



Опыт применения лазерных и аддитивных технологий для изготовления элементов современных промышленных газотурбинных установок

Е. В. Земляков¹, Н. Р. Алымов¹, А. М. Вильданов¹,
К. Д. Бабкин¹, С. Ю. Иванов¹, Н. Г. Кислов¹, Д. С. Тарасов²,
А. С. Мятлев², А. А. Ивановский²

¹ Институт лазерных и сварочных технологий
Санкт-Петербургского государственного морского
технического университета (ИЛИСТ СПбГМТУ),
Санкт-Петербург, Россия

² АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

Для обеспечения конкурентоспособности высокотехнологичных производств требуется внедрение новых технологий обработки материалов. На примере изготовления газосборника камеры сгорания газотурбинной установки ГТЭ-65.1 показаны технологические возможности современных лазерных и аддитивных технологий. Описаны основные стадии подготовки к изготовлению высокоточных заготовок методом прямого лазерного выращивания из жаропрочного никелевого сплава и нержавеющей стали и их последующей обработки. Приведены результаты металлографических исследований, механических испытаний и контроля геометрии, подтверждающие высокий уровень качества получаемых изделий. Продемонстрирована возможность комбинации аддитивных технологий, технологий лазерной сварки и резки и технологий термической, механической и электроэрозионной обработки при

Application of Laser and Additive Technologies in the Manufacturing of Advanced Industrial Gas Turbine Units

E. V. Zemlyakov¹, N. R. Alymov¹, A. M. Vildanov¹,
K. D. Babkin¹, S. Yu. Ivanov¹, N. G. Kislov¹, D. S. Tarasov²,
A. S. Myatlev², A. A. Ivanovsky²

¹ Institute of Laser and Welding Technologies
of St. Petersburg State Marine Technical University
(ILWT SPbSMTU), St. Petersburg, Russia

² Power Machines JSC, St. Petersburg, Russia

To ensure the competitiveness of high-tech industries, the introduction of new technologies of materials processing is required. The technological capabilities of advanced laser and additive technologies are shown by the example of manufacturing the gas collector of the combustion chamber of the GTE-65.1 gas turbine unit. The main stages of preparation for the production of high-precision blanks by direct laser deposition from heat-resistant nickel alloy and stainless steel, and their subsequent processing are described. The results of metallographic studies, mechanical tests and geometry control are presented, confirming the high level of quality of the products obtained. The article demonstrates possibility of combining additive technologies, laser welding and cutting technologies, and technologies of thermal, mechanical and electroerosion processing in the manufacture of technically complex assemblies and parts.

Key words: laser technologies, additive technologies, direct laser deposition, gas turbine units, heat-resistant nickel alloys, stainless steels

The article is received: 03.08.2022

The article is accepted: 09.09.2022



изготовлении технически сложных узлов и деталей.

Ключевые слова: лазерные технологии, аддитивные технологии, прямое лазерное выращивание, газотурбинная установка, жаропрочные никелевые сплавы, нержавеющие стали

Статья получена: 03.08.2022

Статья принята: 09.09.2022

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди лазерных технологий обработки материалов особо выделяются технологии лазерной сварки и родственные технологии – технологии лазерной резки, наплавки и термоупрочнения. Высокая плотность энергии в зоне лазерного воздействия обеспечивает высокие скорости сварки и низкое тепловложение в материалы свариваемых деталей по сравнению с традиционными сварочными технологиями. Возможность минимизировать тепловложение особенно важна при сварке сложнолегированных суперсплавов, склонных к образованию трещин при сварке [1].

В области технологий обработки материалов отдельным классом выделяются аддитивные технологии (АТ). Их применение в высокотехнологичных отраслях промышленности растет вместе с расширением технологических возможностей аддитивных технологий. Национальный стандарт Российской Федерации (ГОСТ Р 57558-2017) [2] так же, как и стандарты международной организации по стандартизации и американского общества испытаний и материалов (ISO/ASTM 52900:2015) [2], определяет семь типов аддитивных технологических процессов. Наиболее распространенными аддитивными процессами получения металлических заготовок являются процессы, основанные на прямом подводе энергии и подачи материала (directed energy deposition) и синтезе изделия на подложке (powder bed fusion).

Рациональное использование АТ обеспечивает получение уникальных эксплуатационных и массогабаритных характеристик деталей за счет внедрения новых материалов, топологически оптимизированных конструкций, возможности получения расчетных внутренних структур и каналов, объединения и укрупнения сборочных единиц и уменьшения числа последующих сварочных и сборочных операций [3]. Технологические возможности АТ позволяют значительно

1. INTRODUCTION

Among the laser technologies of material processing, the most prominent are laser welding technologies and related technologies, which include laser cutting, cladding and thermal hardening technologies. The high energy density in the laser exposure zone ensures high welding speeds and low heat input into the materials of the parts being welded compared to traditional welding technologies. The ability to minimize heat input is especially important when welding complex alloyed superalloys prone to cracking during welding [1].

In the field of materials processing technologies, additive technologies (AT) are distinguished as a separate class. Their application in high-tech industries is deposition along with the expansion of technological capabilities of additive technologies. The National Standard of the Russian Federation (GOST R 57558-2017) [2], as well as the standards of the International Organization for Standardization and the American Society for Testing and Materials (ISO/ASTM 52900:2015) [2], defines seven types of additive manufacturing processes. The most common additive processes for producing metal workpieces are processes based on direct energy deposition and powder bed fusion.

Rational use of the AT ensures obtaining unique operational and mass-dimensional characteristics of parts due to the introduction of new materials, topologically optimized structures, the possibility of obtaining calculated internal structures and channels, combining and enlarging assembly units and reducing the number of subsequent welding and assembly operations [3]. The technological capabilities of the AT can significantly reduce the material consumption of production, as well as time costs, which is especially important in the production of test samples and pilot runs. At the same time, it should be noted that with the help of additive methods, as a rule, high-precision workpiece blanks are obtained that require a certain amount of subsequent processing. The most effective technological processes for manufacturing of technically complex and critical assemblies and parts are based on a combination of additive and traditional technological operations [4].

The main consumers of the AT, both in Russia and around the world, are aviation and rocket engine building, thermal and nuclear power industries [5].

The article demonstrates the possibilities of domestic laser technologies by the example of



снизить материалоемкость производств, а также временные затраты, что особенно важно при производстве первых образцов и опытных партий. При этом необходимо отметить, что с помощью аддитивных методов, как правило, получают высокоточные заготовки, требующие определенного объема последующей обработки. Наиболее эффективные технологические процессы изготовления технически сложных и ответственных узлов и деталей строятся на комбинации аддитивных и традиционных технологических операций [4].

Основными потребителями АТ как в России, так и во всем мире являются авиационное и ракетное двигателестроение, тепловая и атомная энергетика [5].

В статье продемонстрированы возможности отечественных лазерных технологий на примере изготовления газосборника камеры сгорания газотурбинной установки ГТЭ-65.1, разрабатываемой в настоящее время АО «Силловые машины» в кооперации с ведущими научно-исследовательскими институтами и предприятиями страны.

При создании современных промышленных газотурбинных установок (ГТУ) разработка малоэмиссионной камеры сгорания является необходимым условием для выполнения как национальных требований, так и требований международных стандартов по достижению экологических характеристик ГТУ $NO_x \leq 25$ ppm. Опыт ведущих мировых компаний-производителей энергетического оборудования (GE, Siemens, Alstom, Mitsubishi и др.) показал, что использование технологии сжигания бедных, заранее перемешанных топливовоздушных смесей позволяет снизить уровни эмиссии NO_x более чем в десять раз. Жесткие требования по уровню эмиссии NO_x привели к необходимости перехода на малоэмиссионную технологию сжигания топлив.

Для камеры сгорания ГТУ-65.1 принята традиционная для камер сгорания стационарных ГТУ схема: трубчато-кольцевая камера сгорания с идентичными, противоточными жаровыми трубами, горелочными устройствами, корпусами и газосборниками. Количество индивидуальных горелочных блоков – 6 шт. В камере сгорания реализован способ обеспечения низкой эмиссии окислов азота за счет сжигания предварительно подготовленной бедной топливно-воздушной смеси.

Рассматриваемый в статье газосборник камеры сгорания предназначен для подачи продуктов сгорания из жаровой трубы и организации плав-

manufacturing the gas collector of the combustion chamber of the GTE-65.1 gas turbine unit, currently being developed by Power Machines JSC in cooperation with leading research institutes and enterprises of the country.

When creating advanced industrial gas turbine units (GTU), the development of a low-emission combustion chamber is a prerequisite for meeting both national requirements and the requirements of the international standards to achieve the environmental characteristics of GTU $NO_x \leq 25$ ppm. The experience of the world's leading manufacturers of power equipment (GE, Siemens, Alstom, Mitsubishi, etc.) has shown that the use of technology for burning poor pre-mixed fuel-air mixtures can reduce NO_x emission levels by more than ten times. Strict requirements on the level of NO_x emissions led to the need to switch to low-emission fuel combustion technology.

For the combustion chamber of GTU-65.1, the traditional scheme for the combustion chambers of stationary GTU is adopted: a cannular combustion chamber with identical, reverse-flow heat pipes, burner devices, housings and gas collectors. The number of individual burner units is 6 pcs. In the combustion chamber, a method has been implemented to ensure low emission of nitrogen oxides by burning a previously prepared poor fuel-air mixture.

The combustion chamber gas collector considered in the article is designed to supply combustion products from the heat pipe and organize a smooth transition from six individual burner assemblies to the common annulus of the nozzle diaphragm of the turbine first stage. The gas collector also generates a height-specified temperature profile at the inlet to the nozzle diaphragm blades.

The use of additive technology of direct laser deposition along with laser welding and cutting technologies and advanced 3D laser scanning methods for geometry control makes it possible to significantly reduce the production time, labor intensity and material costs compared to the traditional manufacturing method by stamping, machining and subsequent arc welding.

1. THEORY AND CALCULATIONS

The gas collector of the combustion chamber GTE-65.1 has a two-wall construction (Fig.1). The outer shell is made of austenitic stainless steel, the remaining elements of the gas collector are made of nickel heat-resistant alloy Haynes-230. The gas col-

ного перехода от шести индивидуальных горелочных блоков в общую кольцевую полость соплового аппарата первой ступени турбины. В газосборнике также происходит формирование заданного по высоте профиля температуры на входе в лопатки соплового аппарата.

Применение аддитивной технологии прямого лазерного выращивания наряду с технологиями лазерной сварки и резки и современными методами лазерного 3D-сканирования для контроля геометрии позволяет значительно сократить сроки изготовления, трудоемкость и материальные затраты по сравнению с традиционным способом изготовления методами штамповки, механической обработки и последующей сварки.

1. ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ

Газосборник камеры сгорания ГТЭ-65.1 имеет двухстеночную конструкцию (рис. 1). Наружная оболочка изготавливается из аустенитной нержавеющей стали, остальные элементы газосборника изготавливаются из никелевого жаропрочного сплава типа Наупес-230. Газосборник имеет следующие габариты: 670×389×634 мм. Общая масса газосборника 66 кг.

Последовательность изготовления газосборника включает в себя следующие этапы:

- изготовление заготовок элементов газосборника методом прямого лазерного выращивания;
- термическая обработка заготовок;
- механическая обработка заготовок;
- электроэрозионный прожиг отверстий в рамке;
- лазерная сварка кольца входного, оболочки внутренней и рамки;
- лазерная резка оболочки наружной: вырезка отверстий и деление оболочки на «левую» и «правую».

Технология прямого лазерного выращивания (ПЛВ) позволяет изготавливать высокоточные заготовки сложнопрофильных крупногабаритных изделий из широкого спектра материалов, в том числе из никелевых, титановых, кобальтовых сплавов, сталей, бронз, а также их комбинаций [6, 7]. Основными критериями качества получаемых заготовок являются уровень механических свойств и величина максимальных отклонений от заданной геометрии (геометрическая точность).

Требуемые механические свойства для большинства материалов обеспечиваются за счет бездефектной внутренней структуры, получае-

lector has the following dimensions: 670×389×634 mm. The total mass of the gas collector is 66 kg.

The production sequence of the gas collector includes the following steps:

- production of workpiece blanks of gas collector elements by direct laser deposition;
- heat treatment of workpiece blanks;
- machining of workpiece blanks;
- electroerosive burning of holes in the frame;
- laser welding of the inlet ring, the inner shell and the frame;
- laser cutting of the outer shell: cutting holes and dividing of the shell into the “left” one and the “right” one.

The technology of direct laser deposition (DLD) makes it possible to produce high-precision workpiece blanks of figurine-shaped large-sized products from a wide range of materials, including nickel, titanium, cobalt alloys, steels, bronzes, as well as their combinations [6, 7]. The main criteria for the quality of the obtained workpiece blanks are the level of mechanical properties and the magnitude of maximum deviations from a given geometry (geometric accuracy).

The required mechanical properties for the most materials are ensured by the defect-free internal structure obtained in the DLD process with correctly selected process parameters and strate-

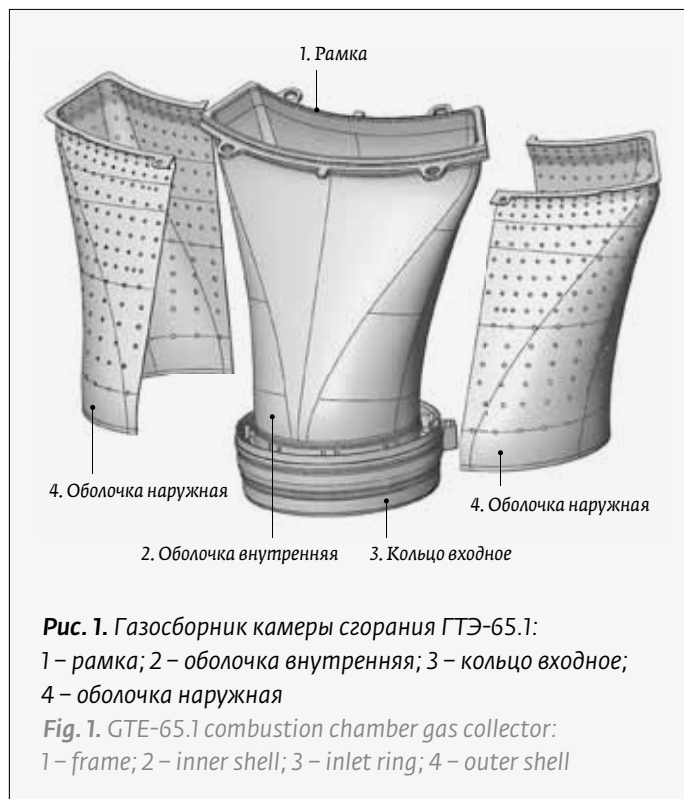


Рис. 1. Газосборник камеры сгорания ГТЭ-65.1:
1 – рамка; 2 – оболочка внутренняя; 3 – кольцо входное;
4 – оболочка наружная

Fig. 1. GTE-65.1 combustion chamber gas collector:
1 – frame; 2 – inner shell; 3 – inlet ring; 4 – outer shell



мой в процессе ПЛВ с правильно подобранными режимами и стратегиями выращивания, а также за счет последующей оптимизированной термической обработки.

В процессе ПЛВ сравнительно небольшой объем изготавливаемого изделия претерпевает локальный и кратковременный нагрев до высоких температур. По мере перемещения источника теплоты нагреву подвергаются все новые объемы металла, а в ранее нагретых местах температура выравнивается. В выращиваемом изделии формируется неравномерное по объему температурное поле с большим температурным градиентом в области локального нагрева. Это вызывает в соседних участках изготавливаемых изделий разные по величине объемные изменения, которые ведут к появлению в металле внутренних усилий и образованию поля напряжений и деформаций. По мере распространения теплоты и выравнивания температуры происходит непрерывное изменение полей деформаций и напряжений. В отличие от температурного поля, которое исчезает после полного остывания конструкции, поле напряжений не исчезает, так как процесс его образования является необратимым. Поэтому после полного остывания в изделии имеются остаточные деформации и напряжения.

Точность изготовления изделий методом ПЛВ во многом определяется возможностью прогнозирования остаточных деформаций, их учета и компенсации при подготовке технологических 3D-моделей выращиваемых заготовок, генерации траекторий перемещения рабочего инструмента и подготовке управляющих программ.

Характер деформаций зависит от размеров и геометрии выращиваемого изделия. В случае массивных, жестких или осесимметричных изделий, как кольцо входное и рамка (рис. 1. поз. 1, 3), деформации проявляются в виде равномерной усадки в направлениях, перпендикулярных направлению роста. Величина усадки в первую очередь зависит от материала и сохраняется при изменении габаритов изделия. Это позволяет компенсировать деформации за счет масштабирования траектории на заранее определенный коэффициент.

Если жесткость выращиваемого изделия недостаточная для равномерного распределения напряжений, как у внутренней и наружной оболочек (рис. 1. поз. 2, 4), то они проявляются в виде крупномасштабных деформаций. Характер таких деформаций сохраняется при малом изменении геометрии выращиваемого изделия (обратный

gies, as well as due to subsequent optimized heat treatment.

During the DLD process, a relatively small volume of the manufactured product undergoes local and short-term heating to high temperatures. As the heat source moves, more and more volumes of metal are heated, and in previously heated places the temperature is equalized. An uneven temperature field with a large temperature gradient in the area of local heating is formed in the build part. This causes nonuniform volume changes in the adjacent sections of the manufactured parts, which lead to the appearance of the internal forces in the metal and the formation of a stress and deformation field. As the heat spreads and the temperature equalizes, there is a continuous change in the fields of deformations and stresses. Unlike the temperature field, which disappears after the complete cooling of the structure, the stress field does not disappear, since the process of its formation is irreversible. Therefore, after complete cooling, there are residual deformations and stresses in the product.

The accuracy of DLD manufactured parts is largely determined by the possibility of predicting residual deformations, their accounting and compensation in the preparation of technological 3D CAD models, generation of tool trajectories and preparation of control programs.

The nature of the deformations depends on the size and geometry of the build part. In the case of massive, rigid or axisymmetric products, such as the inlet ring and the frame (Fig. 1. pos. 1, 3), deformations manifest themselves in the form of uniform shrinkage in plane perpendicular to the build-up direction. The amount of shrinkage primarily depends on the material and persists when the dimensions of the product change. This makes it possible to compensate the deformations with scaling the trajectory by a predetermined factor.

If the rigidity of the build part is insufficient for the balanced distribution of stresses, both in the inner and the outer shells (Fig. 1. pos. 2, 4), then they manifest themselves in the form of large-scale deformations. The nature of such deformations is preserved with a small change in the geometry of the build part (reverse bending), which allows an iterative approach to increase the manufacturing accuracy. The approach is to change the geometry based on the results of the trial deposition in order to balance the detected deformations. This makes it possible to increase the accuracy of the build part up to the required values with each iteration [8]. It should be noted that due to the high cost of the

выгиб), что позволяет применять итерационный подход для увеличения точности изготовления. Подход заключается в изменении геометрии по результатам пробного выращивания с целью компенсировать обнаруженные деформации. Это позволяет с каждой итерацией увеличивать точность выращиваемого изделия вплоть до требуемых значений [8]. Надо заметить, что, ввиду большой затратности итерационного метода, на практике его комбинируют с математическим моделированием напряженно-деформированного состояния выращиваемых изделий и с определением разумных припусков с целью минимизации количества попыток для получения годной заготовки [9, 10].

Также на изделиях с малой жесткостью, таких как оболочка наружная (рис. 1. поз. 4), деформации проявляются в виде коробления, то есть потери устойчивости поверхности с образованием волн различной длины и амплитуды. На крупногабаритных изделиях величина деформации может достигать 3-5 см. В данном случае для увеличения точности выращиваемого изделия метод обратного выгиба не подходит, он только перераспределяет деформации. Такие изделия требуют изменения конструкции с целью увеличения ее жесткости, например за счет добавления ребер жесткости (стрингеров), которые предотвратят коробление и позволят использовать метод обратного выгиба. Эти элементы являются технологическими и, как правило, подлежат последующему удалению.

Процесс расчетного определения напряженно-деформированного состояния изделия в процессе ПЛВ состоит в последовательном решении связанных задач теплопроводности и термоупругопластичности [11]. Все временные промежутки между проходами разбиваются на временные шаги. Таким образом прослеживается вся кинетика изменений температуры, напряжений и деформаций. Процесс последовательного выращивания изделия учитывался с помощью следующего искусственного приема: в тех конечных элементах, в которых в текущий момент отсутствует наплавленный металл, задавались заниженные в 10^4 раз теплопроводность, энтальпия и модуль упругости. При решении учитывали температурные зависимости теплофизических и механических свойств материала.

Пример расчетного определения поля деформаций заготовки оболочки наружной с добавленными стрингерами показан на рис. 2. Применение численного моделирования напря-

iterative method, in practice it is combined with mathematical modeling of the stress and strain state of the build parts and with the determination of reasonable allowances in order to minimize the number of attempts to obtain a suitable workpiece blank [9, 10].

Also on products with low rigidity, such as the outer shell (Fig. 1. pos. 4), deformations manifest themselves in the form of warping, that is, loss of stability of the surface with the formation of waves of various lengths and amplitudes. On large-sized products, the amount of deformation can reach 3 to 5 cm. In this case, to increase the accuracy of the build part, the reverse bending method is not suitable, it only redistributes deformations. Such products require modification of the structure in order to increase its rigidity, for example, by adding stiffeners (stringers), which will prevent warping and allow the use of the reverse bending method. These elements are technological and, as a rule, are subject to subsequent removal.

The process of computational determination of the stress and strain state of the product in the DLD process consists in the sequential solution of related problems of thermal conductivity and thermo-elastoplasticity [11]. All time intervals between passes are divided into time steps. Thus, the whole kinetics of temperature changes, stresses and deformations is traced. The process of sequential deposition of the product was taken into account using the following artificial technique: in those finite elements in which there is currently no deposited metal, the thermal conductivity, enthalpy and elastic modulus were set 10^4 times lower. The solution took into account the temperature dependences of the thermophysical and mechanical properties of the material.

An example of the simulated deformation field of the outer shell workpiece blank with stringers is shown in Fig. 2. The use of numerical modeling of the stress and strain state of the workpiece blank allowed optimizing the geometry and location of U-shaped stringers, as well as compensating for possible deformations in order to obtain the smallest deviations from the specified geometry.

The solid-state model obtained in this way was used to develop a technological model, generate trajectories and create control programs.

When preparing technological models of fabricated workpiece blanks, it is necessary to take into account possible deformations of the workpiece blanks in subsequent processes of their thermal and mechanical processing.

женно-деформированного состояния заготовки позволило оптимизировать геометрию и расположение П-образных стрингеров, а также компенсировать возможные деформации с целью получения наименьших отклонений от заданной геометрии.

Полученная таким образом твердотельная модель использовалась для разработки технологической модели, генерации траекторий и создания управляющих программ.

При подготовке технологических моделей выращиваемых заготовок необходимо учитывать возможные деформации заготовок в последующих процессах их термической и механической обработки.

2. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Оболочка наружная изготавливалась из металлопорошковой композиции (МПК) стали 316L. Рамка, оболочка внутренняя, кольцо входное изготавливались из жаропрочного сплава H23X-A (Haynes-230). Химический состав используемых в работе материалов приведен в табл. 1.

Входной контроль используемых МПК проводился в соответствии с ГОСТ Р 59035-2020 [14], отбор проб для входного контроля осуществляется в соответствии с ГОСТ 23148-98 [15].

Химический состав МПК и морфология частиц порошка исследовались с помощью сканирующего

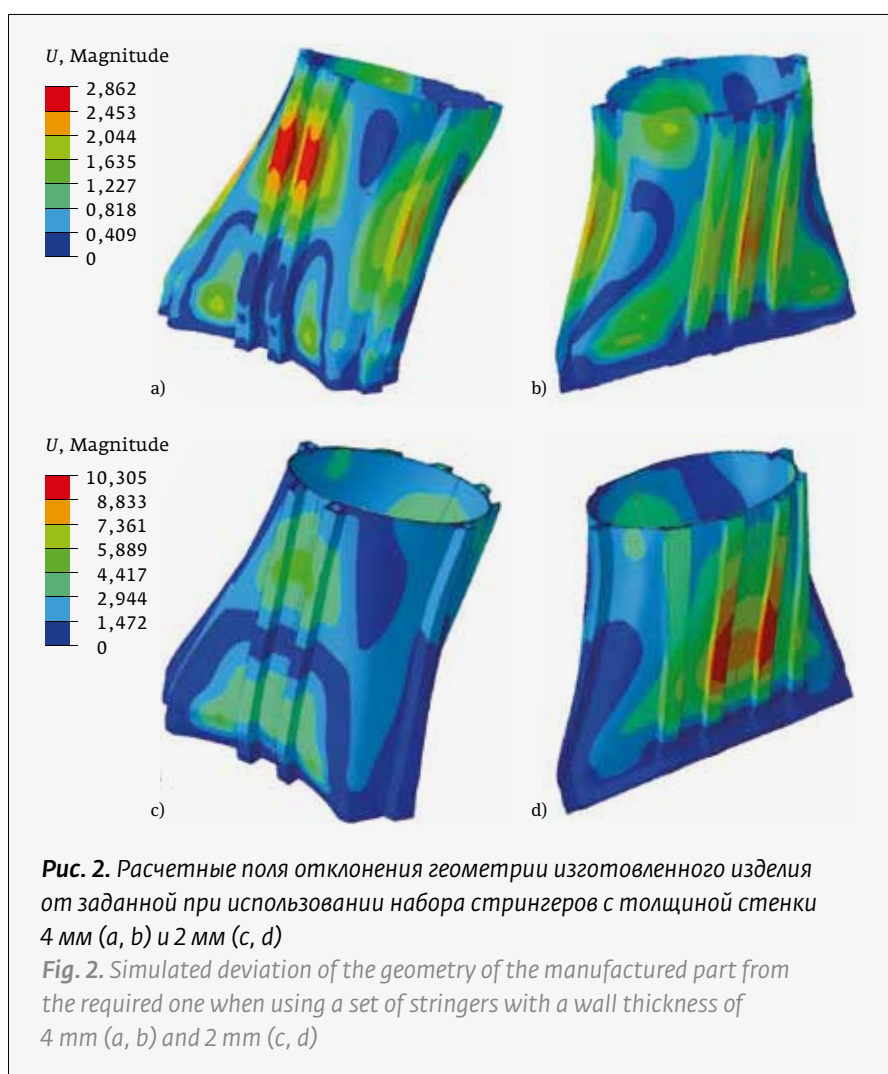


Рис. 2. Расчетные поля отклонения геометрии изготовленного изделия от заданной при использовании набора стрингеров с толщиной стенки 4 мм (a, b) и 2 мм (c, d)

Fig. 2. Simulated deviation of the geometry of the manufactured part from the required one when using a set of stringers with a wall thickness of 4 mm (a, b) and 2 mm (c, d)

2. EQUIPMENT AND MATERIALS

The outer shell was made of a metal-powder composition (MPC) of 316L steel. The frame, the inner shell, and the inlet ring were made of heat-resistant alloy H23X-A (Haynes-230). The chemical composition of the materials used in the work is given in Table 1.

Таблица 1. Химический состав МПК стали 316 L и жаропрочного сплава H23X-A

Table 1. Chemical composition of the MPC of 316L steel and H23X-A heat-resistant alloy.

Материал	Содержание элементов, масс. (%)												
	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W	C	P	S
Haynes-230 (DIN 17744-2020) [12]	0,2–0,5	0,25–0,75	≤0,1	20,0–24,0	0,3–1,0	≤3	≤5	Осн.	1,0–3,0	13,0–15,0	–	–	–
316 L (ASTM A240) [13]	–	<1,0	<0,5	16–18	<2,0	Осн.	–	10–14	2–3	–	<0,03	<0,045	<0,03

Таблица 2. Технические характеристики установки «ИЛИСТ-Л»

Table 2. Technical characteristics of ILIST-L unit

Параметр	Значение
Мощность лазерного излучения (макс.)	3 кВт
Размер рабочей зоны	∅1300 × 800 мм
Количество синхронно-управляемых осей	8 шт.
Грузоподъемность наклонно-поворотного позиционера изделия	500 кг
Порошковый питатель	2 колбы по 5 л
Фракция МПК	20–200 мкм
Рабочая среда	Аргон ВЧ (контролируемая атмосфера)
Производительность	до 2 кг / ч
Возможность лазерной сварки	Да

электронного микроскопа Tescan Mira3 с системой энергодисперсионного микроанализа Aztec Live Advanced Ultim Max 65 с использованием программного обеспечения ImageJ и OriginPro8.

The incoming inspection of the MPCs used was carried out in accordance with GOST R 59035-2020 [14], sampling for incoming inspection is carried out in accordance with GOST 23148-98 [15].

The chemical composition of the MPC and the morphology of the powder particles were studied using a Tescan Mira3 scanning electron microscope with the Aztec Live Advanced Ultim Max 65 energy dispersive microanalysis system using ImageJ and OriginPro8 software. Metallographic studies were carried out using an inverted metallographic microscope Leica DMI8.

Mechanical tests were carried out on a universal electromechanical testing machine SHIMADZU AGS-100Knx. The geometry of the workpieces was monitored using a measuring pair consisting of an optical 3D scanner and a Metroscan Elite 750 tracker. The production of workpiece blanks of gas collector elements was carried out on the direct laser deposition unit ILIST-L (Fig. 3). The technical characteristics of the ILIST-L unit are given in Table 2.

3D laser cutting (cutting workpiece blanks from substrates, cutting holes and cutting the outer shell) was performed on a universal robotic technological complex for laser processing of large-sized parts (Fig. 4), created as part of the implementation of the event to equip the laboratory of laser and ATs of the world-class scientific center “The Advanced Digital Technologies” with the financial support of Russian

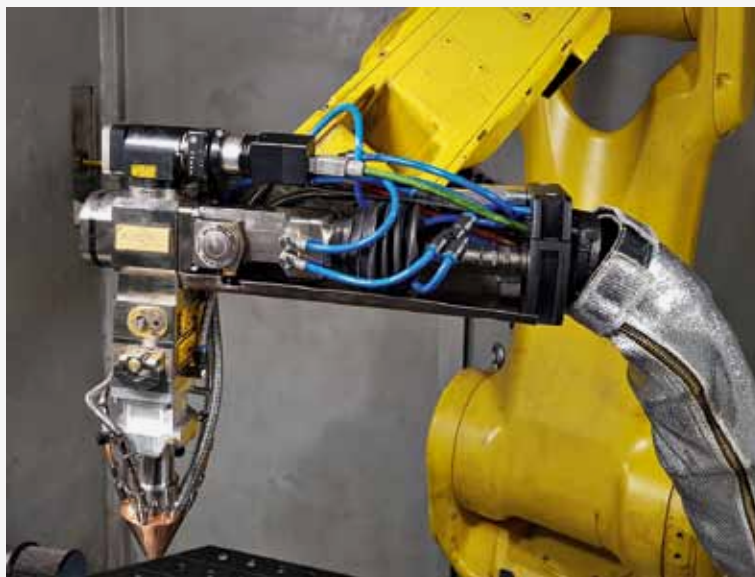


Рис. 3. Установка прямого лазерного выращивания «ИЛИСТ-Л»

Fig. 3. ILIST-L direct laser deposition unit

Металлографические исследования проводились с использованием инвертированного металлографического микроскопа Leica DMi8.

Механические испытания проводились на универсальной электромеханической испытательной машине SHIMADZU AGS-100Knx.

Контроль геометрии заготовок производился с помощью измерительной пары, состоящей из оптического 3D-сканера и трекара Metrosap Elite 750.

Изготовление заготовок элементов газосборника проводилось на установке прямого лазерного выращивания «ИЛИСТ-L» (рис. 3). Технические характеристики установки «ИЛИСТ-L» приведены в табл. 2.

Лазерная 3D-резка (отрезка заготовок от подложек, вырезка отверстий и раскрой оболочки наружной) выполнялась на универсальном роботизированном технологическом комплексе для лазерной обработки крупногабаритных деталей (рис. 4), создаваемом в рамках реализации мероприятия по оснащению лаборатории лазерных и АТ научного центра мирового уровня «Передовые цифровые технологии» при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2020-903 от 16.11.2020 г.). Универсальный технологический комплекс строится на базе высокоточного робота Fanuc M-800iA/60, двухосевого наклонно-поворотного позиционера и волоконного лазером с мощностью 3 кВт.

Таблица 3. Технические характеристики установки «ИЛИСТ-2XL»

Table 3. Technical characteristics of ILIST-2XL unit

Параметр	Значение
Мощность лазерного излучения (макс.)	2 волоконных лазера по 4 кВт
Размер рабочей зоны	∅ 2100 мм × 1000 мм
Количество синхронно-управляемых осей	13 шт. (2 робота + позиционер)
Грузоподъемность наклонно-поворотного позиционера изделия	8000 кг
Порошковый питатель	4 колбы по 5 л
Фракция МПК	20–200 мкм
Рабочая среда	Аргон ВЧ (контролируемая атмосфера)
Производительность	до 4 кг / ч
Возможность лазерной сварки	Да



Рис. 4. Универсальный роботизированный технологический комплекс для лазерной обработки крупногабаритных деталей

Fig. 4. Universal robotic technological complex for laser processing of large-sized parts

Ministry of Education and Science (Agreement No. 075-15-2020-903 dated November 16, 2020). The universal technological complex is being built on the basis of a high-precision robot Fanuc M-800iA/60, a two-axis tilt-rotary positioner and a fiber laser with a power of 3 kW.

Laser welding of the workpiece blanks of the gas collector elements was carried out on the ILIST-2XL unit. The technical characteristics of the ILIST-2XL unit are shown in Table. 3. Trajectories and control programs for robotic laser processing of workpiece blanks of gas collector elements were created in the Autodesk PowerMill software package.

3. PROCESS DESIGN

The first stage of the DLD process design is the production of technological samples to determine the ranges of the DLD process parameters, ensuring a defect-free deposited material [16]. The production of technological samples is also an additional operation of the MPC incoming inspection.

During the production of technological samples, the following DLD process parameters vary: laser power, the working tool movement speed, the offset between the passes (dx), the step between the lay-



Таблица 4. Диапазоны изменения режимных параметров ПЛВ при изготовлении технологических проб из МПК стали 316L

Table 4. Ranges of changes in the DLD operating parameters in manufacture of technological samples of the 316L steel MPC.

Пауза между валиками 40 с, скорость 25 мм/с, ширина валика 2,5 мм, $dz=0,6$ мм, $dx=1,67$ мм				
Номер образца	1	2	3	4
Мощность, Вт	1600	1800	2000	2200

Лазерная сварка заготовок элементов газосборника проводилась на установке «ИЛИСТ-2XL». Технические характеристики установки «ИЛИСТ-2XL» приведены в табл. 3.

Траектории и управляющие программы для роботизированной лазерной обработки заготовок элементов газосборника создавались в программном пакете Autodesk PowerMill.

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА

Первым этапом технологической подготовки процесса ПЛВ является изготовление технологических проб для определения рабочих диапазонов режимных параметров процесса ПЛВ, обеспечивающих получение бездефектной структуры наплавленного материала [16]. Изготовление технологических проб также является дополнительной операцией входного контроля МПК.

При изготовлении технологических проб варьируются следующие режимные параметры ПЛВ: мощность лазерного излучения, скорость перемещения рабочего инструмента, смещение между валиками (dx), шаг между слоями (dz), пауза между валиками. В табл. 4 и 5 приведены диапазоны изменения режимных параметров ПЛВ при изготовлении технологических проб из МПК стали 316L и жаропрочного никелевого сплава H23X-A соответственно.

Выбор оптимальных режимов выращивания осуществлялся на основе анализа результатов металлографических исследований изготовленных технологических проб (рис. 5, 6).

При мощностях 1600 Вт и 1800 Вт в образцах из стали 316L наблюдаются несплавления. Несплавления образуются в зоне перекрытий соседних валиков из-за недостатка подводимой энергии. Данный вид дефектов имеет неправильную форму в отличие от газовой пористости и характеризуется периодическим расположе-

Табл. 5. Диапазоны изменения режимных параметров ПЛВ при изготовлении технологических проб из МПК жаропрочного никелевого сплава H23X-A

Table 5. Ranges of changes in the DLD operating parameters in the manufacture of technological samples of H23X-A heat-resistant nickel alloy MPC

Параметр	Диапазон
Мощность, Вт	700–1800
Скорость, мм/с	15–25
Пауза между валиками, с	0–40
dx , мм	1,1–1,47
dz , мм	0,4–0,6

ния (dz), the pause between the passes. The Tables 4 and 5 show the ranges of changes in the DLD operating parameters in the manufacture of technological samples from the MPCs of the 316L steel and the H23X-A heat-resistant nickel alloy, respectively.

The choice of optimal process parameters was carried out on the basis of the analysis of the results of metallographic studies of the manufactured technological samples (Fig. 5, 6).

At powers of 1600 and 1800 W, lacks of fusion are observed in samples made of 316L steel. Lacks of fusion are formed in the overlap zone of adjacent passes due to a lack of supplied energy. This type of defects has an irregular shape in contrast to gas porosity and is characterized by a periodic arrangement in the volume of the material. At capacities over 2000 W, no defects were detected.

A similar pattern was observed on samples from the MPC of the heat-resistant nickel alloy H23X-A.

At capacities of 1200 and 1400 watts and a linear velocity of the working tool relative to the sample of 25 mm/s, lacks of fusion are observed in the samples. Increasing of the power also makes it possible to get rid of lacks of fusion, but, unlike stainless steel, hot cracks were observed in samples made of heat-resistant H23X-A nickel alloy already at a power of 1800 watts [17]. In order to expand the working ranges of the process parameters that ensure a defect-free internal structure, an additional series of experiments on the production of samples with lower productivity was carried out. At the same time, the power, the pause between passes, the step between layers, the deposition speed, the step between the passes varied.

The results of additional studies have shown that a decrease in the productivity of the DLD process favorably affects the quality of deposited samples (Fig. 7).

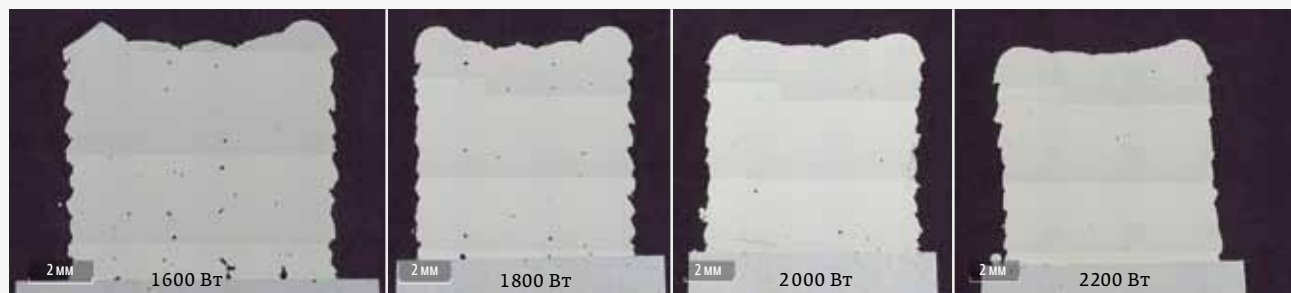


Рис. 5. Макрошлифы технологических проб из МПК стали 316L

Fig. 5. Large sections of technological samples from 316L steel MPC

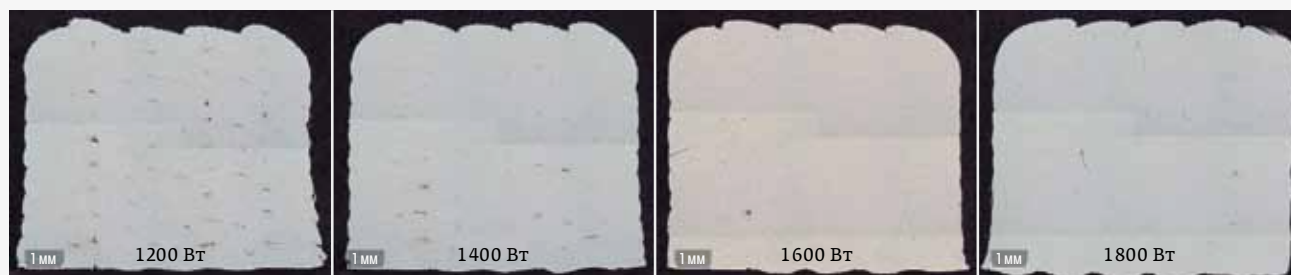


Рис. 6. Макрошлифы технологических проб из МПК жаропрочного никелевого сплава H23X-A

Fig. 6. Large sections of technological samples from H23X-A heat-resistant nickel alloy MPC

нием в объеме материала. При мощностях свыше 2000 Вт дефектов не обнаружено.

Аналогичная картина наблюдалась и на образцах из МПК жаропрочного никелевого сплава H23X-A.

При мощностях 1200 Вт и 1400 Вт и линейной скорости перемещения рабочего инструмента относительно образца в 25 мм/с в образцах наблюдаются несплавления. Повышение мощности также позволяет избавиться от несплавлений, но в отличие от нержавеющей стали в образцах из жаропрочного никелевого сплава H23X-A уже при мощности 1800 Вт наблюдались горячие трещины [17]. Для расширения рабочих диапазонов режимных параметров, обеспечивающих бездефектную внутреннюю структуру, была проведена дополнительная серия экспериментов по изготовлению образцов с более низкой производительностью. При этом варьировались мощность, пауза между проходами, шаг между слоями, скорость наплавки, шаг между валиками.

Результаты дополнительных исследований показали, что снижение производительности

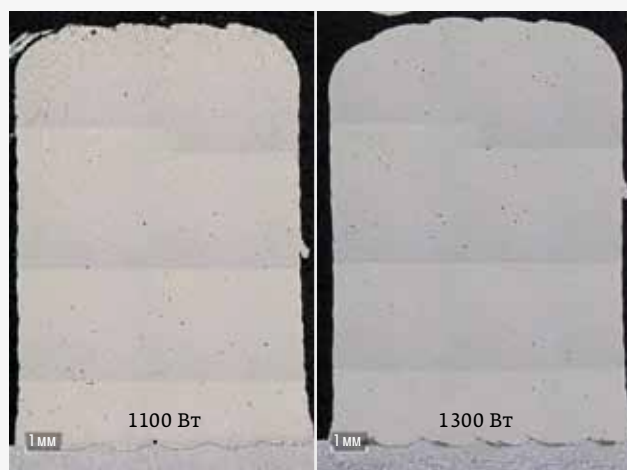


Рис. 7. Макрошлифы технологических проб из МПК жаропрочного никелевого сплава H23X-A при уменьшенной производительности процесса ПЛВ

Fig. 7. Large sections of technological samples from H23X-A heat-resistant nickel alloy MPC with reduced productivity of the DLD process



процесса ПЛВ благоприятно влияет на качество выращенных образцов (рис. 7). При мощности 1100 Вт и скорости 15 мм/с видимых дефектов не наблюдается, при этом существует запас по мощности, т. к. при 1300 Вт также получилась практически бездефектная структура.

В результате проведенных экспериментов были определены рабочие технологические режимы ПЛВ из МПК стали 316L и жаропрочного никелевого сплава H23X-A (табл. 6).

Для определения механических свойств наплавляемого материала на выбранных режимах были изготовлены образцы-свидетели [18], из которых вырезались стандартные образцы для испытаний на растяжение (тип IV ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84) [19]). Механические испытания проводились как на образцах без последующей термообработки, так и с термообработкой.

В табл. 7 и 8 представлены результаты механических испытаний на одноосное растяжение образцов из сплава H23X-A и стали 316L, соответственно. Образцы из сплава H23X-A без термообработки после испытаний имеют вязкий излом в продольном направлении (X) и слоистый излом в поперечном направлении (Z), что говорит о анизотропии свойств материала. Характер разрушения термически обработанных образцов вязкий и в продольном и поперечном направлении, что говорит об устранении анизотропии механических свойств с помощью правильно подобранной термической обработки. После испытаний образцов без термообработки из стали 316L характер разрушений представляет вязкий излом как в продольном (X), так и в поперечном (Z) направлении. После термической обработки сплава 316L характер разрушения не изменяется, происходит рост относительного удлинения и частичное снижение предела текучести и предела прочности за счет неполной рекристаллизации сплава и снятия внутренних напряжений.

4. ПРЯМОЕ ЛАЗЕРНОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ ЗАГОТОВОК

На основе результатов предварительных расчетов и технологической подготовки были сгенерированы управляющие программы для установки прямого лазерного выращивания «ИЛИСТ-Л» для изготовления заготовок элементов газосборника.

Процесс прямого лазерного выращивания заготовок рамки, кольца входного, внутренней и наружной оболочек газосборника показан на рис. 8.

Таблица 6. Оптимальные технологические режимы ПЛВ из МПК стали 316L и жаропрочного никелевого сплава H23X-A

Table 6.

	316L	Haynes 230
Мощность, Вт	2 200	1 100
Скорость, мм/с	25	15
Ширина валика, мм	2,5	2,2
Смещение по ширине (dx), мм	1,67	1,47
Смещение по высоте (dz), мм	0,6	0,6
Межпроходная температура, °С		Не более 220

Таблица 7. Усредненные механические свойства образцов из сплава H23X-A

Table 7. Average mechanical properties of samples made of H23X-A alloy

Обозначение	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Отн. удлинение, %
ПЛВ_X+Z	577,8	889,3	28,11
ПЛВ+ТО_X+Z	421,3	901,95	35
Прокат [21]	417	837	47,3

Таблица 8. Усредненные механические свойства образцов из стали 316L

Table 8. Average mechanical properties of samples made of 316L steel

Обозначение	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Отн. удлинение, %
ПЛВ_X+Z	327	553	51,6
ПЛВ+ТО_X+Z	346	663	58,7
Прокат [20]	205	515	60

At a power of 1100 W and a speed of 15 mm/s, no visible defects are observed, while there is a power reserve, because at 1300 W, an almost defect-free structure was also achieved.

As a result of the experiments carried out, the operating process parameters of the DLD from the MPCs of 316L steel and heat-resistant nickel alloy H23X-A were determined (Table 6).

To determine the mechanical properties of the deposited material, witness samples were made in the selected parameters [18], from which standard

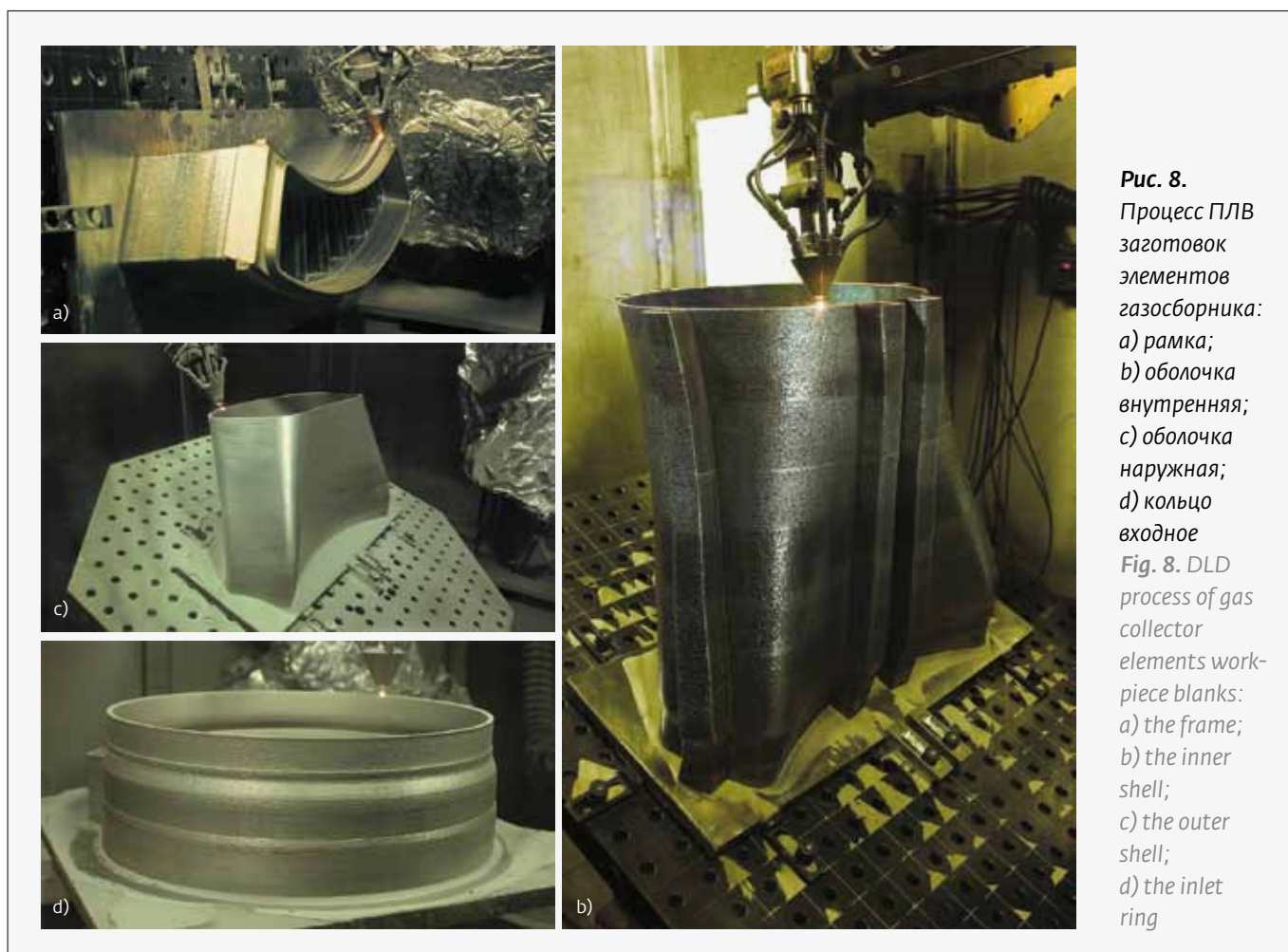


Рис. 8.
Процесс ПЛВ
заготовок
элементов
газосборника:
а) рамка;
б) оболочка
внутренняя;
с) оболочка
наружная;
д) кольцо
входное

Fig. 8. DLD
process of gas
collector
elements work-
piece blanks:
a) the frame;
b) the inner
shell;
c) the outer
shell;
d) the inlet
ring

После выращивания был проведен контроль геометрии полученных заготовок, термическая обработка на снятие внутренних напряжений для заготовки из стали 316L и для достижения требуемых прочностных свойств для заготовок из сплава H23X-A. После термообработки проводился повторный контроль геометрии.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты контроля геометрии выращенных заготовок представлены на рис. 9. Контроль геометрии показал, что отклонения геометрии заготовок кольца входного и рамки лежат в допустимых пределах и позволяют получить из выращенных заготовок годные детали при последующей обработке.

На заготовках внутренней и наружной оболочках были выявлены недопустимые отклонения геометрии – до 1,5 мм на внутренней оболочке и до 3,5 мм на наружной оболочке.

Для устранения обнаруженных отклонений геометрии были изменены технологические

tensile test samples were cut (Type IV GOST 1497-84 (ISO 6892-84) [19]). Mechanical tests were carried out both on samples without subsequent heat treatment and with the heat treatment.

The Tables 7 and 8 present the results of mechanical tests for uniaxial tension of samples made of H23X-A alloy and 316L steel, respectively. The samples made of H23X-A alloy without heat treatment after testing have a ductile fracture in the longitudinal direction (X) and a layered fracture in the transverse direction (Z), which indicates anisotropy of the properties. The fracture pattern of heat-treated samples is ductile both in the longitudinal and transverse directions, which indicates the elimination of anisotropy of mechanical properties with the help of properly selected heat treatment. After testing of the samples without heat treatment made of 316L steel, the fracture pattern is ductile fracture in both the longitudinal (X) and transverse (Z) directions. After heat treatment of the 316L alloy, the fracture pattern does not change, there is an increase in percentage elongation and a par-

модели заготовок. С помощью обратного выгибания участков с максимальными отклонениями были скомпенсированы обнаруженные деформации. Результаты контроля геометрии заготовок, полученных в ходе повторного прямого лазерного выращивания по измененным технологическим моделям, представлены на рис. 10. Внесенные изменения позволили получить годные для последующей обработки заготовки.

Для изготовления газосборника полученные с помощью прямого лазерного выращивания заготовки были обработаны механически. Вырезка отверстий в наружной оболочке и ее разделение на две части осуществлялись с помощью роботизированной лазерной 3D-резки (рис. 11).

Объединение рамки, кольца входного и оболочки внутренней в одну сборочную единицу осуществлялось с помощью лазерной сварки (рис. 12). Предварительно в рамке был осуществлен электроэрозионный прожиг отверстий.

После финишных операций лазерной резки и лазерной сварки с помощью лазерного 3D-сканирования был проведен окончательный контроль геометрии изготовленного газосборника камеры сгорания ГТЭ-65.1, подтвердивший его соответствие требованиям конструкторской документации.



Рис. 11. Лазерная резка отверстий в наружной оболочке газосборника

Fig. 11. Laser cutting of holes in the outer shell of the gas collector

tial decrease in yield stress and tensile strength due to incomplete recrystallization of the alloy and removal of internal stresses.

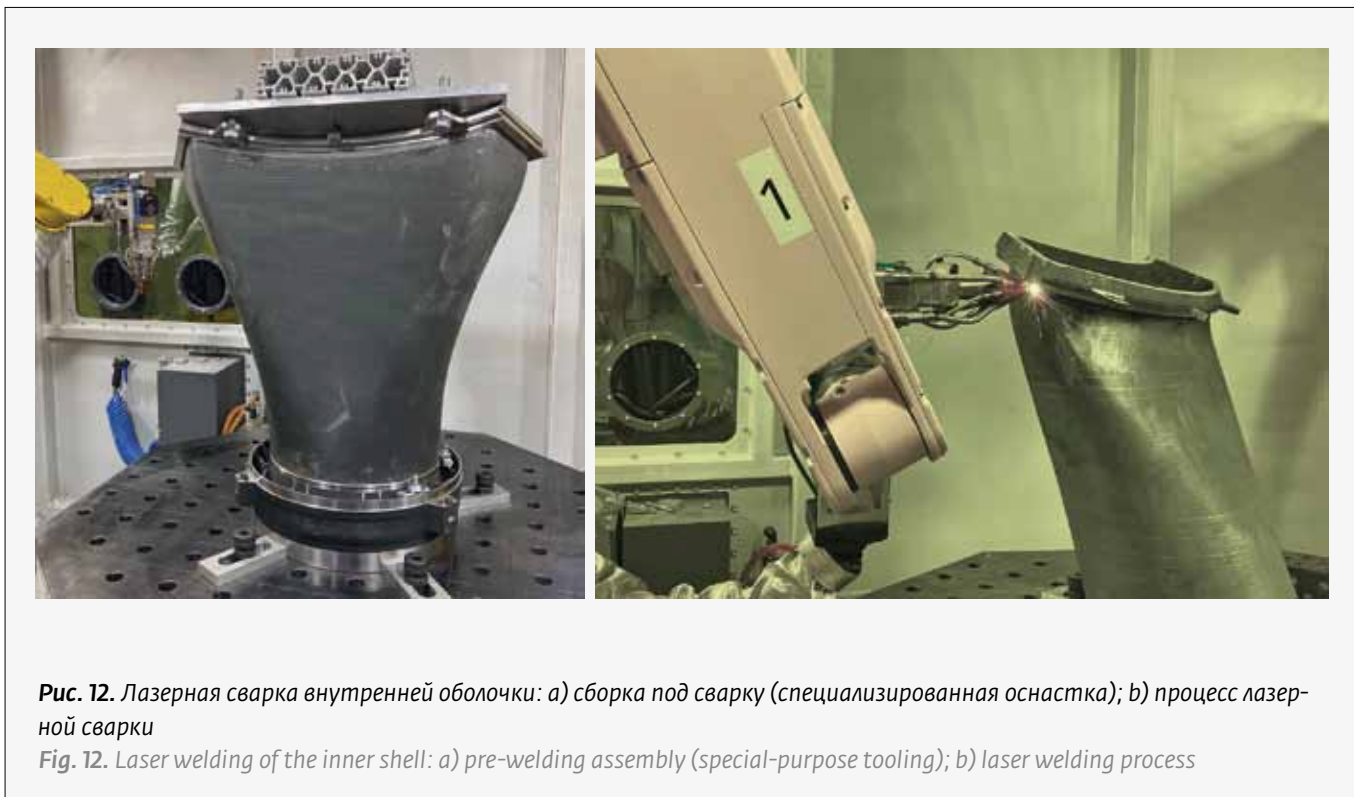


Рис. 12. Лазерная сварка внутренней оболочки: а) сборка под сварку (специализированная оснастка); б) процесс лазерной сварки

Fig. 12. Laser welding of the inner shell: a) pre-welding assembly (special-purpose tooling); b) laser welding process



ВЫВОДЫ

Технологические возможности современных лазерных и АТ позволяют значительно снизить материальные и временные затраты при разработке и изготовлении сложнопрофильных деталей для нужд высокотехнологичных производств.

При этом процесс получения высокоточных заготовок с помощью аддитивных методов многостадийный и требует проведения предварительных численных и натурных экспериментов.

Особое внимание при разработке технологий аддитивного производства крупногабаритных заготовок следует уделять вопросам прогнозирования, учета и компенсации возможных термических деформаций, возникающих как в ходе самого аддитивного процесса, так и при последующей обработке.

Высокий уровень получаемых прочностных характеристик и возможность комбинации аддитивных и традиционных технологических операций обеспечивают высокую эффективность процесса изготовления технически сложных и ответственных узлов и деталей.

БЛАГОДАРНОСТЬ

В статье приведены результаты исследований, полученные при выполнении работ в рамках договора с АО «Силловые машины» от 01.10.2021 № 0000000002019РМО0002/76071 и реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашение о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидии от 30.09.2021 № 075-15-2021-1206, стратегический проект «Цифровые промышленные технологии»).

REFERENCES

1. **Alireza Mirak, Behrooz Shams, Soroush Bakhshi.** Dissimilar welding of Inconel 713 superalloy and AISI 4140 steel using Nd:YAG pulse laser: An investigation on the microstructure and mechanical properties. *Optics and Laser Technology*. 2022; 152. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108143>.
2. GOST R 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. *Additivnyye tekhnologicheskie processy. Bazovyye principy.* ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. *Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы.*
3. **Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., Brooks M., Pitot J., Lopez E., Leary M., Berto F., du Plessis A.** Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*. 2021; 209. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>.
4. **Korkmaz M. E., Waqar S., Garcia-Collado A., Gupta M. K., Krolczyk G. M.** A technical overview of metallic parts in hybrid additive manufacturing industry. *Journal of materials research and technology*. 2022; 18; 384–395. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.085>.
5. **СHumakov D. M.** Perspektivy ispol'zovaniya additivnykh tekhnologij pri sozdanii aviacionnoj i raketno-kosmicheskoy tekhniki. *Trudy MAI*. 2014; 78. Чумаков Д. М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники. *Труды МАИ*. 2014; 78.

4. DIRECT LASER DEPOSITION OF WORKPIECE BLANKS

Based on the results of the preliminary finite element simulation and the process design, the control programs were generated for the direct laser deposition units ILIST-L for the manufacture of workpiece blanks of gas collector elements.

The process of direct laser deposition of the workpiece blanks of the frame, the inlet ring, the inner and the outer shells of the gas collector is shown in Fig. 8.

After deposition, the geometry of the obtained workpiece blanks was monitored, heat treatment was performed to relieve internal stresses for the 316 L steel workpiece blank and to achieve the required strength properties for the H23X-A alloy workpiece blanks. After the heat treatment, the geometry was re-checked.

5. DISCUSSION OF THE RESULTS

The results of the geometry control of the deposited blanks are shown in Fig. 9. The geometry control showed that the deviations of the geometry of the inlet ring and the frame workpiece blanks lie within acceptable limits and make it possible to obtain suitable parts from the deposited workpiece blanks during subsequent processing.

Unacceptable geometry deviations were detected on the workpiece blanks of the inner and outer shells – up to 1.5 mm on the inner shell and up to 3.5 mm on the outer shell.

To eliminate the detected geometry deviations, the technological models of the workpiece blanks were changed. With the help of reverse bending of the sections with maximum deviations, the detected deformations were compensated. The results of the geometry control of the workpiece blanks obtained during repeated direct laser deposition according to the modified technological models are shown in Fig. 10. The changes effected made it possible to obtain workpiece blanks suitable for subsequent processing.

For the manufacture of the gas collector, the workpiece blanks obtained by the direct laser deposition were processed mechanically. Cutting holes in the outer shell and dividing it into two parts was carried out using robotic 3D laser cutting (Fig. 11).

Combining the frame, the inlet ring and the inner shell into one assembly unit was carried out using laser welding (Fig. 12). Previously, an electroerosive burning of holes was carried out in the frame.

After the finishing operations of laser cutting and laser welding with the help of 3D laser scanning, the final control of the geometry of the manufactured



- Mendagaliev R. V., Klimova-Korsmik O.G., Turichin G. A., Vildanov A. M. Direct energy deposition of Cu–Nb functionally graded layers for dissimilar joining titanium alloys and steels. *Materials Letters*. 2022; 324. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132721>.
- Gushchina M. O., Klimova-Korsmik O.G., Turichin G. A. Direct laser deposition of Cu–Mo functionally graded layers for dissimilar joining titanium alloys and steels. *Mater. Lett.* 2022; 307. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131042>.
- Turichin G. A., Klimova-Korsmik O. G., Babkin K. D., Ivanov S. Y. Additive manufacturing of large parts. *Additive Manufacturing*. 2021; 531–568. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818411-0.00001-X>.
- Babkin K.; Zemlyakov E.; Ivanov S.; Vildanov A.; Topalov I.; Turichin G. Distortion prediction and compensation in direct laser deposition of large axisymmetric Ti-6Al-4V part. *Procedia CIRP*. 2020; 94; 357–361. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.145>.
- Golovin P. A., Vildanov A. M., Babkin K. D., Ivanov S. Y., Topalov I. K. Distortion prevention of axisymmetric parts during laser metal deposition. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1109; <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1109/1/012065>.
- Ivanov S., Artinov A., Zemlyakov E., Karpov I., Rylov S., Em V. Spatiotemporal evolution of stress field during direct laser deposition of multilayer thin wall of Ti-6Al-4V. *Materials*. 2022; 15; 263. <https://doi.org/10.3390/ma15010263>.
- DIN 17744-2020. Wrought nickel alloys with molybdenum and chromium – Chemical composition.
- ASTM A240-2015. Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications.
- GOST R 59035-2020. Metalloporoshkovye kompozitsii. Obshchie trebovaniya. ГОСТ Р 59035-2020. Металлопорошковые композиции. Общие требования.
- GOST 23148-98 (ISO 3954-77). Poroshki, primenyaemye v poroshkovoj metallurgii. Otbor prob. ГОСТ 23148-98 (ИСО 3954-77). Порошки, применяемые в порошковой металлургии. Отбор проб.
- Vildanov, A.; Babkin, K.; Mendagaliev, R.; Arkhipov, A.; Turichin, G. Using a Trial Sample on Stainless Steel 316L in a Direct Laser Deposition Process. *Metals*. 2021; 11. <https://doi.org/10.3390/met1101550>.
- Calmungera M., Eriksson R., Lindstrom T., Leidermark D. Effect of additive manufacturing on fatigue crack propagation of a gas turbine superalloy. *Procedia Structural Integrity*. 2019; 23; 215–220. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.089>.
- Mendagaliev R., Klimova-Korsmik O., Promakhov V., Schulz N., Zhukov A., Klimentko V., Olisov A. Heat Treatment of Corrosion Resistant Steel for Water Propellers Fabricated by Direct Laser Deposition. *Materials*. 2020; 13. <https://doi.org/10.3390/ma13122738>.
- GOST 1497-84 (ISO 6892-84). METALLY. Metody ispytaniy na rastyazhenie. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84). Металлы. Методы испытаний на растяжение.
- URL: http://haynesintl.com/docs/default-source/pdfs/new-alloy-brochures/high-temperature-alloys/brochures/230-brochure.pdf?sfvrsn=ae7229d4_86.
- UNS S31603, ISO 2604-1 F59, ISO 2604-4 P57, ISO 2604-4 P58. Stainless steels AISI 316L.

АВТОРЫ

Земляков Е. В., ilwt@ilwt.smtu.ru, Институт лазерных и сварочных технологий Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (ИЛИСТ СПбГМТУ), Санкт-Петербург, Россия
ORCID 0000-0001-9594-2831

Алымов Н. Р., ИЛИСТ СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия
ORCID 0000-0003-1066-1446

Вильданов А. М., ИЛИСТ СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия
ORCID 0000-0002-7319-0605

Бабкин К. Д., ИЛИСТ СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия
ORCID 0000-0003-1098-1319

Иванов С. Ю., ИЛИСТ СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия
ORCID 0000-0002-0077-2313

Кислов Н. Г., ИЛИСТ СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия
ORCID 0000-0002-1103-5802

Тарасов Д. С., АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия
ORCID 0000-0001-8673-7254

Мятлев А. С., АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия
ORCID 0000-0002-5300-836X

Ивановский А. А., АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

GTE-65.1 combustion chamber gas collector was carried out, confirming its compliance with the requirements of the design documentation.

CONCLUSIONS

The technological capabilities of advanced laser and additive technologies can significantly reduce material and time costs in the development and manufacture of complex-shaped parts for the needs of high-tech industries.

At the same time, the process of obtaining high-precision workpiece blanks using additive methods is multi-stage and requires preliminary numerical and real experiments.

When developing technologies for the additive production of large-sized blanks particular attention should be paid to the issues of forecasting, accounting and compensation of possible thermal deformations that occur both during the additive process itself and during subsequent processing.

The high level of strength characteristics obtained and the possibility of combining the additive and traditional technological operations ensure high efficiency of the manufacturing process of technically complex and critical components and parts.

CREDITS

The article presents the results of research obtained during the performance of work under the contract with Power Machines JSC dated October 01, 2021 No. 000000002019RMO0002/76071 and the implementation of the strategic academic leadership program “Priority 2030” (Agreement on the provision of grants from the federal budget in the form of subsidies dated September 30, 2021 No. 075-15-2021-1206, strategic project “Digital Industrial Technologies”).

AUTHORS

Zemlyakov E. V., Institute of Laser and Welding Technologies of St. Petersburg State Marine Technical University (ILWT SPbSMTU), ilwt@ilwt.smtu.ru, St. Petersburg, Russia.
ORCID 0000-0001-9594-2831,

Alymov N. R., ILWT SPbSMTU, St. Petersburg, Russia.
ORCID 0000-0003-1066-1446

Vildanov A. M., ILWT SPbSMTU, St. Petersburg, Russia.
ORCID 0000-0002-7319-0605

Babkin K. D., ILWT SPbSMTU, St. Petersburg, Russia.
ORCID 0000-0003-1098-1319

Ivanov S. Yu., ILWT SPbSMTU, St. Petersburg, Russia.
ORCID 0000-0002-0077-2313

Kislov N. G., ILWT SPbSMTU, St. Petersburg, Russia.
ORCID 0000-0002-1103-5802

Tarasov D. S., Power Machines JSC, St. Petersburg, Russia.
ORCID 0000-0001-8673-7254

Myatlev A. S., Power Machines JSC, St. Petersburg, Russia.
ORCID 0000-0002-5300-836X

Ivanovsky A. A., Power Machines JSC, St. Petersburg, Russia.



ИЛИСТ
ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

СЕМЕЙСТВО РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ «ИЛИСТ»



ИЛИСТ-М



ИЛИСТ-L



ИЛИСТ-L+



ИЛИСТ-XL



ИЛИСТ-2XL



РОБОТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ «ИЛИСТ-2XL»

- размер выращиваемого изделия до – $\varnothing 2200$ мм, h – 1000 мм
- максимальный вес изделия – 4000 кг
- два волоконных лазера мощностью 4 кВт
- два робота Fanuc M20iB/25
- производительность – до 250 см³/ч
- контролируемая атмосфера чистого аргона – 20 м³
- девять синхронно управляемых осей
- порошковый питатель на две колбы
- набор сопел подачи порошка с быстрой заменой
- вакуумируемый шлюз

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ:

- нержавеющие и высокопрочные стали
- жаропрочные никелевые сплавы
- титановые сплавы
- сплавы на основе кобальта и меди

Проводим теоретическую и практическую переподготовку персонала промышленных предприятий для работы на аддитивных установках прямого лазерного выращивания.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Санкт-Петербург, пр. Маршала Жукова, 38-а

Тел. +7 (812) 757-22-22, e-mail: ilwt@ilwt.smtu.ru www.smtu.ru www.ilwt-stu.ru

