



Лазерная наплавка сопловых лопаток из кобальтового сплава MAR-M 509 методом лазерной газопорошковой наплавки

В. Г. Проценко, Д. Ануфриев, М. В. Кузнецов, А. А. Попович
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Представлены параметры режима лазерной газопорошковой наплавки для восстановления сопловых лопаток двигателя MAN TURBO из кобальтового сплава MAR-M 509 с применением отечественного порошка ЭП648. Описаны технологические меры предотвращения образования трещин при лазерной наплавке. Работы по восстановлению серии сопловых лопаток проводили на роботизированном технологическом комплексе прямого лазерного выращивания.

Ключевые слова: лазерная газопорошковая наплавка, лопатки газотурбинных двигателей, сварочные напряжения, металлографический анализ, Inconel 625

Статья получена: 01.06.2025

Статья принята: 20.06.2025

ВВЕДЕНИЕ

Изготовление лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) сопряжено с применением дорогостоящих материалов и сложных технологий, что значительно отражается на их себестоимости. Лопатки турбины являются ответственными деталями, функционирующими в тяжелых эксплуатационных условиях, характеризующихся продолжительными механическими и термическими напряжениями, высокими температурами и воздействием коррозии. При обнаружении дефектов во время

Laser Cladding of Nozzle Blades Made of Cobalt Alloy MAR-M 509 Using the Laser Gas-Powder Cladding Method

V. G. Protsenko, D. Anufriev, M. V. Kuznetsov, A. A. Popovich
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University,
Saint-Petersburg, Russia

The article indicates the parameters of laser gas-powder cladding mode to restore the MAN TURBO engine nozzle blades made of cobalt alloy MAR-M 509 using the domestic powder EP648. The process measures to prevent crack formation during the laser cladding are described. Restoration of a series of nozzle blades was performed using a robotized station for laser direct deposition.

Key words: laser gas-powder cladding, gas turbine engine blades, welding stresses, metallographic analysis, Inconel 625

Article received: June 01, 2025

Article accepted: June 20, 2025

INTRODUCTION

The manufacture of gas turbine engine (GTE) blades involves the use of expensive materials and comprehensive technologies that significantly affects their cost. The turbine blades are critical parts that are used under severe operating conditions specified by the prolonged mechanical and thermal stress, high temperatures and corrosion. If the defects are found during the scheduled inspection, the blades are replaced due to the limited applicability or lack of repair methods. Replacement of the damaged blades with new ones significantly increases the turbine operating costs, so interest in the repair technologies in this area is constantly deepening.

The laser direct deposition (LDD) technologies are very promising in relation to the repair of gas turbine engine blades [1]. The essence of LDD technology is as

планового осмотра лопатки подвергаются замене из-за ограничения применимости или при отсутствии технологий по их ремонту. Замена поврежденных лопаток новыми значительно увеличивает стоимость эксплуатации турбины, поэтому интерес к ремонтным технологиям в данной сфере непрерывно растет.

Весьма перспективными, применительно к ремонту лопаток ГТД, являются технологии прямого лазерного выращивания (ПЛВ) [1]. Суть технологии ПЛВ заключается в следующем: лазерный луч высокой мощности фокусируется на поверхности детали, создавая ванну расплава. В эту область подается металлический порошок, который расплавляясь, формирует валик наплавленного материала. Робот-манипулятор перемещает оптическую головку [2] с установленным на ней соплом для подачи металлического порошка по заранее выбранной траектории и согласно 3D-модели выращиваемого изделия. Таким образом, слой за слоем происходит выращивание изделия.

Главным преимуществом этих технологий является высокая плотность мощности и локальность нагрева в зоне воздействия, что позволяет проводить наплавку тонкостенных выходных кромок без образования большой зоны термического влияния. Важной характеристикой лазерного излучения как источника тепла является его технологическая гибкость, позволяющая работать в импульсных режимах с широкими диапазонами значений времени импульса и времени паузы. Управление данными параметрами дает возможность контролировать объем ванны расплава, длительность прибывания металла выше критических температур, скорости охлаждения, а также при необходимости позволяет отделить процесс нагрева от процесса плавления [3].

В работе рассмотрен пример отработки и применения лазерной газопорошковой наплавки для восстановления сопловых лопаток 2 степени двигателя MAN TURBO.

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ ГАЗОПОРШКОВОЙ НАПЛАВКИ

При лазерной наплавке (рис. 1) плавление основного и присадочного металла осуществляется с помощью лазерного излучения 1. Претерпевший в процессе наплавки фазовые и структурные превращения металл детали 8 образует зону термического влияния 7. В качестве присадочного металла в данном процессе применяют металлический порошок, который, расплавляясь и перемешиваясь с основным металлом, образует ванну рас-

follows: a high-power laser beam is focused on the surface of the part while developing a molten pool. The metal powder is fed into this area, melts, and forms a bead of deposited material. A robotic manipulator moves the optical head [2] with a nozzle installed for feeding the metal powder along a pre-selected route and according to a 3D model of the product being grown. Thus, the product is deposited on a layer upon layer basis.

The main advantage of these technologies is the high power density and local heating in the impact area that allows cladding of thin-walled trailing edges without generation of a large heat-affected zone. An important specification of laser radiation as a heat source is its process flexibility that allows working in the pulsed modes with wide ranges of pulse time and pause time values. Control of these parameters makes it possible to monitor the molten pool volume, the duration of metal stay above the critical temperatures, cooling rates, and, if necessary, allows separating the heating process from the melting process [3].

This article examines an example of the development and application of laser gas-powder cladding for restoration of the MAN TURBO engine 2nd stage nozzle blades.

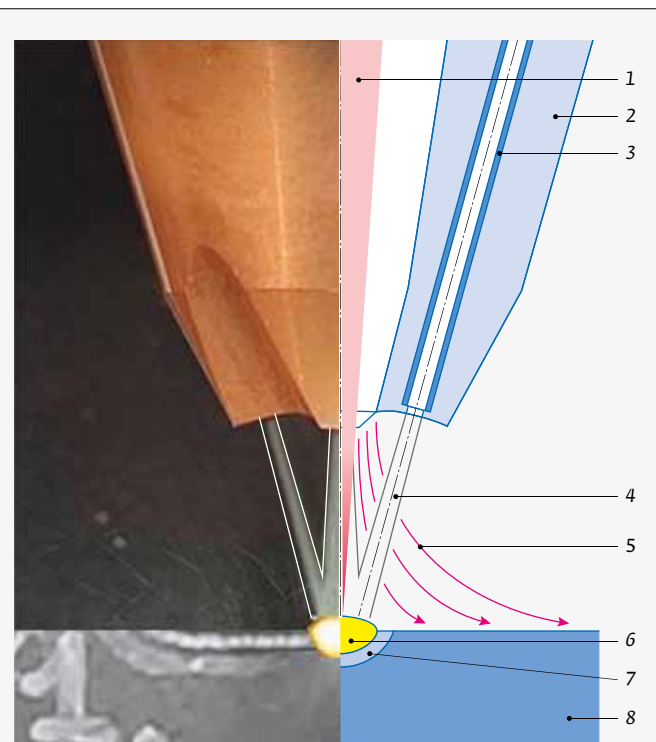


Рис. 1. Процесс лазерной газопорошковой наплавки
Fig. 1. Laser gas powder cladding process

плава 6. Подача порошка в ванну расплава осуществляется через инжекторы 3, расположенные в сопле 2. В ходе данной работы использовали сопло С4-12 с четырьмя инжекторами, фокусирующими газопорошковую смесь 4, на расстоянии 12 мм от торца сопла. Через осевой канал из сопла подается защитный газ аргон 5.

После кристаллизации ванны расплава образуется валик, одними из основных параметров которого являются ширина, глубина проплавления и высота. Необходимые размеры валика устанавливают исходя из геометрических размеров детали, требований к припускам на механическую обработку и требуемой чистоты поверхности.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Отработку режимов и работы по восстановлению серии сопловых лопаток проводили на роботизированном технологическом комплексе прямого лазерного выращивания (РТК ПЛВ) (рис. 2).

LASER GAS POWDER CLADDING TECHNOLOGY

During the laser cladding process (Fig. 1), the base and filler metal are melted using the laser radiation 1. The metal of the part 8 that has undergone phase and structural transformations during cladding, generates a heat-affected zone 7. In this process, the metal powder is used as a filler metal. It melts, mixes with the base metal, and forms a molten pool 6. The powder is fed into the molten pool through the injectors 3 located in the nozzle 2. In this paper, a C4-12 nozzle was applied, with four injectors focusing the gas-powder mixture 4 at a distance of 12 mm from the nozzle end. The argon shielding gas 5 is fed from the nozzle through the axial channel.

After the molten metal crystallization, a bead is formed. Some of its main parameters includes width, side penetration and reinforcement. The required dimensions of the bead are set based on the geometric dimensions of the part, requirements for machining allowance and surface cleanliness.

RESEARCH EQUIPMENT

The application of modes and works to restore a series of nozzle blades have been performed using a robotized station for laser direct deposition (RSLDD) (Fig. 2).

The modernized RSLDD includes the following equipment:

- Robot Fanuc M-20iA/20M;
- Double-axis positioner Fanuc with a lifting capacity of 500 kg;
- IPG ytterbium fiber laser with the power of 5 kW;
- Powder feeder Oerlicon Twin 10 C;
- Processing tool based on the FLW d30 laser head (IPG), including an adjustment unit (Saint-Petersburg Polytechnic University), a transition part (Saint-Petersburg Polytechnic University) and a C4-18 nozzle (Saint-Petersburg Polytechnic University);
- An airtight chamber with a glove box, including the excess pressure generation and maintenance systems;
- Process equipment with the ceramic heaters for preliminary and subsequent heating.

The RSLDD is designed for laser direct deposition and laser cladding in a controlled atmosphere. The cladding process automation ensures a minimum machining allowance.

OPTIMIZATION OF THE CLADDING MODE

Due to the need to restore thin-walled trailing edges with a thickness of 1 mm and parts with



Рис. 2. Роботизированная установка прямого лазерного выращивания

Fig. 2. Robotized station for laser direct deposition

В состав модернизированного РТК ПЛВ входит следующее оборудование:

- робот Fanuc M-20iA/20M;
- 2-х осевой позиционер Fanuc грузоподъемностью 500 кг;
- иттербиевый оптоволоконный лазер IPC мощностью 5 кВт;
- порошковый питатель Oerlicon Twin 10 C;
- технологический инструмент на базе лазерной головки FLW d30 (IPC), включающий юстировочный узел (СПБПУ), переходную часть (СПБПУ) и сопло C4-18 (СПБПУ);
- герметичная камера с перчаточным боксом, включающая системы создания и поддержания избыточного давления;
- технологическая оснастка с керамическими нагревателями для предварительного и сопутствующего подогрева.

РТК ПЛВ предназначен для прямого лазерного выращивания и лазерной наплавки в контролируемой атмосфере. Автоматизация процесса наплавки обеспечивает минимальный припуск на механическую обработку.

ОТРАБОТКА РЕЖИМА НАПЛАВКИ

Из-за необходимости восстановления тонкостенных выходных кромок толщиной от 1 мм, а также частей, имеющих сложный профиль, для наплавки использовали импульсный режим. Он имеет большее по сравнению с непрерывным режимом количество параметров, что позволяет регулировать в широких пределах основные параметры процесса наплавки. Ключевым при этом является снижение погонной энергии, что позволяет снизить остаточные продольные напряжения в шве. Это связано с изменением формы температурных полей: изотермы становятся более округлыми, отношение величины продольной оси изотеры к поперечной уменьшается.

В качестве материала для наплавки использовался металлический жаропрочный никелевый порошок ЭП648 с фракцией 40–200 мкм. Исследования механических свойств образцов, полученных лазерной газопорошковой наплавкой из зарубежного аналога ЭП648, показали что механические свойства наплавленного металла близки к свойствам литых сплавов на основе кобальта [4].

При отработке режима наплавки результаты работ [5, 6] были взяты за основу для варьирования следующих параметров: мощность лазерного излучения P от 500 Вт до 1500 Вт, массовый расход порошка R от 3 до 7 г/мин, время импульса $T_{\text{и}}$ от 0,05 с до 1,5 с, время паузы $T_{\text{п}}$ от 0,1 с до 2 с, смеще-

а compound section, a pulse mode was used for cladding. It has a larger number of parameters compared to the continuous mode that allows for a wide range of adjustments for the main parameters of the cladding process. In this case, the key function is the linear energy reduction that provides for a reduction in the residual longitudinal stresses in the weld. This is due to a change in the shape of temperature fields: the isotherms become more rounded, the ratio of the isotherm longitudinal axis to the transverse axis is decreased.

The metal heat-resistant nickel powder EP648 with a fraction of 40–200 μm was used as the adding material. The studies of mechanical properties of the samples obtained by the laser gas-powder cladding technology using a foreign analogue of EP648 have showed that the mechanical properties of deposited metal are close to the properties of cast alloys based on cobalt [4].

When optimizing the cladding mode, the results of papers [5, 6] were taken as a basis for varying the following parameters: laser radiation power P from 500 W to 1500 W, powder mass flow rate R from 3 to 7 g/min, pulse time T_i from 0.05 s to 1.5 s, pause time T_p from 0.1 s to 2 s, displacement along the x -axis from 0.8 to 1.2 mm, displacement along the z -axis from 0.2 to 0.5 mm; the distance to the head cut H has remained constant in all experiments. The cladding mode parameters that allow obtaining the high-quality formation are given in Table 1, the deposited layer section is shown in Fig. 3, the deposited layer appearance is shown in Fig. 4.

The deposited metal is generated by a columnar structure. During deposition, partial melting of the dendrite branches of the MAR-M 509 alloy occurs. It is well-known that the surface energy between the melt and two crystallites is greater than between two crystals, therefore, the solid phase nuclei are developed on the melted surfaces of the dendrites. The crystals are grown normally along the isothermal surface in the direction opposite to the heat removal. Continuous changes in the temperature gradient when the heat source is removed entails a continuous change in the crystallite growth direction. As a first approximation, it can be considered that the crystallite axes remain orthogonal to the surfaces of the crystallization front family. The change in the spatial orientation of the grains is visible on the deposited wall section (Fig. 5).

Due to the dissolution of carbides, the fusion line section has an increased hardness (Fig. 6). To reduce any residual stresses and decrease hardness in the

Таблица 1. Параметры режима наплавки

Table 1. Parameters of the cladding mode

Р, Вт	Р, г/мин	$T_{и},$ °С	$T_{п},$ °С	Н, мм	$\Delta x,$ мм	$\Delta z,$ мм
Р, Вт	Р, g/min	$T_{и},$ °С	$T_{п},$ °С	Н, mm	$\Delta x,$ mm	$\Delta z,$ mm
1000	4	0,2	1	193	1,3	0,5

ние по оси x , от 0,8 до 1,2 мм, смещение по оси z от 0,2 до 0,5 мм, расстояние до среза головы H во всех опытах оставалось постоянным. Параметры режима наплавки, позволяющие получить качественное формирование, представлены в табл. 1, поперечный шлиф наплавленного слоя – на рис. 3, внешний вид наплавленного слоя – на рис. 4.

Наплавленный металл образован столбчатой структурой. При наплавке происходит частичное оплавление ветвей дендритов сплава MAR-M 509. Как известно, поверхностная энергия между расплавом и двумя кристаллитами больше, чем между двумя кристаллами, поэтому зародыши твердой фазы возникают на оплавленных поверхностях дендритов. Кристаллы растут нормально к изотермической поверхности в направлении, обратном направлению теплоотвода. Непрерывное изменение градиента температуры при удалении источ-

fusion zone, stress-relief annealing was performed at a temperature of 650 °C for 2 hours [7].

To test the mechanical properties of the deposited metal, a series of cylindrical samples was prepared for static tensile testing according to GOST 1497-84, type IV, No. 8. The test was performed along and across the growth direction. The mechanical test results are given in Table 2. It is shown by the data given in Table 2 that the deposited material EP648 has high mechanical properties that allow it to be used for the restoration of blades.

TECHNOLOGICAL MEASURES TO PREVENT CRACK FORMATION DURING THE LASER CLADDING PROCESS

In an attempt to apply the optimized cladding method for the MAN TURBO engine 2nd stage nozzle blades, 2 types of cracks were formed (Fig. 7).



Рис. 4. Фотография полученной наплавки
Fig. 4. Photograph of the obtained weld deposit



Рис. 3. Поперечный шлиф образца из ЭП648
Fig. 3. Cross-section of a sample made of EP648



Рис. 5. Микроструктура зоны сварного соединения
Fig. 5. Microstructure of the weld zone

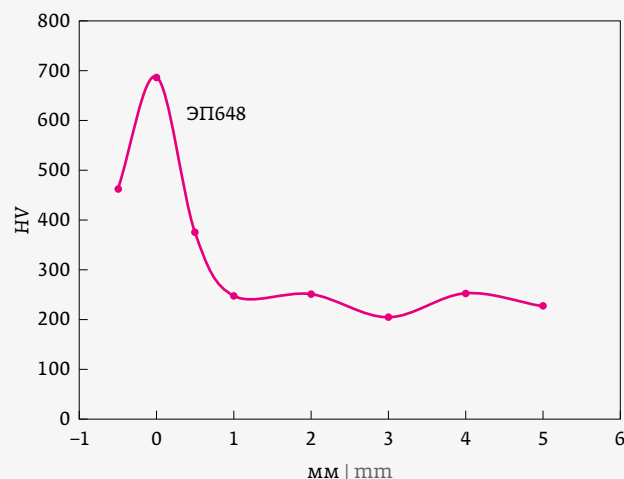


Рис. 6. Распределение твердости по высоте наплавленного слоя

Fig. 6. Distribution of hardness by the deposited layer height

ника тепла влечет за собой непрерывное изменение направления роста кристаллитов. В первом приближении можно считать, что оси кристаллитов остаются ортогональными к поверхностям семейства фронтов кристаллизации. Изменение пространственной ориентации зерен видно на поперечном шлифе наплавленной стенки (рис. 5).

Вследствие растворения карбидов участок линии сплавления имеет повышенную твердость (рис. 6). Для уменьшения остаточных напряжений и снижения твердости в зоне сплавления проводили отжиг при температуре 650 °C в течение 2 ч [7].

Для проверки механических свойств наплавленного металла изготовили серию цилиндрических образцов для испытаний на статическое растяжение по ГОСТ 1497-84, тип IV, № 8. Испытание проводили вдоль и поперек направления выращивания, результаты механических испытаний представлены в табл. 2. Как видно из представленных в табл. 2 данных, наплавленный материал ЭП648 обладает высокими механическими свойствами, что позволяет применить его для восстановления лопаток.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ

При попытке применить отработанный режим для наплавки сопловых лопаток 2 ступени двигателя MAN TURBO образовывалось 2 вида трещин (рис. 7).

The main reason for their formation is welding deformations and stresses that occur as a result of casting shrinkage related to the decreased metal volume during crystallization and cooling [8] as well as due to the opening of microcracks occurred during operation (Fig. 8).

To reduce welding stresses and deformations, the following measures were taken:

- Cleaning the surface layer of the blade metal in the area adjacent to the fusion line;
- Pre-annealing at a temperature of 650 °C for 2 hours to relieve stresses that occur during operation;
- Welding of an intermediate layer made of a material with the high plasticity Inconel 625;
- Welding of stiffening ribs to reduce deformations;
- Preheating and subsequent heating up to 300 °C to reduce the cooling rate in various areas of the welded joint;
- Annealing to relieve stress after cladding at 650 °C for 2 hours.

The above measures have made it possible to prevent crack formation during the cladding process and subsequent heat treatment.

The preliminary and subsequent heating up to 300 °C was performed using the specialized equipment including the ceramic infrared emitters with a spherical radiating surface and a scattering angle of 75°. The total power of the emitters was 2000 W. The

Таблица 2. Результаты испытаний на статическое растяжение наплавленного материала ЭП648

Table 2. Results of static tensile tests of the deposited material EP648

Вырезка образца Sample cut	Температура испытаний, °C Test temperature, °C	Предел текучести, σ _{0.2} , МПа Yield strength, σ _{0.2} , МПа	Временное сопротивление, σ _В , МПа Ultimate strength, σ _В , МПа	Относительное удлинение при разрыве, δ, % Elongation at break, δ, %	Относительное сужение в шейке, ψ, % Contraction in the neck, ψ, %
Поперек направления выращивания Across the deposition direction	22	621	816	27,9	42
		502	746	22,0	27
		508	800	31,2	38
Вдоль направления выращивания Along the deposition direction		440	735	46,8	59
		449	755	46,4	60
		443	746	43,6	60

Основной причиной их образования являются сварочные деформации и напряжения, которые возникают вследствие литейной усадки, связанной с уменьшением объема металла при кристаллизации и остывании [8], а также вследствие раскрытия возникших в процессе эксплуатации микротрещин (рис. 8).

Для уменьшения сварочных напряжений и деформаций были приняты следующие меры:

- зачистка поверхностного слоя металла лопатки в зоне, прилегающей к линии сплавления;
- предварительный отжиг 650 °C в течение 2 ч. для снятия напряжений, возникших при эксплуатации;
- наплавка промежуточного слоя из материала с высокой пластичностью Inconel 625;
- приварка ребер жесткости для уменьшения деформаций;
- предварительный и сопутствующий подогрев до 300 °C для снижения скорости охлаждения на различных участках сварного соединения;
- отжиг для снятия напряжений после наплавки 650 °C в течение 2 ч.

Приведенные выше меры позволили предотвратить трещинообразование в процессе наплавки и последующей термической обработки.

Предварительный и сопутствующий подогрев до 300 °C осуществляли с использованием специализированной оснастки, оснащенной керамическими инфракрасными излучателями со сферической излучающей поверхностью с углом

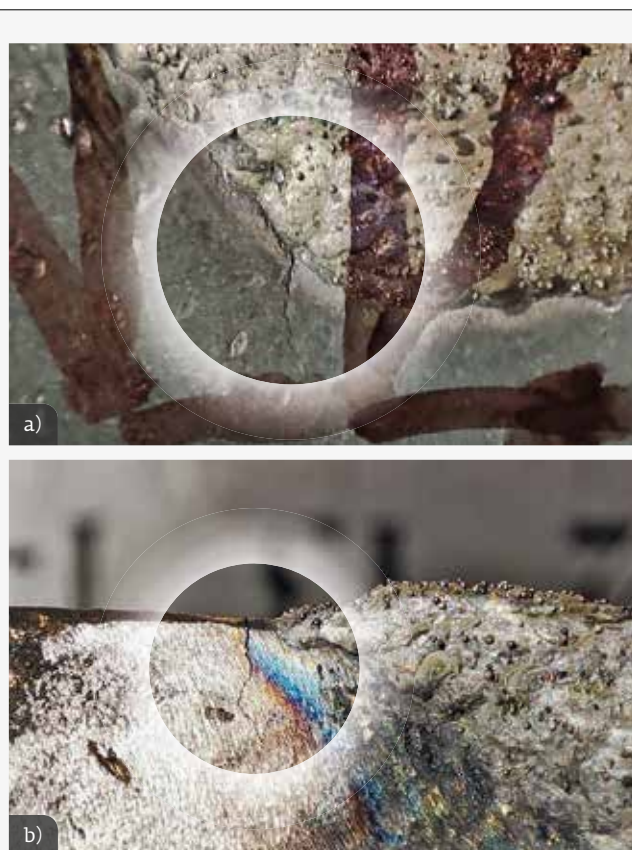


Рис. 7. Трещины, образованные при наплавке:

a) – по линии сплавления;

b) – в зоне термического влияния

Fig. 7. Cracks formed during the cladding process:

a) – along the fusion line; b) – in the heat-affected zone

рассеивания 75°. Суммарная мощность излучателей 2000 Вт. Контроль температуры подогрева осуществляли с использованием инфракрасного бесконтактного термометра. Лопатку устанавливали на ложемент, размещенный между двумя излучателями (рис. 9).

С использованием вышеописанного технологического процесса методом лазерной наплавки восстановили две серии сопловых лопаток в общем количестве 20 штук. Первая серия успешно прошла подконтрольные испытания в течение 12 тысяч часов в составе двигателя MAN TURBO и в настоящий момент эксплуатируется.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных работ был отработан режим лазерной газопорошковой наплавки. На основании проведенного металлографического анализа установлено, что причинами возникновения трещин являются микротрещины в поверхностных слоях, возникшие в металле в процессе эксплуатации. В процессе термомеханического цикла наплавки микротрещины раскрываются, образуя макротрещины. Учитывая характер их возникновения, была отработана технология, позволяющая снизить риск возникновения трещин. Проведено восстановление 20 лопаток из кобальтового сплава MAR-M 509 с применением отечественного порошка ЭП648 и проведены подконтрольные испытания, подтвердившие эксплуатационную надежность лопаток, восстановленных лазерной газопорошковой наплавкой.

АВТОРЫ

Проценко Владимир Георгиевич, инженер научно-исследовательской лаборатории «Лазерные и аддитивные технологии», Институт машиностроения, материалов и транспорта, федеральное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Россия. Область научных интересов: гибридная лазерно-дуговая сварка, лазерная сварка, аддитивные технологии, лазерная наплавка, прямое лазерное выращивание.

Ануфриев Дмитрий, инженер научно-исследовательской лаборатории «Лазерные и аддитивные технологии», младший научный сотрудник Российско-Германского центра лазерных технологий, Институт машиностроения, материалов и транспорта, федеральное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Россия. Область научных интересов: Лазерные аддитивные технологии, прямое лазерное выращивание, лазерная и лазерно-дуговая сварка, лазерная термообработка; e-mail: dmitriyanufriyev23@yandex.ru. ORCID: 0009-0005-5698-9625

Кузнецов Михаил Валерьевич, к. т. н., заведующий научно-исследовательской лаборатории «Лазерные и аддитивные технологии», Институт машиностроения, материалов и транспорта, федеральное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Россия. Область научных интересов: гибридная лазерно-дуговая сварка, лазерная сварка, аддитивные технологии, лазерная наплавка, прямое лазерное

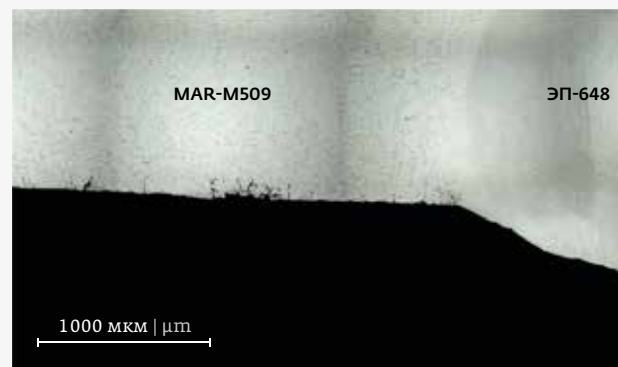


Рис. 8. Шлиф зоны сплавления MAR-M 509 и ЭП648 (наплавка с правой стороны)

Fig. 8. Section of the fusion zone MAR-M 509 and EP648 (weld deposit on the right side)

heating temperature was controlled using an infrared non-contact thermometer. The blade was installed on a support located between two emitters (Fig. 9).

While using the above-described technological process, two series of nozzle blades in a total of 20 pieces were restored by the laser cladding. The first series successfully passed the controlled tests for 12 thousand hours as a part of a MAN TURBO engine and is still currently in use.

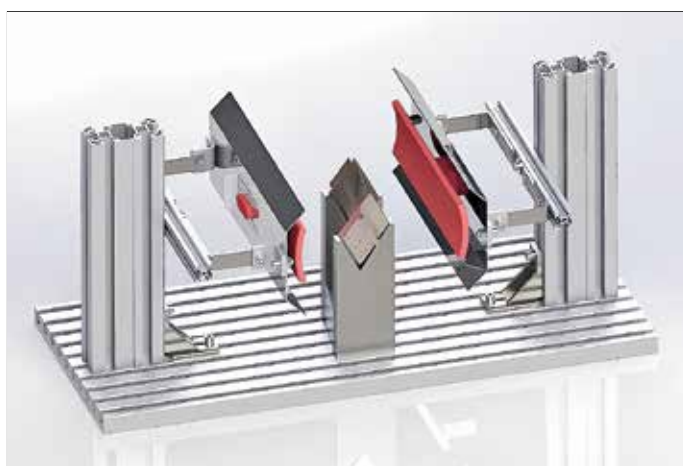


Рис. 9. Модель оснастки для предварительного и сопутствующего подогрева лопатки

Fig. 9. Model of equipment for preliminary and subsequent heating of a blade



выращивание. E-mail: kuznetsov_mich@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-9981-1078

Попович Анатолий Анатольевич, д. т. н., профессор, директор Института машиностроения, материалов и транспорта, федеральное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Россия. Область научных интересов: разработка теоретических основ и эффективных технологий получения порошков тугоплавких соединений и сплавов на их основе в условиях высокотемпературного механохимического синтеза, создание новых анодных и катодных материалов для литий-ионных полимерных аккумуляторов, аддитивные технологии.

ORCID: 0000-0002-5974-6654

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Все авторы внесли свой вклад в работу в соответствии с распределением задач. С текстом согласны.

REFERENCES

1. Zemlyakov E. V., Babkin K. D., Korsmik R. S., Sklyar M. O., Kuznetsov M. V. Prospects of Use of Laser Cladding Technology for Restoration of Compressor Blades of Gas Turbine Engines. *Photonics Russia*. 2016;58(4):10–25. DOI: 10.22184/1993-7296.2016.58.4.10.22.
Земляков Е. В., Бабкин К. Д., Корсмик Р. С., Гущина (Скляр) М. О., Кузнецов М. В. Перспективы использования технологии лазерной наплавки для восстановления лопаток компрессоров газотурбинных двигателей. *Фотоника*. 2016;58(4):10–25. DOI: 10.22184/1993-7296.2016.58.4.10.22.
2. Кузнецов М., Земляков Е., Бабкин К. Обзор лазерных технологических головок для реализации промышленных лазерных технологий обработки металлических материалов. *Фотоника*. 2016; 60(6):14–33. DOI:10.22184/1993-7296.2016.60.6.14.33.
Kuznetsov M., Zemlyakov E., Babkin K. Review of Laser Technological Heads for Implementation of Industrial Laser Technologies of Metal Material Working. *Photonics Russia*. 2016; 60(6):14–33. DOI:10.22184/1993-7296.2016.60.6.14.33.
3. Popovich A. A., Sufiyarov V. Sh., Razumov N. G., Borisov E. V., Masajlo D. V., Goncharov I. S. *Materialy i additivnye tekhnologii. Sovremennyye materialy dlya additivnykh tekhnologii.* – SPb.: POLITEH-PRESS. 2021. – 204 s.
Попович А. А., Суфьяров В. Ш., Разумов Н. Г., Борисов Е. В., Масайло Д. В., Гончаров И. С. *Материалы и аддитивные технологии. Современные материалы для аддитивных технологий.* – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2021. – 204 с.
4. Groden C., Bose S., Bandyopadhyay A., Champagne V. Inconel 718-CoCrMo bimetallic structures through directed energy deposition-based additive manufacturing. *Materials Science in Additive Manufacturing*. 2022;1(3): 18. DOI: 10.18063/msam.v1i3.18.
5. Kuznetsov M., Turichin G., Silevich V., Ochkasov V., Sorokin A. Research of technological possibility of increasing erosion resistance rotor blade using laser cladding: 17th Nordic Laser Materials Processing Conference – NOLAMP17. *Procedia Manufacturing*. 2019; 36:163–175.
6. Evgenov A. G., Shcherbakov S. I., Rogalev A. M. Oprobovanie poroshkov zharoprochnykh spлавov EP718 i EP648 proizvodstva FGUP "VIAM" dlya remonta detalej GTD metodom lazernoy gazoporoshkovoy naplavki. *Aviacionnyye materialy i tekhnologii*. 2016;1(43): 16–23.
Евгенов А. Г., Щербаков С. И., Рогалев А. М. Опробование порошков жаропрочных сплавов ЭП718 и ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» для ремонта деталей ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки. *Авиационные материалы и технологии*. 2016;1(43): 16–23.
7. Li P., Zhou J., Gong Y., Meng X., Lu J. Effect of post-heat treatment on the microstructure and mechanical properties of laser metal deposition Inconel 718. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021;35(7): 2871–2878. DOI: 10.1007/s12206-021-0610-4.
8. Mo B., Li T., Shi F., Deng L., Liu W. Crack initiation and propagation within nickel-based high-temperature alloys during laser-based directed energy deposition: A review. *Optics & Laser Technology*. 2024; 179: 27. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111327.

CONCLUSIONS

As a result of the works performed, the laser gas-powder cladding mode was optimized. Based on the metallographic analysis, it was found that the causes of cracks are microcracks in the surface layers that occurred in the metal during operation. During the thermal deformation cycle of cladding, the microcracks are opened up, while forming macrocracks. With due regard to the nature of their occurrence, a technology was developed that allows reducing the risk of cracks. 20 blades made of cobalt alloy MAR-M 509 were restored using the domestic powder EP648. The controlled tests were carried out, confirming the functional reliability of the blades restored by the laser gas-powder cladding process.

AUTHORS

Protsenko Vladimir G., engineer of the research laboratory "Laser and Additive Technologies", Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University", Saint-Petersburg, Russia. Area of expertise: arc augmented laser hybrid welding, laser welding, additive technologies, laser cladding, direct laser deposition.

Anufriev Dmitry, Engineer of the Research Laboratory "Laser and Additive Technologies", Research Laboratory "Laser and Additive Technologies", Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University", Saint-Petersburg, Russia. Area of expertise: Laser additive technologies, direct laser deposition, laser and laser-arc welding, laser heat treatment; e-mail: dmitriyanufriyev23@yandex.ru.
ORCID: 0009-0005-5698-9625

Kuznetsov Mikhail V., Cand. of Technical Sciences, Head of the Research Laboratory "Laser and Additive Technologies", Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University", Saint-Petersburg, Russia. Area of expertise: arc augmented laser hybrid welding, laser welding, additive technologies, laser cladding, direct laser deposition. E-mail: kuznetsov_mich@mail.ru.
ORCID: 0000-0002-9981-1078

Popovich Anatoly A., Doctor of Technical Sciences, professor, director of the Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University", Saint-Petersburg, Russia. Area of expertise: development of theoretical fundamentals and efficient technologies for obtaining powders of refractory compounds and related alloys in the conditions of high-temperature mechanochemical synthesis, development of new anode and cathode materials for lithium-ion polymer batteries, additive technologies.
ORCID: 0000-0002-5974-6654

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest. All authors contributed to the paper in accordance with the task distribution. The authors agree with the text.



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Институт
машиностроения,
материалов
и транспорта

Научно-исследовательская лаборатория
«Лазерные и аддитивные технологии»

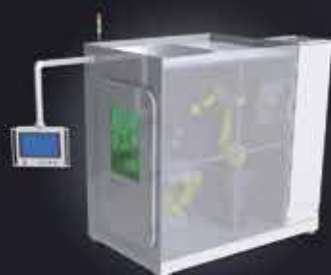
Технологические комплексы ГЛДС, ПЛВ и лазерной наплавки



Роботизированный технологический комплекс гибридной лазерно-дуговой сварки

Технические характеристики:

- Система перемещения:
 - 6-и осевой промышленный робот + 2-х осевой позиционер (опционально)
 - портального типа + 2-х осевой позиционер (опционально)
- Иттербиевый волоконный лазер
- Промышленный сварочный аппарат
- Свариваемые материалы: стали и сплавы на основе Fe, Ni, Ti, Co, Cu, Al
- Толщина свариваемого металла: до 20 мм за один проход
- Шумоизоляционная защитная кабина с оптическими фильтрами и видеонаблюдением
- Изготовитель: СПбПУ (РФ)



Роботизированный комплекс прямого лазерного выращивания

Технические характеристики:

- Система перемещения:
 - 6-и осевой промышленный робот + 2-х осевой позиционер (опционально)
 - портального типа + 2-х осевой позиционер (опционально)
- Иттербиевый волоконный лазер мощностью до 6 кВт
- Наплавляемый материал: металлический порошок, сварочная проволока (на основе Fe, Ni, Ti, Co, Cu, Al), ФГМ
- Производительность: до 2 кг/час
- Габаритные размеры обрабатываемого изделия: до $\varnothing 1300 \times 800$ мм
- Масса изделия: до 1000
- Повторяемость работы $\pm 0,03$ мм
- Порошковый питатель: 1-4 колбы
- Контролируемая атмосфера
- Вакуумируемый шлюз
- Изготовитель: СПбПУ (РФ)



Мобильный комплекс лазерной наплавки

Технические характеристики:

- Система перемещения: 6-и осевой робот и дополнительная ось с возможностью подключения к внешним устройствам позиционирования
- Иттербиевый волоконный лазер с максимальной мощностью до 6 кВт
- Наплавляемый материал: металлический порошок, сварочная проволока (на основе Fe, Ni, Ti, Cr, Co, Cu, Al), ВЭС, ФГМ
- Производительность: до 4-х кг/час
- Порошковый питатель: 1-4 колбы
- Максимальная масса изделия: не ограничена
- Изготовитель: СПбПУ (РФ)

Заведующий НИЛ «ЛиАТ» ИММиТ СПбПУ: Кузнецов Михаил Валерьевич

E-mail: kuznetsov_mv@spbstu.ru, kuznetsov_mich@mail.ru

Телефон: +79112371646

