplan W.D. et al.** Laser cladding of turbine blades. – Surface and Coatings Technology, 2000, v.125, p.45-48.
  8. **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, с. 293-297.
  9. НПО "РТ". Рекламный проспект. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.renotech.org>.
  10. **Морозов Е.А., Долговечный А.В., Ханов А.М.** Лазерная наплавка лопатки газотурбинных двигателей. – Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012, т. 14, № 1 (2).
  11. **Jones J., McNutt P., Tosi R. and et al.** Remanufacture of turbine blades by laser cladding, machining and in-process scanning in a single machine. – 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, 2012, p. 821-827.

Analysis of the papers in the area of repair of GTE operating blades showed the industry interest in the implementation of laser technologies. The series of works were performed with respect to the testing of laser cladding technologies for the blades with various application ranges using the devices of different types. Aviation and power machine building refer to strategically significant industries. Therefore, it is required to enhance the level of technological import independence of production processes with respect to new products, repair and maintenance of used products. Major part of technological complexes of laser treatment, which are currently used at the enterprises of aviation engine building and repair, is imported.

#### DEVELOPMENT OF DOMESTIC TECHNOLOGICAL COMPLEX FOR RESTORATION OF GTE OPERATING BLADES USING LASER CLADDING METHOD

In order to establish the restoration of GTE operating blades using the method of laser cladding with the support of Government of Russia (Ministry of Education and Science of the Russian Federation) within the framework of Government



12. Gasser A., Kittel J. Automatic laser cladding for turbine tips. – Subject to alterations in specifications and other technical information, 2013. Электронный ресурс. Режим доступа: [http://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/annual\\_reports/ar12/JB12\\_S91.pdf](http://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/annual_reports/ar12/JB12_S91.pdf).
13. Mobile Machine. From numerical file to real part. Manufacture, modify or repair your metallic parts. – Электронный ресурс. Режим доступа: [http://www.beam-machines.fr/uploads/files/leaflets%20mobile%20en\\_10.02.2016.pdf](http://www.beam-machines.fr/uploads/files/leaflets%20mobile%20en_10.02.2016.pdf)
14. Brandt M., Harris J., Chipperfield C. In-situ laser repair of steam turbine blades. – Proceedings of the Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, Munich, 2007, p. 1-5.
15. Фомичев Е.О., Воронин Н.Н. Анализ существующих способов восстановления лопаток компрессора газотурбинного двигателя. – Двигатель, 2013, № 5 (89), с. 18-19.
16. Kelbassa I., Albus P., Dietrich J. and et al. Manufacturing and repair of aero engine components using laser technology. – Proceedings of the 3rd Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, 2008, p. 208-212.
17. Ермолаев А.С., Иванов А.М., Василенко С.А. Лазерные технологии и процессы при изготовлении и ремонте деталей газотурбинного. – Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2013, № 35, с. 49-63.
18. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А. и др. 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.
19. Патент RU2419526C1 Способ ремонта поверхностных дефектов пера лопаток турбины ГТД.
20. Chen C., Wu H.C., Chiang M.F. Laser cladding in repair of IN738 turbine blades. – International Heat Treatment and Surface Engineering, 2008, v.2, №3/4, p.140-146.
21. Bi G., Gasser A. Restoration of Nickel-Base Turbine Blade Knife-Edges with Controlled Laser Aided Additive Manufacturing. – Physics Procedia, 2011, № 12, p. 402-409.
22. Rottwinkel B., Nölke Ch., Kaierle St. and et al. Crack repair of single crystal turbine blades using laser cladding technology. – Procedia CIRP, 2014, p. 263-267.
23. Vilar R., Santos E.C., Ferreira P.N. and et al. Structure of NiCrAlY coatings deposited on single-crystal alloy turbine blade material by laser cladding. – Acta Materialia, 2009, v. 57, p. 5292-5302.

Decree No. 218, the employees of the Institute of Laser and Welding Technologies of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (ILET SPbPU, Saint Petersburg) are developing the robotized technological complex of laser cladding on the basis of order of CJSC "Plakart". The general concept of complex is given in Fig. 6. The complex has the following components: fiber laser with the capacity of 700 W (1), control system (2), water cooling system (3), industrial robotic manipulator (4), laser cladding head (5) and powder feeder (6).

The special attention in the complex development will be paid to the nozzle part of technological head, which allows providing the coefficient of utilization of built-up powder of not less than 0.5 at the width of built-up beads of 0.8-1.5 (2) mm. Also, the cassette accessories will be developed for the installation of set of one-type blades, and it will allow increasing significantly the efficiency of building up process and reducing the time expenditures connected with installation of individual blades.

Technical parameters of developed complex were determined on the basis of the results of preliminary technological experiments in building up of nickel - and cobalt-based heat-resistant alloys (in the form of powders) on GTE operating blades made of the materials ZhS32-VI and ChS70-VI (Fig. 7).

Metallographic studies of thin sections and X-ray analysis of restored ridges of operating blades showed that there are no pores, cracks, scabs and unfused powder particles in all samples. In case of building up of the powder Stellite 6 on the blade made of ZhS32-VI the welding line is clear (see Fig. 7a). In case of building up of Inconel 625 on the blade made of ChS70-VI and EP648 on the blade made of ZhS32-VI the welding line is wavy with insignificant mix of materials (see Fig. 7b, c). All layers were built-up with minimum allowance for the further mechanical treatment (Fig. 8).

## CONCLUSIONS

The results of performed studies showed that the technology of laser cladding is capable to replace used technologies of restoration of gas turbine engine blades having reduced the cost of repairing cycle and increased the resource of their inter-repair operation. Also, the fabrication of adaptive automated complex will make it possible to implement the technology of laser cladding providing the independence of domestic manufacturer on import equipment.

