

# АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СПЕКАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ И МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В.Я.Панченко, академик РАН,  
В.В.Васильцов, д.т.н., Э.Н.Егоров,  
И.Н.Ильинчев, А.В.Соловьев,  
Институт проблем лазерных и информационных  
технологий РАН (ИПЛИТ РАН), филиал ФГУ  
"ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН",  
Московская обл., г. Шатура, [www.laser.ru](http://www.laser.ru);  
А.В.Богданов, к.т.н., А.И.Мисюров, к.т.н.,  
Н.А.Смирнова, к.т.н.,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)

При лазерном переплаве порошков можно вырастить заготовку с однородной мелкозернистой структурой, получение которой при традиционных технологиях литья невозможно. Представлена отечественная установка для аддитивных технологий спекания различных материалов. Установка базируется на мощном (до 2,5 кВт) волноводном CO<sub>2</sub>-лазере, обеспечивающем уникальное по однородности распределение плотности мощности излучения на мишени. Приведены результаты спекания жаропрочных сплавов на никелевой основе марок ВКНА-1ВР, ВЖЛ 12У и ВЖ159. Порошки разработаны для создания сложнопрофильных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) методом послойного лазерного сплавления и для ремонта сложнопрофильных деталей ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки.

## ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие технологии лазерного синтеза объемных изделий стало особенно заметным в последние годы. Эта технология обладает рядом существенных преимуществ, одно из которых – сокращение сроков проектирования и создания макетов новой техники. Эти технологии могут

## METAL POWDER SINTERING ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR AVIATION AND ENGINEERING INDUSTRIES

V.Y.Panchenko, academician of RAS,  
V.V.Vasiltsov, Doctor of Science (Engineering),  
E.N.Egorov, I.N.Ilichev, A.V.Solovev,  
RAS Institute on Laser and Information Technologies  
(ILIT RAS), FSI Branch "RAS Federal Research Centre  
"Crystallography and photonics" Moscow region,  
Shatura,  
[www.laser.ru](http://www.laser.ru);  
A.V.Bogdanov, Ph.D. (Engineering),  
A.I.Misyurov, Ph.D. (Engineering),  
N.A.Smirnova, Ph.D. (Engineering),  
N.E.Bauman MSTU, Moscow, [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)

**A workpiece with a uniform fine-grained structure can be grown through powder laser melting, which is not possible with conventional casting technology. The following is a domestic plant for sintering additive technologies of various materials. The plant is based on a powerful (up to 2.5 kW) waveguide CO<sub>2</sub>-laser that has a unique uniform distribution of radiation power density on the target. The results of sintering of heat-resistant nickel-based alloys VKNA-1VR, VZHL12U and VZH159 are discussed. The powders are designed to create figurine-shaped parts of gas turbine engines (GTE) by layered laser fusion and to repair GTE figurine-shaped parts by laser gas-powder building-up.**

## INTRODUCTION

Active development of bulk product laser synthesis technology has become especially noticeable in recent years. This technology has a number of advantages, one of which is reduction of term of designing and layout of new equipment. These technologies can be of high demand by metallurgy, aerospace, automotive and other industries [1-5].

Experimental studies confirm the efficiency of the method of layered selective laser sintering (SLS) of bulk products made of powders. When determining the method, the selectivity refers to the ability to scan the free surface of powder material with a laser beam along a preset contour consider-



Рис.1. Схемы реализации технологии СЛС: схема подачи порошков через коаксиальное сопло с обратной связью контролем  
Fig. 1. SLS technology implementation scheme: Scheme of powder supply through a coaxial nozzle with control feedback

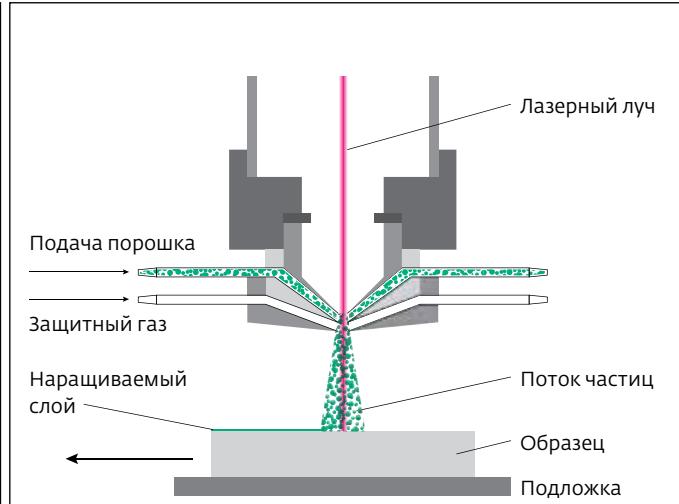


Рис.2. Схема послойной наплавки с подачей порошка и защитного газа  
Fig. 2. Scheme of layered building-up with supply of powder and shielding gas

быть востребованы металлургической, авиакосмической, автомобильной и другими отраслями промышленности [1-5].

Экспериментальные исследования подтверждают перспективность использования метода послойного селективного лазерного спекания (СЛС) объемных изделий из порошков. В определении метода под селективностью понимается возможность сканирования лазерным лучом свободной поверхности порошкового материала по заданному контуру с учетом дозировки лазерного излучения в каждой точке либо непосредственная подача порошкового материала в зону действия лазерного луча (рис.1-3). Благодаря широкому выбору порошковых материалов можно изготавливать изделия, имеющие высокие эксплуатационные свойства.

Технологии СЛС активно развиваются в последние годы в технологически развитых странах. Несмотря на накопленный значительный опыт теоретических и экспериментальных исследований, в России практически отсутствует серийное производство промышленного оборудования в области СЛС. Стоимость единицы приобретаемого зарубежного оборудования превышает 800 тыс. евро.

Селективное лазерное спекание порошков позволяет изготавливать изделия из достаточно широкого спектра материалов (металлы, керамика, порошкообразные пластики и др.).

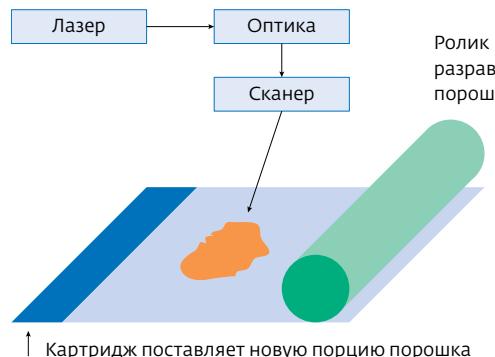
ing laser radiation dispensing at each point, or a direct supply of powdered material to the laser beam processing area (Fig.1-3). With a wide range of powder materials, one can manufacture products with high service properties.

The SLS technologies have been actively developed in recent years in the technologically advanced countries. Despite the considerable experience in theoretical and experimental studies, there is practically no mass production of industrial equipment in the SLS field in Russia. A unit cost of purchased foreign equipment exceeds 800 thousand euro.

Selective laser sintering of powders allows for manufacturing of products of a sufficiently wide range of materials (metals, ceramics, plastics and powder, etc.).

## EXPERIMENTAL COMPLEX FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES BASED ON WAVEGUIDE CO<sub>2</sub>-LASER WITH AN AVERAGE POWER OF RADIATION UP TO 2.5 kW

Relying on extensive experience in engineering works on the modification of the surface, hardening, building-up and doping, in recent years the specialists of ILIT RAS have been developing a laser complex of additive technologies (selective laser sintering - SLS of materials and products from metal powders). The complex is based on a multi-channel waveguide CO<sub>2</sub> - laser "Hybrid" (Fig.4) with



**Рис.3.** Схема послойного спекания порошков с использованием сканатора излучения  
**Fig. 3.** Scheme of layered powder sintering using radiation scanning device



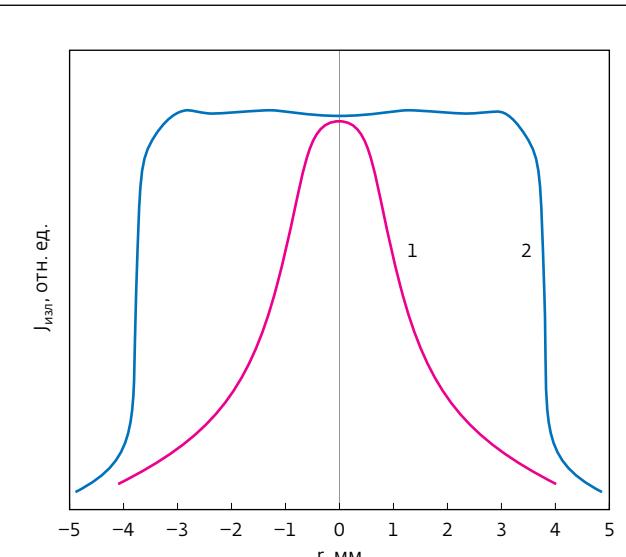
**Рис.4.** Лазерный комплекс СЛС (слева – лазерный излучатель типа "Гибрид" с открытыми панелями; справа – технологическая кабина с трехкоординатным столом)  
**Fig. 4.** SLS laser complex (left – laser emitter "Hybrid" with open panels; right – process cabin with three-coordinate table)

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА БАЗЕ ВОЛНОВОДНОГО CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА СО СРЕДНЕЙ МОЩНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ ДО 2,5 кВт

В ИПЛИТ РАН в течение последних лет, опираясь на богатейший опыт технологических работ по модификации поверхности, закалке, наплавке и легированию, разработан лазерный комплекс аддитивных технологий (селективное лазерное спекание – СЛС материалов и изделий из металлических порошков). Комплекс основан на волноводном многоканальном CO<sub>2</sub>-лазере "Гибрид" (рис.4) со средней мощностью до 2,5 кВт и трехкоординатном столе-манипуляторе [6–8]. Технические характеристики лазера "Гибрид" – технологического волноводного CO<sub>2</sub>-лазера приведены в табл. 1.

Технологический лазер "Гибрид-1" имеет одномодовое распределение и позволяет сфокусировать излучение в пятне диаметром менее 100 мкм, благодаря чему при соответствующем программном и аппаратном обеспечении можно выращивать детали с высоким пространственным разрешением. Лазер "Гибрид-2" отличается от предыдущего варианта только заменой резонаторных зеркал. Он обеспечивает уникальное однородное распределение плотности мощности на обрабатываемом поле диаметром от 0,5 до 10 мм. На рис.5. представлено измеренное распределение плотности мощности излучения на мишени. В фокусе мы имеем гауссово распре-

an average power of up to 2.5 kW and 3-coordinate table manipulator [6–8]. Specifications of "Hybrid" laser – Industrial waveguide CO<sub>2</sub>-laser are shown in Table 1.



**Рис.5.** Распределение плотности мощности излучения на мишени: линия 1 – распределение в фокусе линзы ( $f=300$  мм); линия 2 – распределение на расстоянии 30 мм за фокусом, неоднородность плотности мощности менее 5%  
**Fig. 5.** Distribution of radiation power density on the target (line 1 – distribution in lens focus ( $f=300$  mm)); line 2 – distribution on the focal distance of 30 mm out of focus; power density non-uniformity is less than 5%)

**Table 1.** Технические характеристики лазеров серии "Гибрид"  
**Table 1.** Specifications of "Hybrid" series lasers

Параметр Parameter	"Гибрид-1" "Hybrid-1"	"Гибрид-2" "Hybrid-2"
Длина волны излучения, мкм Radiation wave length, $\mu\text{m}$	10,6	10,6
Номинальная мощность излучения, Вт Rated radiation power, W	1000	2500
Импульсно-периодический режим генерации, кГц Repetitively-pulsed generation mode, kHz	0,2–2,5	0,2–2,5
Нестабильность мощности излучения, % Radiation power instability, %	< 2	< 2
Апертура, мм Aperture, mm	20 С сужающим телескопом With narrowing telescope	45
Расходимость излучения, мрад Radiation divergence, mrad	0,8 С расширяющим телескопом With expanding telescope	8,5
Расход газовой смеси, нл./ч Gas mix consumption, nl/h	1,5	5,0
Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч Cooling water consumption, m <sup>3</sup> /h	0,8	2,5
Технический КПД, % Technical efficiency factor, %	11	10
Масса, кг Weight, kg	380	450

деление (линия 1), а на некотором расстоянии за фокусом имеет распределение типа "супергаусс", то есть получаем на картине распределения плотности мощности однородную полочку.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

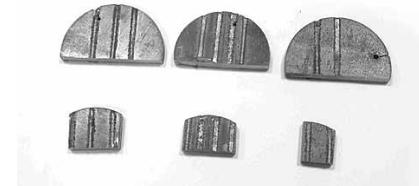
Целью исследований стало изучение возможностей выращивания заготовок с однородной мелкозернистой структурой при лазерном переплаве металлических порошков из жаропрочных сплавов на никелевой основе, разработанных для изготовления сложнопрофильных деталей методом послойного лазерного сплавления. В эксперименте была проведена наплавка материалов из порошков ВКНА-1ВР, ВЖЛ 12У и ВЖ159. Они имеют следующий химический состав, %:

- **ВКНА 1ВР основа Ni;** Al: 8–9; Cr: 5–6; Hf: 0,4–0,6; Mn: 2,5–4,5; Ti: 1–2; W: 2–4; Si: ≤0,4; Fe: ≤0,5;
- **ВЖЛ 12У основа Ni;** Co: 5–14,5; Cr: 9–10; Al: 5,1–5,7; Ti: 4,2–4,7; L<sub>10</sub>: 2,7–3,4; V: 0,5–1; N<sub>b</sub>: 0,5–1; W: 1–1,8;
- **ВЖ 159 Основа Ni;** Al: 1,25–1,55; Mo: 7–8; N<sub>b</sub>: 2,5–3,5; Si: ≤0,8; B: ≤0,005; Fe: ≤3,0; P: ≤0,013; Mn: ≤0,5; Mg: ≤0,03.

Industrial laser "Hybrid-1" has a single-mode distribution, and allows you to focus the radiation within a spot diameter of less than 100 microns. With the appropriate hardware and software, it provides for the ability to grow a part with high spatial resolution. Laser "Hybrid-2" differs from the previous one only in the replacement of resonator mirrors. It provides for a unique uniform power density distribution on the processed field with a diameter of 0.5 to 10 mm. Figure 5 shows the measured distribution of the radiation power density on the target. In focus we have a Gaussian distribution (line 1), but at some distance out of focus we have a "super-Gaussian" distribution, i.e., we obtain a uniform shelf on a power density distribution pattern.

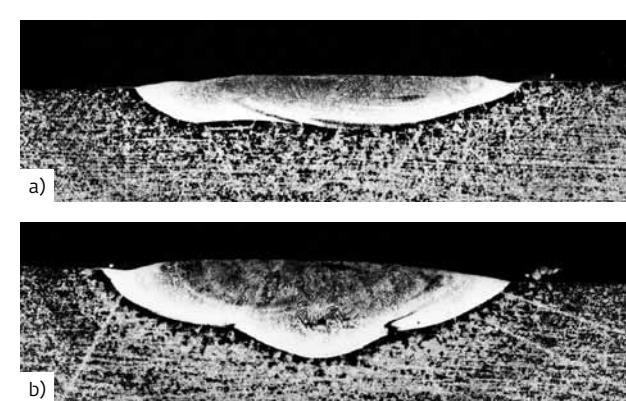
### EXPERIMENTAL RESULTS

The aim of research was to study the possibilities of growing workpieces with a uniform fine-grained structure in laser melting of metal powders of heat-resistant nickel-based alloys, designed for figurine-shaped parts by layered laser fusion. The experiment involved building-up of



**Рис.6.** Образцы наплавки порошков (слева – ВЖ159, скорость 4 мм/с, расход 8 г/мин, Р=1,8 кВт; в середине – ВКНА 1ВР, скорость 4 мм/с, расход 8–12 г/мин, Р=1,8 кВт; справа – ВЖ 12У, скорость 4 мм/с, расход 8–12 г/мин, Р=1,8 кВт)

**Fig. 6.** Samples of powder building-up (left – VZH159, speed is 4 mm/sec, flow rate is 8 g/min, P = 1.8 kW; center – VKNA 1VR, speed is 4 mm/sec, flow rate is 8 g/min – 12 g/min, P = 1.8 kW; right – VZH12U, speed is 4 mm/sec, flow rate is 8 g/min – 12 g/min, P = 1.8 kW)



**Рис.7.** Поперечные сечения валиков, наплавленных порошком ВКНА 1ВР на различных скоростях: а) – 2 мм/с; б) – 6 мм/с

**Fig. 7.** Cross sections of beads built-up using VKNA 1VR powder at different speeds: a) – 2 mm/s; b) – 6 mm/s

Эти порошки предназначены для изготовления сложнопрофильных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) методом послойного лазерного сплавления и для ремонта сложнопрофильных деталей ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки. По мнению специалистов ВИАМ, при лазерном переплаве разработанных порошков можно вырастить заготовку с однородной мелкозернистой структурой, получение которой традиционными технологиями литья невозможно.

Анализ макрошлифов показывает, что на указанных режимах (рис.6) наблюдается удовлетворительное формирование отдельных наплавленных валиков. В качестве примера на рис.7 представлены поперечные сечения валиков, полученных при переплаве порошка ВКНА-1ВР. С увеличением скорости наплавки уменьшается ширина и высота наплавленных валиков, глубина подплавления основы растет, а протяжен-

materials made of powders **VKNA-IVR**, **VZHL12U** and **VZH159**. Chemical composition of the powders as a percentage (%) is given below:

- **Ni-based VKNA 1VR**; Al: 8–9; Cr: 5–6; Hf: 0,4–0,6; Mc: 2,5–4,5; Ti: 1–2; W: 2–4; Si: ≤0,4; Fe: ≤0,5
- **Ni-based VZHL12U**; Co: 5–14,5; Cr: 9–10; Al: 5,1–5,7; Ti: 4,2–4,7; L10: 2,7–3,4; V: 0,5–1; Nb: 0,5–1; W: 1–1,8
- **Ni-based VZH159**; Al: 1,25–1,55; Mo: 7–8; Nb: 2,5–3,5; Si: ≤0,8; B: ≤0,005; Fe: ≤3,0; P: ≤0,013; Mn: ≤0,5; Mg: ≤0,03

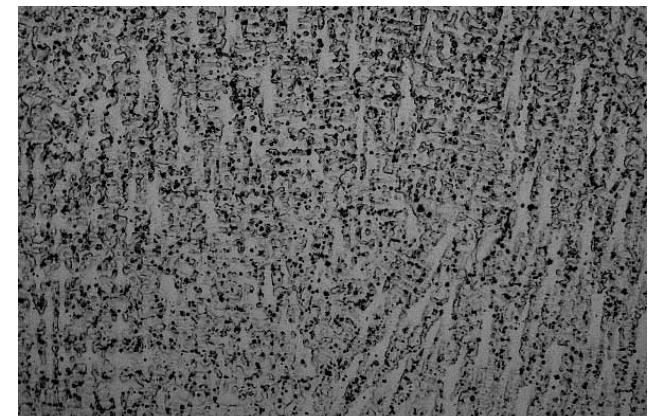
Metal powders of heat-resistant nickel-based alloys VKNA-1VR, VZHL12U and VZH159 are designed for figurine-shaped parts of gas turbine engines (GTE) by layered laser fusion and for repair of GTE figurine-shaped parts by laser gas-powder building-up. According to RRDI, a workpiece with a uniform fine-grained structure can be grown

нность зоны термического влияния (ЗТВ) уменьшается (табл. 2).

Второй и каждый последующий наплавленный валик формируются за счет перемешивания расплавленного металла предыдущего слоя с металлом, полученным при плавлении порошка. Поэтому по мере увеличения количества валиков их химический состав стабилизируется. Для лазерной наплавки выравнивание состава происходит после выполнения 3–5 слоев. Исходя из этих соображений, анализ микроструктуры проводили, изучая структуру из трех валиков.

В литом наплавленном металле наблюдается ячеистая или яично-дендритная транскристаллитная структура (рис.8). Рост кристаллов происходит в направлении от подложки к поверхности. В микроструктуре литого металла многопроходного слоя не наблюдается существенных отличий от единичного валика.

Рост твердой фазы начинается от оплавленных элементов структуры предыдущего наплавленного слоя. На линии сплавления между отдельными наплавленными валиками наблюдается рост твердой фазы от оплавившихся элементов первичной структуры, что говорит об установлении прочной металлической связи между наплавленным металлом предыдущего и последующего

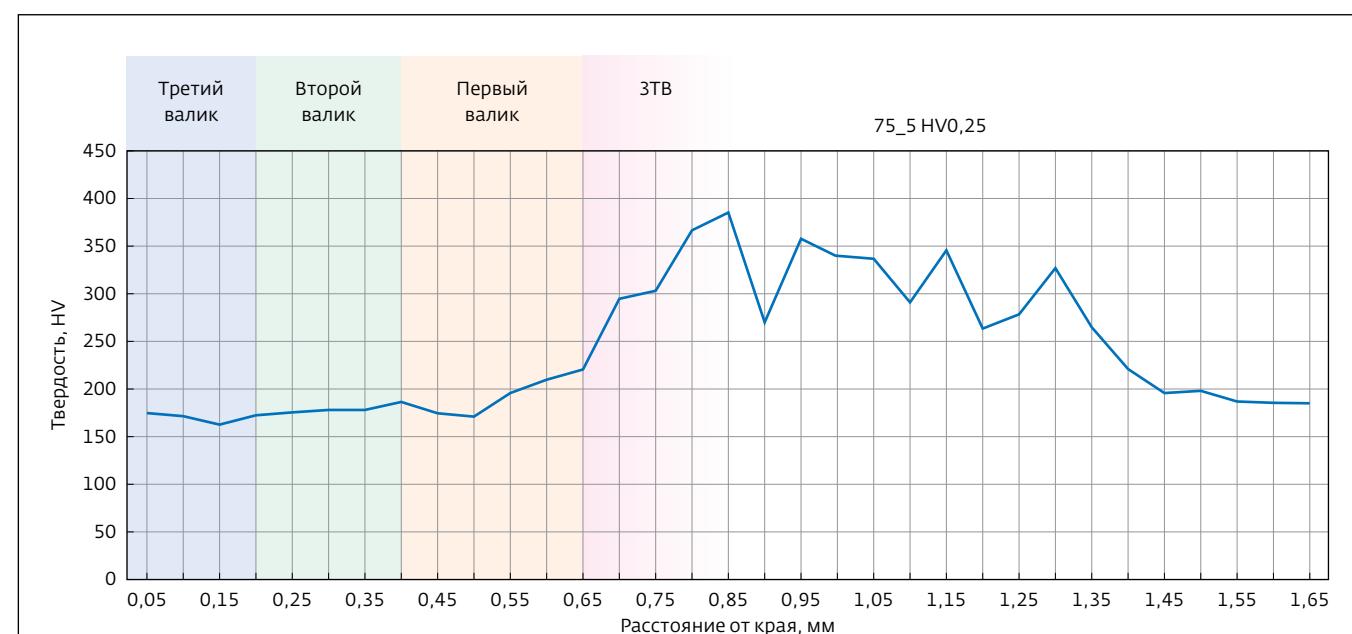


**Рис.8.** Валик, наплавленный порошком ВКНА 1ВР за три прохода на скорости 2 мм/с (микроструктура наплавленного металла)

**Fig. 8.** Bead built-up using VKNA 1VR powder in three passes at a speed of 2 mm/s (weld metal microstructure)

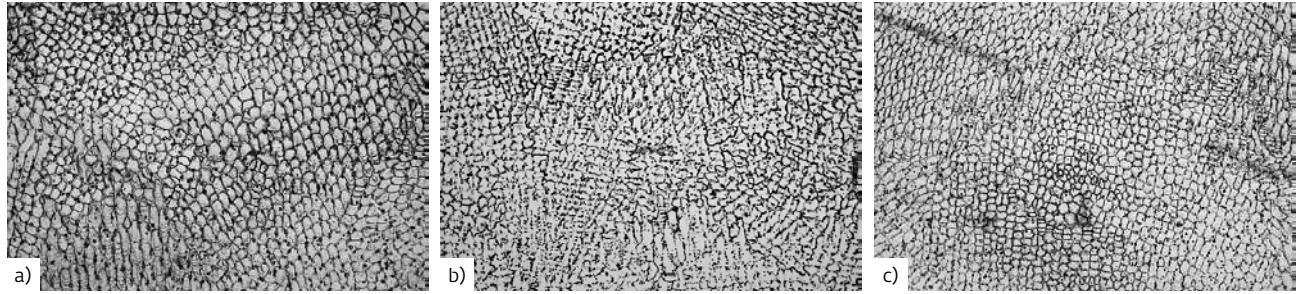
through powder laser melting, which is not possible with conventional casting technology.

Macrosection analysis shows that a satisfactory formation of the individual weld beads (Fig.6) is observed under the specified modes. As an example, Fig.7 shows cross-sections of beads obtained by melting of VKNA-1VR powder. With the increase of building-up rate, the width and height of weld



**Рис.9.** Изменение микротвердости по высоте наплавленного слоя порошком ВКНА 1ВР, выполненного за три прохода на скорости 2 мм/с

**Fig. 9.** Change of microhardness by height of the built-up layer using VKNA1VR powder performed in three passes at a speed of 2 mm/s



**Рис.10.** Первичная структура литого металла валика, наплавленного порошком ВЖЛ 12У, выполненного на различных скоростях: а – 2 мм/с; б – 4 мм/с; в – 6 мм/с

**Fig. 10.** Cast metal primary structure of the bead built-up using VJHL12U powder performed at different speeds: a – 2 mm/s; b – 4 mm/s; в – 6 mm/s

валиков. При соблюдении оптимальных режимов в многослойных наплавках не наблюдается снижения травимости зон сплавления последующего и предыдущего наплавленных валиков.

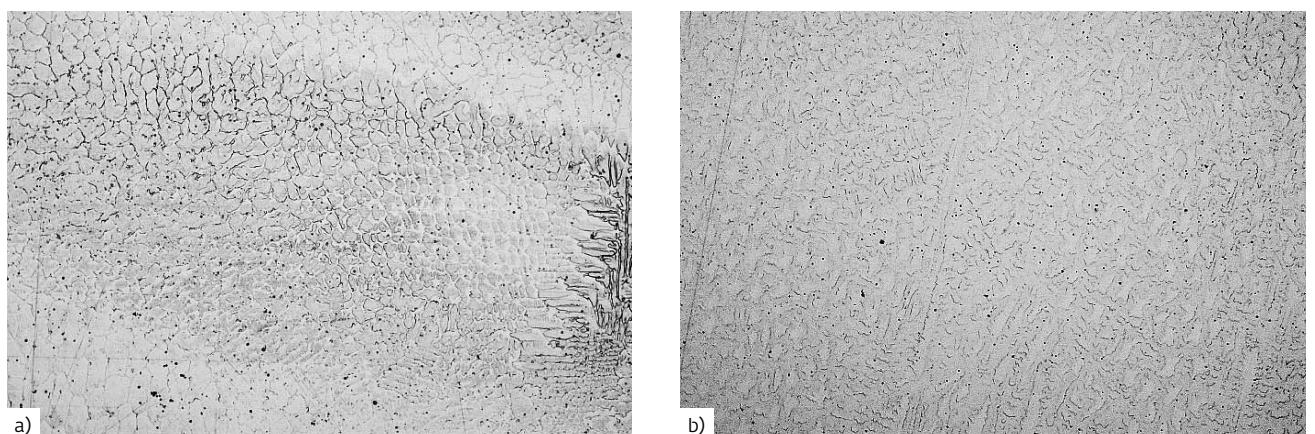
Кроме того, в месте контакта наплавленных валиков микротвердость не изменяется (рис.9). Это свидетельствует о том, что в зоне термического влияния последующего валика диффузионные процессы не успевают развиваться из-за высоких скоростей нагрева и охлаждения при лазерном воздействии.

С увеличением скорости наплавки происходит измельчение элементов первичной структуры и появление ячеистых дендритов (рис.10). Это свидетельствует о возрастании термоконцентрационного переохлаждения, что полностью

beads decreases, the depth of the foundation submelting increases and the length of the heat affected zone (HAZ) decreases (Table 2).

The second, and each subsequent, weld bead is formed due to mixing of the molten metal of the preceding bead with the metal powder obtained by melting. Therefore, as the number of beads increases, their chemical composition is stabilized. For laser welding, the structure alignment occurs after 3-5 layers. Based on these considerations, microstructure analysis was carried out in the 3<sup>rd</sup> bead.

The cast weld metal demonstrates cellular or cellular-dendritic transgranular structure (Fig. 8). The crystal growth occurs in the direction from the substrate to the surface. The cast metal micro-



**Рис.11.** Влияние расхода порошка на формирование первичной структуры литого металла наплавленных валиков: а – 11 г/мин; б – 8 г/мин

**Fig. 11.** Influence of powder consumption on cast metal primary structure formation of built-up beads: a – 11 g/min; б – 8 g/min

согласуется с современными представлениями о формировании первичной структуры в неравновесных условиях. Анализ литой структуры позволяет предположить повышение структурночувствительных свойств с ростом скорости наплавки, что связано с измельчением и "дендритизацией" первичной структуры.

Из-за уменьшения расхода порошка вызывает некоторое укрупнение первичной структуры и отклонение ее от ячеистого строения в сторону ячеистых дендритов (рис.11). Значительного порообразования на металлографических шлифах не наблюдается. Первичная структура наплавленного металла имеет ячеисто-дендритное строение.

Исследование структуры металла, полученного переплавом порошка ВЖЛ 12У, и анализ макрошлифов наплавленных валиков показывает, что, так же как и при использовании порошка ВКНА 1ВР, наплавленные образцы имеют три ярко выраженные зоны. С увеличением скорости наплавки уменьшается ширина и высота наплавленных валиков, а глубина подплавления основы растет. При наплавке единичного валика на подложку наблюдается укрупнение структуры в ЗТВ. С увеличением скорости наплавки протяженность ЗТВ уменьшается (табл. 3).

Исследование структуры металла, полученного переплавом порошка ВЖ 159, показало следующее. При изменении скорости наплавки порошком ВЖ 159 наблюдаются те же тенденции, что и при использовании порошков ВКНА-1ВР и ВЖЛ 12У. Точно так же наплавленные образцы имеют три ярко выраженные зоны: литую зону, металл, подвергшийся термическому влиянию (ЗТВ), и основной металл, не испытавший теплового воздействия. С повышением скорости наплавки уменьшается ширина и высота наплавленных валиков, а глубина подплавления основы растет. При наплавке единичного валика на подложку наблюдается укрупнение структуры в ЗТВ, а с увеличением скорости наплавки протяженность ЗТВ уменьшается.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, при лазерном переплаве порошков из жаропрочных сплавов на никелевой основе марок ВКНА-1ВР, ВЖЛ 12У и ВЖ159 образуется прочноплотная структура, строение которой позволяет прогнозировать высокие структурночувствительные свойства. В литом металле отсутствуют поры и трещиноподобные дефекты. В микроструктуре литого металла многопроходного слоя нет суще-

**Таблица 3.** Максимальная зона термического влияния в зависимости от скорости наплавки

**Table 3.** Maximum heat-affected zone, depending on building-up rate

Образец Sample	Скорость наплавки, мм/с Building-up rate, mm/s	Максимальная по глубине ЗТВ, мкм Maximum HAZ in depth, μm
Рис. 10а	2	990
Рис. 10б	4	850
Рис. 10в	6	717

structure of multi-pass layer does not demonstrate significant differences as compared to the single bead.

The solid phase growth starts from the molten structure elements of the previous built-up layer. The growth of the solid phase from molten elements of the primary structure between the individual weld beads along fusion line is observed, which indicates the establishment of a solid metal connection between the weld metal of the previous and subsequent beads. There is no reduction in etchability of fusion zones of the previous and subsequent weld beads under optimal conditions in multi-bead building-up.

Moreover, at the contact point of the weld beads, the microhardness remains unchanged (Fig. 9). This indicates that diffusion processes do not have time to develop in the heat-affected zone of the subsequent bead due to high heating and cooling rates during laser exposure.

With the increase of building-up rate, there is grinding of elements of the primary structure and the emergence of cellular dendrites (Fig. 10). This indicates an increase in thermal concentrating supercooling, which is fully consistent with the modern concepts of primary structure formation under non-equilibrium conditions. Analysis of the cast structure suggests the improvement of structure-sensitive properties with the increase of building-up rate associated with grinding and "dendritization" of primary structure.

Reduction of powder consumption causes its certain coarsening and deviation from the cellular structure towards cellular dendrites (Fig. 11). There is no significant pore formation in the met-

ственных отличий по сравнению с единичным валиком.

В распределении микротвердости по толщине наплавленного валика в ЗТВ наблюдается провал пластичности. Это может свидетельствовать о сравнительно мощном термическом воздействии на подложку в процессе наплавки, что следует учитывать при назначении режимов лазерной обработки в случае выращивания объемной детали. Поэтому в дальнейшем необходимо провести исследования для уточнения параметров лазерного излучения.

При выборе режима наплавки в будущем следует провести оптимизацию параметров процесса лазерной наплавки, так как наблюдается некоторое противоречие между объемом наплавленного металла, а следовательно, и производительностью процесса, и предполагаемыми свойствами литого металла.

#### СВАРКА ПО ЗАЗОРУ

Наряду с уже внедренными в производство технологиями наплавки порошков для восстановления изношенных деталей, создания и прототипирования различных деталей в последнее время рассматриваются возможности аддитивной технологии сварки по зазору с лазерной наплавкой металлических порошков [9]. Такая технология по сравнению с лазерной сваркой с глубоким проплавлением имеет целый ряд существенных преимуществ. Например, к ней не предъявляются жесткие требования по величине зазора между свариваемыми поверхностями, а лазерное послойное наплавление металлического порошка в зазоре может обеспечивать сварку больших толщин.

Проведено моделирование и оптимизация основных технологических параметров для сварки по зазору с лазерной наплавкой металлических порошков. Для случая нанесения порошка через дозатор проанализирована зависимость коэффициента поглощения частиц порошка от их радиуса. Определены оптимальные величины скорости частиц и массовой скорости дозатора. На рис.12. приведены предварительные экспериментальные результаты.

В России дан старт развитию аддитивных технологий. По мнению Дмитрия Рогозина, заместителя председателя Правительства РФ, аддитивные технологии – это, по сути, новая промышленная революция шестого технологического уклада, о котором так много говорят эксперты. Для использования широких возмож-

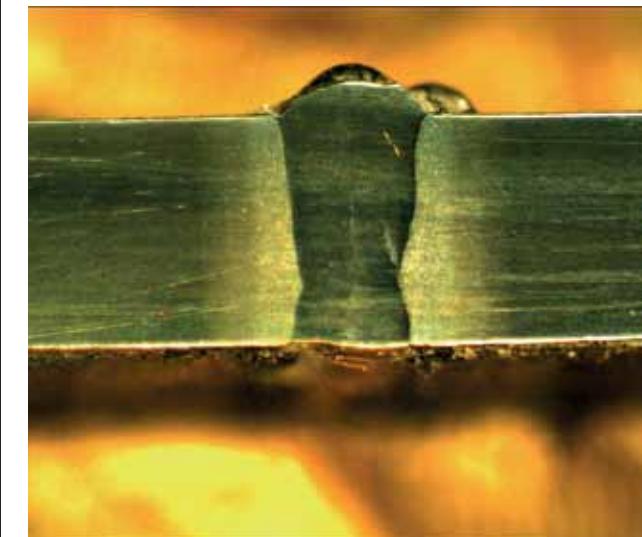


Рис.12. Образец сварки по зазору: зазор между пластинами  $S=1,6$  мм; объем, заполняемый порошком  $4 \times 100 \times 1,6$  мм; мощность излучения  $P=3,5$  кВт; линейная скорость перемещения луча  $V=1,0$  м/мин, фокус линзы  $F=200$  мм; диаметр пятна  $d_p=S+20\%$

Fig. 12. Gap welding sample: gap between the plates  $S=1.6$  mm; volume filled with powder is  $4 \times 100 \times 1.6$  mm; radiation power  $P=3.5$  kW; linear velocity of beam displacement  $V=1.0$  m/min, lens focus  $F=200$  mm; spot diameter  $d_p=S+20\%$

allographic polished sections. Weld metal primary structure is a cellular-dendritic one.

The structure study of metal obtained by VZHL12U powder melting, as well as analysis of bead macrosection shows that, similarly to VKNA IVR, weld samples have three clearly defined zones. With the increase of building-up rate, the width and height of beads decreases and the depth of the foundation submelting is increased. When a single bead is built-up to the substrate, there is a coarsening of the structure in the HAZ. With the increase of building-up rate, the length of the HAZ decreases (Table 3).

The structure study of the metal obtained by VZH159 powder melting showed the following. The trends similar to VKNA-IVR and VZHL12U powders are observed when the building-up rate using VZH159 powder is changed. Similarly, the built-up samples have three clearly defined zones: the cast zone, the metal exposed to thermal influence (HAZ), the base metal not exposed to heat. With the increase of building-up rate, the width and height of beads decreases and the depth of the foundation submelting is increased. When a single bead is built-up to the substrate, there is a coars-

ностей аддитивного производства необходимо вести фундаментальные и фундаментально-ориентированные исследования. Подчеркнем, что успех внедрения результатов работ по модификации поверхности, закалке, наплавке и легированию напрямую зависит от материалов, с которыми предстоит работать. Академик РАН Евгений Каблов, генеральный директор ВИАМ, открывая Международную конференцию "Аддитивные технологии: настоящее и будущее", отметил, что мировыми лидерами в области аддитивных технологий являются США, страны Евросоюза и Япония. Кроме того, в 22 странах уже созданы национальные ассоциации по аддитивным технологиям, объединенные в альянс GARPA" и добавил, что корпорация "Боинг" благодаря 3D-печати изготавливает более 22 тысяч деталей 300 наименований для 10 марок коммерческих и военных самолетов. Чтобы исключить критическую зависимость от технологий и промышленной продукции этих стран необходимо реализовывать собственные проекты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Панченко В.Я., Васильцов В.В., Грезев А.Н., Галушкин М.Г. и др. Лазерное спекание

ening of the structure in the HAZ and with the increase of building-up rate, the length of the HAZ decreases.

The laser melting of powders made of heat-resistant nickel-based alloys such as VKNA-IVR, VZHL12U and VZH159 results in a composite structure allowing for high structure-sensitive properties. The cast metal has no pores and crack-like defects. The cast metal microstructure with multi-pass layer shows no significant differences in comparison with the single bead.

In microhardness distribution through the thickness of the weld bead, there is a failure of ductility in the HAZ. This may indicate a relatively powerful thermal effect on the substrate during building-up that should be taken into account in the assignment of laser processing modes in the event of bulk product growing. Therefore, a research to clarify the parameters of laser radiation for the future work appears to be necessary.

When selecting a building-up mode, one should optimize the parameters of laser building-up process, as there is some discrepancy between the amount of built-up metal and, therefore, performance of the process, and the alleged properties of cast metal.



металлических порошков для изготовления изделий машиностроения с градиентными свойствами. – Сварочное производство, 2011, № 12, с.10-14.

2. Евсеев А.В., Новиков М.М., Панченко В.Я., Низьев В.Г., Васильцов В.В. Лазерные технологии быстрого прототипирования и прямой фабрикации трехмерных объектов, Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок /Под. ред. В.Я.Панченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
3. Васильцов В.В., Галушкин М.Г., Ильиничев И.Н., Мисюров А.И., Панченко В.Я. Послойная лазерная наплавка металлических порошков: аналитическая теория и эксперимент. – Вестник МГТУ, 2012, № 5, с.69-77.
4. Panchenko V.Ya., Vasiltsov V.V., Galushkin M.G., Ilichev I.N. and Misurov A.I. Main Thermophysical Processes in Laser Beam Buildur Welding of Metal Powders. – Inorganic Materials: Applied Reseaech, 2014, v.5, № 3. p.199–203.
5. Панченко В.Я., Александров В.О., Васильцов В.В., Галушкин М.Г., Егоров Э.Н. и др. Разработка оборудования и технологии селективного лазерного спекания (СЛС). – В кн.: Современные лазерно-информационные технологии /Под ред. В.Я.Панченко и Ф.В.Лебедева. – М.: Интерконтакт Наука, 2015.
6. Патент N 2410810 РФ. Электроразрядный многоканальный лазер с диффузионным охлаждением рабочей смеси. Александров В.О., Васильцов В.В., Панченко В.Я.
7. Vasiltsov V.V., Grezev A.N., Evseev A.V., Panchenko V.Ya., Belavin K.E. et al. Development of technologies for layer-by-layer laser synthesis of 3D parts in Russia and Belarus. – Proc. of SPIE, 2007, v.6731, p.164-169.
8. Panchenko V.Ya., Vasiltsov V.V., Galushkin M.G., Ilyichev I.N., Misurov A.I. Main thermophysical processes in laser beam buildup welding of metal powders. – Inorganic Materials: Applied Research, 2014, v.5, № 3, p. 199–203.
9. Васильцов В.В., Галушкин М.Г., Егоров Э.Н., Соловьев А.В., Панченко В.Я. Селективное лазерное спекание металлических порошков: эксперименты и теория. – В кн.: Лазеры в науке, технике, медицине /Под ред. В.А.Петрова. – М: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2013, т. 24, с.76–81.

**GAP WELDING**

Along with building-up technologies for the restoration of worn parts, creation and prototyping of various parts already implemented in the industry, the possibility of gap welding additive technologies with metal powder laser welding has been considered recently [9]. This technology has a number of significant advantages as compared to laser welding with deep penetration. For example, it does not have strict requirements to the size of the gap between the surfaces to be welded, and laser layered building-up of metal powder in the gap can provide welding of large thicknesses.

The modeling and optimization of basic process parameters for gap welding with laser building-up of metal powders has been performed. The dependence of the absorption coefficient of the powder particles on their radius has been analyzed for application of the powder through the dispenser. The optimal particle speed and dispenser mass speed values have been identified. Figure 12 shows preliminary experimental results.

**CONCLUSION**

The development of additive technologies has been launched in Russia. According to Dmitry Rogozin, Deputy Prime Minister of the RF, the additive technologies are, in fact, a new industrial revolution of the sixth technological order, extensively discussed by the experts. To use the vast opportunities of additive manufacturing, it is necessary to conduct fundamental and fundamentally-oriented research. It should be emphasized that the success of the implementation of the results of work on the modification of the surface, hardening, building-up and doping is in direct dependence on the materials used. RAS academician, Evgeniy Kablov, at the opening of the International conference "Additive Technologies: Their Present and Future", has noted that the world leaders in the field of additive technologies are the US, EU and Japan. Furthermore, 22 countries have already established national associations of additive technologies, joined in GARPA alliance, and he has added that Boeing Corporation produces more than 22 thousand parts of 300 styles for 10 brands of commercial and military aircraft thanks to 3D-printing. To exclude a critical dependence on technologies and industrial products in these countries, there is a need to implement own projects.

**ПЕТЕРБУРГСКАЯ  
ТЕХНИЧЕСКАЯ  
ЯРМАРКА**

# 14-16 марта 2017

## Санкт-Петербург ЭКСПОФОРУМ

### СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ:

- ⚙️ Машиностроение
- ⚙️ Обработка металлов
- ⚙️ Металлургия. Литейное дело
- ⚙️ Компрессоры. Насосы. Арматура. Приводы
- ⚙️ Крепеж. Метизы. Инструмент
- ⚙️ Высокие технологии. Инновации. Инвестиции
- ⚙️ Неметаллические материалы для промышленности
- ⚙️ Автоматизация промышленных предприятий
- ⚙️ Услуги для промышленных предприятий



### ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОНГРЕСС БИРЖА ДЕЛОВЫХ КОНТАКТОВ

**ВАШ СТЕНД ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ЦЕНЕ – [ptfair.ru](http://ptfair.ru)**

ОРГАНИЗАТОР:



СВЯЖИТЕСЬ С НАМИ:

+7 (812) 320 80 92, 335 89 04  
[ptf@restec.ru](mailto:ptf@restec.ru)

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ИНФОПАРТНЕР:

