

УДК 621.74

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ПРИ ИСПРАВЛЕНИИ ЛИТЬЕВЫХ ДЕФЕКТОВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА ЖС-32**

© 2015 В. Г. Смелов, А. В. Сотов, А. В. Агаповичев, Е. А. Носова

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье описывается метод исправления брака в литом статоре из сплава ЖС-32 путём импульсной лазерной наплавки элементов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Дефектные места после зачистки были восстановлены с использованием проволоки, подобранной по химическому составу с основным материалом, при использовании отжига на различных этапах наплавки. Применение отжига металла основы до проведения наплавки приводит к увеличению переходной зоны в 2 раза, разница в свойствах между материалами основы и наплавки сохраняется. Проведение отжига после наплавки приводит к исчезновению чёткой границы между материалами основы и наплавленной стали. После наплавки нержавеющей стали на никелевый сплав требуется отжиг и заключительная упрочняющая термообработка.

*Быстрое прототипирование, импульсная лазерная наплавка, жаропрочный сплав, нержавеющая сталь, структура материала, наплавленный слой, отжиг, механические свойства.*

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-425-431

Метод литья по выплавляемым моделям, благодаря преимуществам по сравнению с другими способами изготовления отливок, получил широкое распространение. Применение этого метода обеспечивает получение из любых литейных сплавов сложных по форме отливок массой от нескольких граммов до десятков килограммов со стенками, толщина которых меньше миллиметра [1,2].

Основными причинами возникновения брака в отливках являются пониженные литейные свойства жаропрочных материалов, трудность управления технологическим процессом [3,4]. Некоторые недостатки отливок можно исправить с помощью аддитивных технологий: лазерной и плазменной наплавки, химического травления, проведения локальной термической обработки [5, 6]. Исправление дефектов отливок целесообразно производить, если затраты на эту работу значительно меньше стоимости изготовления новой отливки [7].

В работе описывается метод исправления брака отливки статора турбины малоразмерного газотурбинного двигателя (ГТД) с использованием технологии импульсной лазерной наплавки. Статор турбины был изготовлен методом литья по

выплавляемым моделям с использованием технологии быстрого прототипирования.

Применение технологий быстрого прототипирования получило широкое распространение в различных отраслях промышленности и позволило перейти на новый уровень проектирования и изготовления деталей различной сложности.

Статор турбины был изготовлен методом литья по выплавляемым моделям из жаропрочного сплава на никелевой основе ЖС-32. Визуальный осмотр отливки статора турбины малоразмерного ГТД показал, что на поверхности отливки присутствуют открытые полости усадочного происхождения с шероховатой поверхностью. Как показал анализ процесса заливки, появление таких полостей может быть вызвано наличием массивных узлов, трудно питаемых расплавом при кристаллизации и сочетающихся с тонкими стенками и рёбрами (лопатками), а также переходами от массивных частей к тонким.

Для устранения данного дефекта было предложено использование технологии импульсной лазерной наплавки с подачей присадочного материала в виде проволоки из стали 12Х18Н10Т. Недостатком данной технологии является способ подачи проволоки, когда оператор установки вручную подводит присадочный

материал к месту обработки. Лазерная наплавка позволяет расширить зоны ремонта деталей вследствие минимизации зон термического влияния. При устранении дефектов литых деталей использовалась методика, описанная в [8, 9]. Выбор марки наплавляемого материала обусловлен наибольшим содержанием никеля в присадочных материалах, доступных авторам.

На первом этапе работы по восстановлению была проведена предварительная подготовка поверхности детали под наплавку: оценка исходного состояния восстанавливаемой поверхности (шероховатость, твёрдость), очистка от загрязнений. После предварительной подготовки был проведён подбор наплавляемой проволоки под основной материал отливки.

На следующем этапе по восстановлению литых деталей был проведён подбор параметров процесса импульсной лазерной наплавки. Основными параметрами процесса являются энергия и длительность импульсов, диаметр сфокусированного излучения, частота следования импульсов, положение фокального пятна относительно поверхности наплавляемой детали [10]. Непосредственно наплавку проводили на технологической установке HTS-300M, включающей в себя импульсный твёрдотельный лазер на YAG:Nd с длиной волны излучения 1,06 мкм, длительность импульса излучения от 0,2 до 20 мс. Частота следования импульсов излучения от 1 до 20 Гц, диаметр сфокусированного пучка от 0,2 до 2 мм.

Следующим этапом работы после выполнения лазерной наплавки было про-

ведение экспериментов по определению качества наплавленного материала. В частности, были проведены металлографические исследования и замер твёрдости в зоне наплавки и основного материала отливки турбины. Для этого были изготовлены поперечные микрошлифы трёх образцов из отливки детали:

- образец № 1 – образец с наплавкой без дополнительной термической обработки;
- образец № 2 – образец, в котором наплавка производилась после отжига материала основы;
- образец № 3 – наплавка материала производилась на исходный материал основы, после чего проводился отжиг образца вместе с наплавкой.

Режим отжига: нагрев образцов до 1200°C, его выдержка в течение одного часа и охлаждение с печью. Травление шлифов проводили следующим составом: H<sub>2</sub>O – 180 см<sup>3</sup>, HCl – 180 см<sup>3</sup>, HNO<sub>3</sub> – 120 см<sup>3</sup>, HF – 30 см<sup>3</sup>, продолжительность травления – 1...5 мин.

Для измерения микротвёрдости был использован прибор ПМТ-3 с нагрузкой 200 г. Замер проводился в поперечных сечениях микрошлифов в зоне наплавленного материала и для сравнения – в основном материале образцов отливки турбины (в том числе в зоне термического влияния).

Внешний вид статора после наплавки элементов отливки представлен на рис. 1.



Рис. 1. Отливка статора турбины с наплавкой

При внешнем осмотре наплавленных соединений образцов № 1, № 2, № 3 отливки турбины трещин, расслоений и других дефектов не обнаружено.

При микроисследовании на образце № 1 (рис. 2, а) видна граница раздела материала основы и наплавки (материал основы при травлении приобрёл тёмный оттенок, материал наплавки сохранил свой цвет). В наплавленном материале наблюдаются трещины длиной около 0,6...0,8 мм и толщиной 1,3...1,5 мкм. Распространение трещин происходит от поверхности раздела материала вглубь наплавленного слоя, наблюдается переходная зона шириной 25...50 мкм.

При изучении структуры на образце № 2 (рис. 2, б) наблюдается чёткая граница разделов материалов, граница «основной материал – наплавка» чистая. В материале наплавки трещин не наблюдается. В образце со стороны основного материала наблюдается более светлая переходная зона. Ширина переходной зоны со стороны основного материала составляет 50...100 мкм.

На образце № 3 (рис. 2, в) чёткая граница раздела материалов отсутствует, трещины в наплавленном слое также отсутствуют, несплошностей и несплавлений не обнаружено. Результаты значений замера твёрдости представлены в табл. 1.

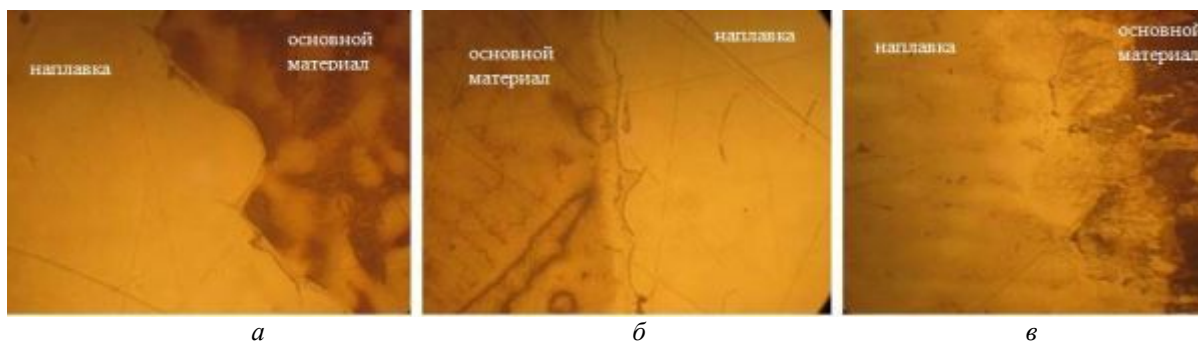


Рис. 2. Структура основного материала и материала наплавки (x500):

а – образец с наплавкой, не прошедший термической обработки;

б – образец с наплавкой после термической обработки материала основы;

в – образец с наплавкой после термической обработки материала основы и наплавленного слоя

Таблица 1. Результаты замера микротвёрдости «основной материал – наплавка»

Поверхность замера	Твёрдость, HRC		
	образец №1	образец №2	образец №3
Зона наплавки	69, 78, 62	43, 58,44	62, 60, 61
Зона термического влияния	69, 78, 82	46, 57, 49	66, 65, 68
Основной материал	56, 58, 56	56, 65, 58	55, 53, 56

Анализ полученных значений показал, что твёрдость наплавленного слоя в образцах № 1, № 3 выше твёрдости основного металла отливки статора турбины. В образцах № 1, № 2 микротвёрдость по зонам наплавки неоднородная, имеются участки с повышенными значениями. Образец № 3 имеет достаточно равномерное

распределение микротвёрдости по сечению.

Для сравнения полученных данных со стандартами для значений твёрдости были определены величины временного сопротивления в зоне наплавки, зоне термического влияния и в основном материале (табл. 2).

Таблица 2. Временное сопротивление «основной материал – наплавка»

Поверхность замера	$\sigma_b$ , МПа			
	ГОСТ, ОСТ	образец №1	образец №2	образец №3
Зона наплавки	490...550	260..282	161...213	219...226
Переходная зона		250...295	172...209	240...247
Основной материал	870...940	206...213	206...246	196...206

Сравнение данных показывает, что значения предела прочности оказались значительно ниже, чем в нормативных документах. Следует учитывать, что нормативные значения приведены для закалённого и горячедеформированного состояния поставки, что существенно выше, чем данные для отжига. Проведение отжига перед наплавкой приводит к повышению прочности в материале основы и снижению прочности в наплавленном материале. В переходной зоне твёрдость и прочность имеют промежуточные значения обоих материалов, что свидетельствует о протекании диффузии в процессе наплавки на отожжённый материал. В образце без предварительного отжига перед наплавкой прочностные свойства ближе по значениям к наплавленному материалу. При этом переходная зона отсутствует. Отжиг образцов после наплавки приводит к снижению прочности во всех трёх зонах (по сравнению с состоянием наплавки без предварительного отжига).

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Проведение лазерной наплавки стали 12Х18Н10Т на отливку из сплава на никелевой основе ЖС-32 с помощью технологии быстрого прототипирования позволило исправить непролитые части детали.

2. Наплавка стали на литую заготовку без предварительной термообработки приводит к появлению трещин в наплавленном слое. Отжиг отливки при 1200°С в течение 1 ч перед наплавкой предотвратил появление трещин в наплавленном элементе, привёл к увеличению переходной зоны от 25...50 до 50...100 мкм.

3. Отжиг изделия после наплавки привёл к расширению переходной зоны, отсутствию чёткой границы между материалами, повышенной прочности в переходной зоне относительно материала наплавки и основного сплава.

4. Значения прочности во всех трёх зонах оказались ниже регламентированных в стандартах для закалённого состояния. После проведения наплавки, отжига необходима заключительная термообработка, направленная на получение свойств, требуемых в нормативных документах.

Исследования были проведены на оборудовании ЦКП САМ-технологий (RFMEFI59314X0003).

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно - технологического комплекса России на 2014-2020 годы»).

### Библиографический список

1. Митраков Г.Н., Сазонов В.С., Полякова А.В., Аникин И.С. Повышение эффективности литья по выплавляемым моделям при использовании аддитивных технологий // Омский научный вестник. 2015. № 140. С. 85-87.

2. Елисеев Ю.С., Голанов С.П., Моисеев В.С. Совершенствование метода литья лопаток ГТД с направленной кристаллизацией // Литейщик России. 2013. № 10. С. 25-28.

3. Смирнов В.В., Павлинич С.П., Бакерин С.В., Хайруллина А.М. Моделирование литниковых систем для центробежного литья лопаток ГТД из интерметаллидных сплавов в программном комплексе PROCAST // *Металлург.* 2013. № 11. С. 23-26.

4. Берстнев А.А., Серебряков С.П. Влияние состава формы по выплавляемым моделям и условий литья жаропрочных сталей на образование поверхностных дефектов // *Литейщик России.* 2012. № 4. С. 20-22.

5. Lawrence E. Murr, Sara M. Gaytan, Diana A. Ramirez, Edwin Martinez, Jennifer Hernandez, Krista N. Amato, Patrick W. Shindo, Francisco R. Medina, Ryan B. Wicker Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies // *Journal of Materials Science & Technology.* 2012. V. 28, Iss. 1. P. 1-14. doi.org/10.1016/s1005-0302(12)60016-4

6. Хаскин В.Ю., Шелягин В.Д., Бернацкий А.В. Современное состояние и перспективы развития технологий лазер-

ной и гибридной наплавки (обзор) // *Автоматическая сварка.* 2015. № 5-6 (742). С. 30-33.

7. Martin Baumers The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push // *Technological Forecasting and Social Change.* 2015. doi.org/10.1016/j.techfore.2015.02.015

8. Smelov V.S., Agapovichev A.V., Balyakin A.V., Agapovichev A.V. Application of additive technologies in the production of aircraft engine parts // *Modern Applied Science.* 2015. V. 9, Iss. 4. P. 151-159. doi.org/10.5539/mas.v9n4p151

9. Барвинок В.А., Смелов В.Г., Сотов А.В., Косырев С.А. Восстановление торца пера лопатки ГТД методом импульсной лазерной наплавки // *Проблемы машиностроения и автоматизации.* 2014. № 3. С. 158-162.

10. Smelov V.G., Sotov A.V., Kosirev S.A. Development of process optimization technology for laser cladding of GTE compressor blades // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2014. V. 9, no. 10. P. 1854-1858.

### Сведения об авторах

**Смелов Виталий Геннадиевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [pdla\\_smelov@mail.ru](mailto:pdla_smelov@mail.ru). Область научных интересов: использование аддитивных технологий в изготовлении деталей.

**Сотов Антон Владимирович**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [SotovAnton@yandex.ru](mailto:SotovAnton@yandex.ru). Область научных интересов: использование аддитивных технологий в изготовлении деталей.

**Агаповичев Антон Васильевич**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени ака-

демика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [agapovichev5@mail.ru](mailto:agapovichev5@mail.ru). Область научных интересов: использование CAD / CAM / CAE / CAPP систем в опытных и аддитивных технологиях, используемых в производстве деталей.

**Носова Екатерина Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [eanosova@mail.ru](mailto:eanosova@mail.ru). Область научных интересов: исследование структуры и свойств металлов и сплавов, разработка требований к материалам для различных операций обработки и эксплуатации.

## APPLICATION OF THE TECHNOLOGY OF PULSED LASER SURFACE COATING IN CORRECTING CASTING DEFECTS OF PARTS MADE OF «ЖС-32» ALLOY

© 2015 V. G. Smelov, A. V. Sotov, A. V. Agapovichev, E. A. Nosova

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Production of casts of parts of gas turbine engines (GTE) is a complex and expensive process that requires a considerable amount of material resources. Various defects often occur in the manufacture of complex parts of gas turbine engines, defects that can be corrected in various ways. This paper describes a method of correcting defects in a cast alloy stator by pulsed laser cladding of stainless steel elements. After deseaming the unsound spots were reconstructed using a wire selected by matching its chemical composition with the basic material, annealing being used at different stages of surface coating. Annealing of the basic metal prior to deposition results in a two-fold increase of the transition area, the difference in the properties of the basic material and the cladding is maintained. If annealing takes place after cladding there is no clearly defined borderline between the basic materials and the steel deposited. Annealing and final hardening heat treatment is required after stainless steel is deposited on the nickel alloy.

*Rapid prototyping, pulsed laser cladding, superalloy, stainless steel, structure of material, deposited layer, annealing, mechanical properties.*

### References

1. Mitrakov G.N., Sazonov V.S., Polyakov A.V., Anikin I.S. Improving the efficiency of investment casting using additive technologies. *Omskiy nauchnyiy vestnik*. 2015. No. 140. P. 85-87. (In Russ.)
2. Eliseev Yu.S., Golan S.P., Moiseev V.S. The improvement of casting method for the casting of gas turbine engine blades with directed crystallization. *Liteyschik Rossii*. 2013. No. 10. P. 25-28. (In Russ.)
3. Smirnov V.V., Pavlinich S.P., Bakerin S.V., Khairullina A.M. Use of procast software to model casting systems for the centrifugal casting of gte blades made of intermetallic alloys. *Metallurgist*. 2014. V. 57, no. 11-12. P. 961-964. doi: 10.1007/s11015-014-9829-y
4. Berstnev A.A., Serebryakov S.P. Influence of investment casting mold composition and of conditions of heat-resistant steel casting on the formation of surface defects. *Liteyschik Rossii*. 2012. No. 4. P. 20-22. (In Russ.)
5. Lawrence E. Murr, Sara M. Gaytan, Diana A. Ramirez, Edwin Martinez, Jennifer Hernandez, Krista N. Amato, Patrick W. Shindo, Francisco R. Medina, Ryan B. Wicker Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies. *Journal of Materials Science & Technology*. 2012. V. 28, Iss. 1. P. 1-14. doi.org/10.1016/s1005-0302(12)60016-4
6. Haskin V.Y., Shelyagin V.D., Bernatsky A.V. Modern state and challenges for development of laser and hybrid surfacing technologies (Review). *The Paton Welding Journal*. 2015. No. 5-6. P. 26-29.
7. Baumers M. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. *Technological Forecasting and Social Change*. 2015. doi.org/10.1016/j.techfore.2015.02.015
8. Smelov V.S., Agapovichev A.V., Balaykin A.V., Agapovichev A.V. Application of additive technologies in the production of aircraft engine parts. *Modern Applied Science*. 2015. V. 9, Iss. 4. P. 151-159. doi.org/10.5539/mas.v9n4p151
9. Barvinok V.A., Smelov V.S., Sotov A.V., Kosirev S.A. Repair of gas turbine blade tip by impulse laser build-up welding. *Engineering and Automation problems*. 2014. No. 3. P. 158-162. (In Russ.)
10. Smelov V.G., Sotov A.V., Kosirev S.A. Development of process optimization technology for laser cladding of GTE compressor blades. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014. V. 9, no. 10. P. 1854-1858.

### About the authors

**Smelov Vitaly Gennadievich**, Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Aircraft Engine Production Department, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [pdla\\_smelov@mail.ru](mailto:pdla_smelov@mail.ru). Area of Research: the use of additive technologies in the manufacture of component parts.

**Sotov Anton Vladimirovich**, post-graduate student, engineer of the Aircraft Engine Production Department, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [SotovAnton@yandex.ru](mailto:SotovAnton@yandex.ru). Area of Research: the use of additive technologies in the manufacture of component parts.

**Agapovichev Anton Vasilevich**, engineer, post-graduate student of the Aircraft

Engine Production Department, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [agapovichev5@mail.ru](mailto:agapovichev5@mail.ru). Area of Research: the use of CAD / CAM / CAE / CAPP systems in pre-production and additive technologies used in the manufacture of component parts.

**Nosova Ekaterina Alexandrovna**, Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Technology of Metals and Aircraft Materials Science, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [eanosova@mail.ru](mailto:eanosova@mail.ru). Area of Research: structure and properties of aviation materials, requirements to materials for various operations of processing and maintenance.