



РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО СИНТЕЗИРОВАНИЯ АНТИФРИКЦИОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СУДОВЫХ ГРЕБНЫХ ВАЛОВ*

Н. А. Афанасьев

АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», Санкт-Петербург, Россия

К судам арктического плавания заказчик предъявляет повышенные требования по надежности, эксплуатационной эффективности и экологичности. Движительные системы судов арктического плавания, в частности ледоколов, состоят из мощной многовальной силовой установки, единичная мощность которой составляет 20 МВт и более, и короткого жесткого валопровода с минимальным количеством подшипников. Предложено для формирования антифрикционной поверхности трения использовать технологию порошковой лазерной наплавки бронзы на стальной втулке.

Надежность и эффективность эксплуатации транспортных судов характеризуется в том числе безаварийной работой движительной системы, что можно обеспечить только комплексом прогрессивных конструктивно-технологических решений, реализуемых при постройке судна. Это особо касается судов арктического плавания, к которым заказчик предъявляет повышенные требования по надежности, эксплуатационной эффективности и экологичности [1].

Движительные системы современных судов арктического плавания, в частности ледоколов, относятся к разряду тяжело нагруженных и состоят, как правило, из мощной многовальной силовой установки, единичная мощность которой составляет 20 МВт и более, и короткого жесткого валопровода с минимальным количеством подшипников,

* *Примечание редактора:* Статья рекомендована программным комитетом конференции, проходившей в рамках специализированной выставки лазерной, оптической и оптоэлектронной техники «Фотоника. Мир лазеров и оптики. 2019».

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR LASER SYNTHESIS OF ANTIFRICTION SURFACE OF LARGE-SIZED SHIP PROPELLER SHAFTS*

N.A. Afanasyev

Centre for Shipbuilding and Ship Repair Technology, JSC,
St. Petersburg, Russia

Customers have increased demands on reliability, operational efficiency and environmental friendliness of ships of the Arctic navigation. The propulsion systems of Arctic navigation ships, in particular icebreakers, consist of a powerful multi-shaft powerplant with a unit capacity of 20 MW and more, and a short rigid shaft line with a minimum number of bearings. It is proposed to use the technology of powder laser deposition of bronze on a steel sleeve for forming an antifriction surface.

The reliability and efficiency of the operation of transport ships is characterized, among other things, by the trouble-free operation of the propulsion system, which can be ensured only by a set of progressive constructive-technological solutions implemented during the construction of the ship. This is especially true for Arctic navigation ships, to which the customer places increased demands on reliability, operational efficiency and environmental friendliness [1].

The propulsion systems of modern Arctic navigation ships, in particular, icebreakers, are classified as heavily loaded and usually consist of a powerful multi-shaft powerplant with a unit power of 20 MW and more, and a short rigid shaft line with a minimum number of bearings, while the shafts have a diameter 700 mm and above [2]. On the icebreaker of the project 2220 “Arktika” (Fig. 1a), the shaft diameter is 860 mm, and in the projected icebreaker of the project 10510 “Lider” (Fig. 1b) will be more than 1050 mm.

Design features and significant mass-dimensional characteristics of propulsion systems require special manufacturing techniques, centring and installation, since the existing technologies mastered by the shipyards in

* *Editor's Note:* The article was recommended by the program committee of the conference, held as part of the specialized exhibition of laser, optical and optoelectronic equipment “Photonics. World of lasers and optics. 2019”.

при этом валы имеют диаметр 700 мм и выше [2]. На ледоколе проекта 22220 «Арктика» (рис. 1а) диаметр вала составляет 860 мм, а в проектируемом ледоколе проекта 10510 «Лидер» (рис. 1б) составит более 1050 мм.

Конструктивные особенности и значительные массогабаритные характеристики движительных систем требуют специальных технологий изготовления, центровки и монтажа, так как существующие технологии, освоенные верфями в 70-х годах прошлого века, не обеспечат реализацию тех требований, что предъявляются в настоящее время к движительным системам судов арктического плавания.

Существующая технология формирования антифрикционной поверхности трения дейдвудного подшипника базируется на установке облицовок из бронзы на гребной вал с натягом «в горячую». Учитывая габариты гребного вала и облицовок, весьма велик риск заклинивания облицовки при насадке. Кроме того, при такой технологии облицовка является концентратором напряжений, что снижает усталостную прочность гребного вала и может привести к его поломке.

Для замены традиционной технологии установки дорогостоящих облицовок из бронзы на гребной вал АО «ЦТСС» предложила использовать технологию порошковой лазерной наплавки для создания антифрикционного слоя бронзы на стальной втулке.

Одним из главных технологических достоинств метода лазерной наплавки в сравнении с такими традиционными методами, как электродуговая или плазменная наплавка, является низкий подвод тепла к основному материалу. Это способствует снижению деформации создаваемых изделий. Высокая скорость охлаждения способствует формированию желаемой мелкозернистой микроструктуры. Данная технология обеспечивает полное металлургическое сцепление наплавочного слоя с основой и низкое разжижение (смешение с металлом основы) по сравнению с традиционными методами. Таким образом, одного слоя покрытия бывает достаточно для полного замещения базового материала. При этом допуски по толщине и качество поверхности оказываются вполне приемлемыми и, в зависимости от задачи, требуют лишь минимальных доработок или сразу полностью соответствуют техническим требованиям.

Основной задачей при разработке технологического процесса лазерной порошковой наплавки является получение покрытия высокого качества



Рис. 1. Современные суда арктического плавания: а) ледокол проекта 22220 «Арктика»; б) ледокол проекта 10510 «Лидер»
Fig. 1. Modern ships of the Arctic navigation a) icebreaker of the project 22220 "Arktika"; b) icebreaker of the project 10510 "Lider"

the 70s of the last century will not meet the requirements that are currently imposed on the propulsion systems of Arctic navigation ships.

The existing antifriction technology of forming friction surface of the stern shaft bearing is based on the installation of bronze linings on the propeller shaft with a "hot" fit. Considering the dimensions of the propeller shaft and linings, the risk of jamming of the liner during the nozzle is very high. In addition, with this technology, cladding is a stress concentrator, which reduces the fatigue strength of the propeller shaft and can lead to its breakage.

To replace the traditional technology of installation of expensive bronze linings on the propeller shaft, CSSRT JSC suggested using the technology of powder laser surfacing to create an antifriction layer of bronze on a steel sleeve.

One of the main technological advantages of the laser deposition method in comparison with such traditional methods as electric arc or plasma surfacing is a low heat supply to the base material. This helps to reduce the deformation of the created products. High cooling rate contributes to the formation of the desired fine-grained microstructure. This technology provides a complete metallurgical adhesion of the surfacing layer to the base and low liquefaction (mixing with the base metal) as compared with traditional methods. Thus, one coating layer is enough to completely replace the base material.



Рис. 2. Роботизированный комплекс порошковой лазерной наплавки

Fig. 2. Robotic complex of powder laser deposition



Рис. 3. Пробы с наплавленными слоями

Fig. 3. Samples with deposited layers

(без пор), с хорошим сцеплением с основным материалом. При этом требуется обеспечить минимальное смешение и растворение наплавленного материала с основой. Для заданных скоростей перемещения и скорости подачи наплавочного порошка возможно определить оптимальный размер пятна и плотности мощности, при которых обеспечивается максимальный коэффициент наплавки.

При реализации процесса лазерной наплавки порошки подаются, как правило, с помощью напорных или газоинжекторных питателей-дозаторов непосредственно в зону действия лазерного излучения. При этом порошок смешивается с газовой струей, ускоряется струей и нагревается за время пролета от зоны смешения до напыляемой поверхности, после чего попадает на поверхность подложки. В качестве рабочей была принята схема четырехсторонней коаксиальной подачи порошкового материала.

В ходе проведения экспериментальных работ было определено три характерных профиля, описывающих взаимодействие наплавленного материала. При высоких значениях скорости подачи порошка или недостаточной плотности мощности излучения возникает формиро-

At the same time, the tolerances in thickness and surface quality are quite acceptable and, depending on the task, require only minimal modifications or immediately comply with technical requirements.

The main task in the development of the technological process of laser powder deposition is to obtain a high-quality coating (without pores), with good adhesion to the base material. It is required to ensure minimal mixing and dissolution of the deposited material with the base. For given speeds of movement and feed rate of surfacing powder, it is possible to determine the optimal spot size and power density at which the maximum deposition rate is ensured.

During the implementation of the laser deposition process, powders are fed, as a rule, using pressure or gas-



Рис. 4. Макрошлифы наплавленных проб

Fig. 4. Macrosection of weld samples

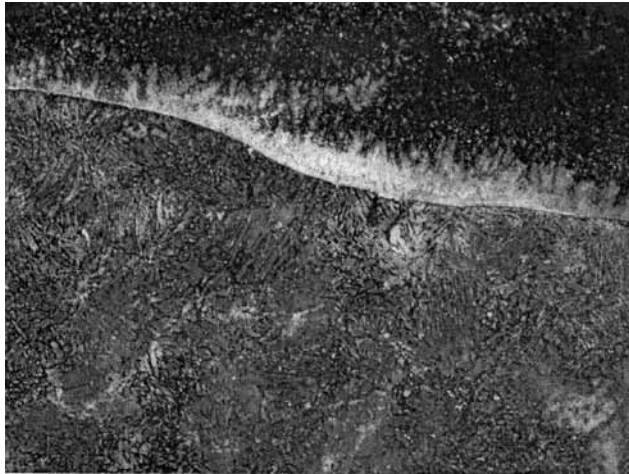


Рис. 5. Микроструктура поперечного шлифа наплавленного слоя с применением порошка EuTroLoy 16625G.04
Fig. 5. Microstructure of the transverse section of the deposited layer using EuTroLoy 16625G.04 powder

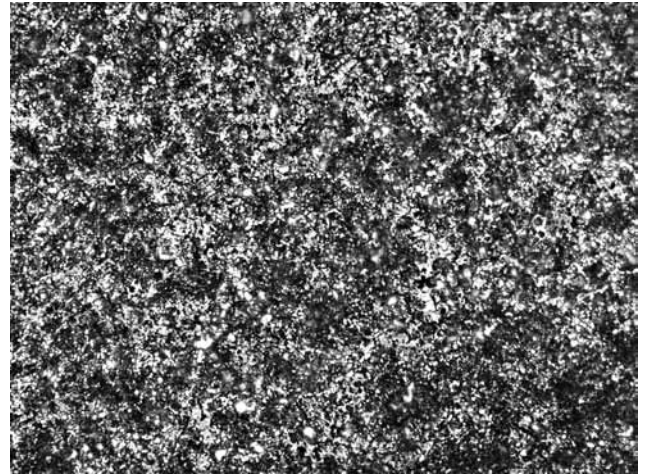


Рис. 6. Микроструктура продольного шлифа поверхностного слоя никелевого сплава (×1000)
Fig. 6. Microstructure of the longitudinal section of the surface layer of nickel alloy (×1000)

вание профиля правильной сферической формы на поверхности изделия (тип 1), не обеспечивающей возможность корректного перекрытия слоев. Избыточное растворение и поверхностные деформации формы наплавленного слоя (тип 2) характерны, наоборот, при высоких значениях плотности мощности излучения и недостаточной подаче наплавочного порошка. Наиболее предпочтительным является профиль эллиптической формы с четкими границами и оптимальным сплавлением с минимальным растворением в основе (тип 3). Такой профиль является предпочтительным для выполнения наплавки на поверхность с перекрытием слоев.

injecting feeders directly to the laser radiation area. In this case, the powder is mixed with the gas stream, is accelerated by the jet and heats up during the flight from the mixing zone to the sprayed surface, after which it falls on the substrate surface. The working scheme was adopted four-sided coaxial powder feed.

In the course of the experimental work, three characteristic profiles were determined, describing the interaction of the deposited material. At high values of the powder feed rate or insufficient radiation power density, a regular spherical profile is formed on the surface of the product (type 1), which does not allow the layers to overlap correctly. Excessive dissolution and surface deformations of the form of the deposited layer (type 2) are characteristic. On the contrary, at high values of radi-

Характеристики порошковых материалов
 Characteristics of powder materials

Марка порошка Brand of powder	Твердость покрытия Coating hardness	Массовая доля элементов, % Mass fraction of elements, %						Размер фракции, мкм Size of fraction, μm
RotoTec 19850	130 HV10	Cu		Al				53–150
		90		10				
RotoTec 19868	130–160 HV10	Cu	Al	Ni	Fe			53–150
		83	10	5	2			
EuTroLoy 16625G.04	210 HV30	Cr	Mo	Fe	Nb+Ta	Si	Другие	53–150
		21,5	9,0	5,0	3,7	0,4	0,35% Mn 0,02% Al 0,02% Ti остальное Ni	

В ходе наплавки с перекрытием слоев возможно порообразование при характере переноса порошка на основу, близкому к типу 1, для случаев высокого потока порошка и более толстых наплавленных слоев. Таким образом, по характеру формообразования одиночных слоев можно спрогнозировать появление внутренней пористости при многопроходной наплавке с перекрытием валиков.

В качестве материала основы использовались стали 40ХФА и 38Х2Н2МА. Для создания антифрикционного слоя применялись бронзовые порошки RotoTec 19850, RotoTec 19868 и металлический порошок EuTroLoy 16625G.04 с размером фракции 53-150 мкм (см. табл.).

Отработка технологии лазерного синтезирования (наплавки) проводилась на разработанном АО «ЦТСС» роботизированном комплексе порошковой лазерной наплавки (рис. 2). Комплекс построен по модульному принципу, что позволяет осуществлять гибкую перенастройку, заменять модули, а также адаптировать оборудование под определенную технологическую задачу. Комплекс оснащен волоконным лазерным источником мощностью 4 кВт, модулем перемещения и позиционирования (шестиосевой манипулятор с двухосевым позиционером), оптическим модулем, модулем подачи порошка и системой управления, обеспечивающей настройку и работу оборудования в ручном и автоматическом режиме. Комплекс также оснащен системой видеонаблюдения для мониторинга процесса в режиме реального времени, а также защитной кабиной для обеспечения требований лазерной и промышленной безопасности.

В ходе исследований были получены пробы с наплавленными валиками (рис. 3) в один или несколько проходов. Макрошлифы проб (рис. 4) изготовлены на шлифовально-полировальном станке Buehler MetaServ 250.

Исследование микроструктуры и размера зерен поверхностного слоя шлифов проводилось на металлографическом микроскопе Nikon MA200 при увеличении от 100 до 1000 крат в зависимости от методов исследований.

Ширина переходной зоны между основным металлом и наплавленным слоем составила 0,1-0,2 мм. Структура сплава, полученного наплавлением порошка EuTroLoy 16625G.04, состоит из никелевого твердого раствора и выделений карбидов хрома, боридов и силицидов, равномерно распределенных в матрице сплава (рис. 5, 6). Переходный участок характеризуется смешанной аустенитно-мартенистной структурой. Выде-



Рис. 7. Создание антифрикционного слоя бронзы на стальной втулке

Fig. 7. Creating an anti-friction bronze layer on a steel sleeve

tion power density and insufficient supply of surfacing powder. Most preferred is an elliptical shape with clear boundaries and optimal fusion with minimal dissolution at the base (type 3). Such a profile is preferable for surfacing with overlapping layers.

During surfacing with overlapping layers, pore formation is possible with the nature of powder transfer to the substrate close to type 1, for cases of high powder flow and thicker weld layers. Thus, by the nature of the formation of single layers, it is possible to predict the appearance of internal porosity during multi-pass surfacing with overlapping rollers.

40HFA and 38X2H2MA steel were used as the base material. To create an anti-friction layer, bronze powders RotoTec 19850, RotoTec 19868 and metal powder EuTroLoy 16625G.04 with a fraction size of 53-150 microns were used (see the table).

Development of the technology of laser synthesis (surfacing) was carried out on a robotic laser-deposited laser-developed complex developed by CSSRT JSC (Fig. 2). The complex is built according to a modular principle, which allows for flexible reconfiguration, replacing modules, and also adapting equipment to a specific technological task. The complex is equipped with a 4-kW fibre laser source, a displacement and positioning module (a six-axis manipulator with a two-axis positioner), an optical module, a powder supply module, and a control system that ensures the setting and operation of equipment in manual and automatic mode. The complex is also equipped with a video surveillance system to monitor the process in real time, as well as a protective cabin to meet the requirements of laser and industrial safety.

ления карбидных, боридных и силицидных фаз исчезают по мере приближения к основному металлу.

На пробах, изготовленных с использованием бронзовых порошков, структура слоя состоит преимущественно из меди с размером зерен от 5 до 15 мкм. Переходный участок зоны сплавления бронзы и стальной основы характеризуется наличием выделений твердого раствора меди в ферритно-бейнитной структуре стальной матрицы.

Выполнена пробная многопроходная наплавка на заготовку вала диаметром 218 мм (рис. 7) для получения изделия с диаметром 220 мм по чертежу. Скорость подачи порошка составляет 14 г/мин. Ширина переходной зоны между основным металлом и наплавленным слоем составила 0,1–0,2 мм. Среднее значение высоты наплавочного валика H (толщины слоя, полученного лазерной наплавкой за один проход) составляет 0,6 мм.

Установлено, что при многопроходном лазерном синтезировании необходимо осуществлять зачистку наплавленной поверхности от грата перед нанесением каждого последующего слоя.

Изготовленные образцы с антифрикционным слоем бронзы прошли испытания на абразивное изнашивание по схеме Бренелля-Хаворта. Исследования проводилось следующим образом: к вращающемуся резиновому диску в течение 10 минут прижимали образец с наплавленным слоем, подавая в зону трения кварцевый песок с размером частиц 200–600 мкм. По результатам испытаний трех образцов определялась средняя величина потери массы наплавленного покрытия.

Результаты испытаний подтвердили высокие антифрикционные свойства бронзового слоя. Потеря массы наплавленного покрытия в ходе испытаний на абразивное изнашивание составила не более 0,0055 г.

Проведенные исследования технологии лазерного синтезирования антифрикционной поверхности трения показывают возможность ее успешного применения для изготовления узлов движительных систем судов арктического плавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лебедев А. А., Писаренко Г. С.** Прочность конструкций при сложнапряженном состоянии. Киев: Наукова Думка, 1983.
Lebedev A. A., Pisarenko G. S. Prochnost' konstrukcij pri slozhonapryazhennom sostoyanii. Kiev: Naukova Dumka, 1983.
2. **Раздрогоин Ю. В.** Справочник по монтажу судового механического оборудования. Л.: Судостроение. 1981.
Razdrogin YU. V. Spravochnik po montazhu sudovogo mekhanicheskogo oborudovaniya. L.: Sudostroenie. 1981.

In the course of research, samples were obtained with weld rollers (Fig. 3) in one or several passes. Sample microsections (Fig. 4) were made on MetaServ 250 grinding and polishing machine (Buehler).

The study of the microstructure and grain size of the surface layer of thin sections was carried out on a Nikon MA200 metallographic microscope, with an increase from 100 to 1000 times, depending on the research methods.

The width of the transition zone between the base metal and the deposited layer was 0.1–0.2 mm. The structure of the alloy obtained by the fusion of the EuTroLoy 16625C.04 powder consists of a nickel solid solution and precipitates of chromium carbides, borides and silicides uniformly distributed in the alloy matrix (Fig. 5.6). The transitional area is characterized by a mixed austenitic-marten structure. The precipitates of carbide, boride, and silicide phases disappear as they approach the base metal.

On samples made using bronze powders, the layer structure consists mainly of copper with a grain size of 5 to 15 microns. The transitional zone of the fusion of bronze and steel base is characterized by the presence of precipitations of a solid solution of copper in the ferritic-bainite structure of the steel matrix.

A test multi-pass surfacing on a shaft billet with a diameter of 218 mm (Fig. 7) was performed to obtain a product with a diameter of 220 mm in the drawing. The powder feed rate is 14 g/min. The width of the transition zone between the base metal and the deposited layer was 0.1–0.2 mm. The average value of the height of the surfacing roller H (thickness of the layer obtained by laser welding in one pass) is 0.6 mm.

It has been established that with multi-pass laser synthesizing it is necessary to clean the weld surface from burr before applying each subsequent layer.

Fabricated samples with anti-friction bronze were tested for abrasive wear according to the Brenelle-Haworth scheme. The studies were carried out as follows: a sample with a deposited layer was pressed to a rotating rubber disk for 10 minutes, feeding quartz sand with a particle size of 200–600 μm into the friction zone. According to the test results of three samples, the average value of the weight loss of the deposited coating was determined.

The test results confirmed the high antifriction properties of the bronze layer. The weight loss of the deposited coating during the abrasive wear tests was no more than 0.0055 g.

Studies of the technology of laser synthesis of antifriction friction surface show the possibility of its successful application for the manufacture of propulsion systems for Arctic navigation ships.