

УДК 621.7

## Повышение эффективности ремонтов, изготовления и эксплуатации оборудования ТЭС путем применения технологий газотермического нанесения покрытий и лазерной наплавки

О. Е. Грачев<sup>1)</sup>, В. М. Неуймин<sup>1)</sup>, Д. В. Настека<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>ООО «Технологические системы защитных покрытий» (Москва, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2015  
Belarusian National Technical University, 2015

**Реферат.** Повышение эффективности ремонтов, изготовления и эксплуатации тепломеханического оборудования ТЭС рассматривается на примере газотермического метода упрочнения рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин. Рабочие лопатки эксплуатируются в условиях высокого силового нагружения, эрозионно-коррозионного разрушения поверхности пера лопатки со стороны влажно-парового потока. Часть эрозионно изношенных рабочих лопаток может быть восстановлена ремонтными компаниями путем использования целого ряда технологий: аргонодуговой, плазменной и газопорошковой наплавки основного материала с последующей мехобработкой, восстановления стеллитовой защиты, электроискрового легирования поверхностного слоя входной кромки, нанесения ионно-плазменных покрытий на поверхность пера лопатки. В отечественном турбостроении рабочие лопатки последних ступеней паровых турбин изготавливаются из сталей мартенситного класса. Важным условием успешного восстановления лопатки является минимизация теплового воздействия на основной материал для исключения возможного формирования зон подкалки. Технология лазерной наплавки позволяет создать такие условия. На поверхность обрабатываемой детали наносится покрытие путем расплавления основы и присадочного материала. Поскольку основа подплавляется минимально, свойства покрытия зависят главным образом от свойств присадочного материала. Процесс лазерной наплавки протекает в несколько стадий, включающих создание физического контакта, химического взаимодействия (поглощения лазерного излучения), объемные процессы с образованием прочных связей в объеме провзаимодействовавших материалов. Для дополнительной защиты от эрозионного разрушения рабочих лопаток ступеней цилиндра низкого давления ООО «Технологические системы защитных покрытий» разработана технология нанесения защитного покрытия пера лопатки методом высокоскоростного газопламенного напыления. Данная технология реализована компанией в 2012 г. при ремонте турбины К-200-12,8 (Ленинградский металлургический завод) на Заинской ГРЭС ОАО «Татэнерго» (упрочнение поверхности пера рабочей лопатки проводится без выемки облопаченного ротора из цилиндра низкого давления). По данным ГРЭС, на начало 2015 г. следов эрозионного износа рабочих лопаток не обнаружено.

**Ключевые слова:** газотермическое нанесение покрытия, лазерная наплавка, оборудование ТЭС, рабочие лопатки

**Для цитирования:** Грачев, О. Е. Повышение эффективности ремонтов, изготовления и эксплуатации оборудования ТЭС путем применения технологий газотермического нанесения покрытий и лазерной наплавки / О. Е. Грачев, В. М. Неуймин, Д. В. Настека // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 55–61

**Адрес для переписки**  
Неуймин Валерий Михайлович  
ООО «Технологические системы  
защитных покрытий»  
ул. 16-я Парковая, 27,  
105484, г. Москва, Российская Федерация  
Тел.: (926) 521-00-75  
neva333@yandex.ru

**Address for correspondence**  
Neuimin Valeriy. M.  
LLC 'Technological Systems  
of Protective Coating'  
16<sup>th</sup> Parkovaya str., 27,  
105484, Moscow, Russian Federation  
Tel.: (926) 521-00-75  
neva333@yandex.ru

## **Increasing Efficiency of Repairing, Manufacturing and Operation of the TPP Facilities by Technology of Gas-Thermal Coating and Laser Surface Melting**

**O. E. Grachev<sup>1)</sup>, V. M. Neuimin<sup>1)</sup>, D. V. Nasteka<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>LLC 'Technological Systems of Protective Coating' (Moscow, Russian Federation)

**Abstract.** The article considers effectiveness increase of the TPP heat-mechanical equipment repair, manufacturing and maintenance as exemplified by gas-thermal technique for hardening last-stages rotor blades of the steam turbines. The rotor blades work under conditions of intense power loading, their airfoil being erosion-corrosion destructed by the action of the moist-steam flow. Repairing companies employ quite a number of technologies to restore some of erosion-worn rotor blades. Inter alia, argon-arc, plasma and gas-powder weld deposition of the original material with subsequent machining, stellite protection recovery, electrical spark alloying the entry edge mat surface, spraying ion-plasma coating on the blade airfoil surface. In domestic turbine building, rotor blades of the steam turbines last stages are manufactured of martensitic class stainless steel. The key condition for successful blade restoration is thermal effect minimizing on the base material for excluding the slag areas possible forming. The laser surface coating technology provides these conditions. They coat the surface of an item being processed by way of melting the base and the adding material. In as much the base melts smallest, the coating characteristics depend mainly on the properties of adding material. The procedure of laser coating passes through several stages including physical contact creation, chemical interaction (laser radiation absorption), volumetrical processes resulting in formation of stable bonds in volume of the materials that have reacted. For the low-pressure cylinder rotor blades supplementary protection against erosion destruction, LLC 'Technological Systems of Protective Coating' developed technology of the blade airfoil protective finish by method of high-speed gas-flame sputter. The company realized this technology in 2012 during K-200-12,8 turbine (of the Leningrad Metallurgical Works – LMZ) repairing in Zainsk SDPP by JSC 'Tatenergo'. The feature of the technology is performing the rotor blade airfoil surface hardening without extracting the rotor out of the low-pressure cylinder and with rotor blades remaining on the rotor. According the SDPP data, as for the beginning of 2015 there are no traces of the rotor blade erosive wear detected.

**Keywords:** gas-thermal coating process, laser surface melting, TTP facilities, rotor blades

**For citation:** Grachev O. E., Neuimin V. M., & Nasteka D. V. Increasing Efficiency of Repairing, Manufacturing and Operation of the TPP Facilities by Technology of Gas-Thermal Coating and Laser Surface Melting. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 55–61 (in Russian)

В статье рассматривается новый для российского энергомашиностроения способ упрочнения рабочих лопаток (РЛ) последних ступеней цилиндра низкого давления (ЦНД) паровых турбин ТЭС, предложенный ООО «ТСЗП». РЛ последних ступеней турбин эксплуатируются в условиях, характеризующихся высоким силовым нагружением, наличием коррозионно активных сред, эрозийным износом поверхности лопаток вследствие каплеударного воздействия на них влажно-парового потока [1].

В отсутствие достаточного финансирования многие ремонтные компании осуществляют ремонт РЛ, реализуют мероприятия, направленные на повышение срока их службы. Данная проблема решается ими за счет использования целого ряда технологий: аргонодуговой, плазменной и газопорошковой наплавки основного материала [2–4], электроискрового легирования поверхностного слоя входной кромки РЛ [5], нанесения

ионно-плазменных покрытий на поверхность пера лопатки [6], а также припайки стеллитовых пластин [7, 8].

Поскольку основными материалами, традиционно используемыми в отечественном турбостроении, по ГОСТ 18968–73 являются стали мартенситного класса марок 12X13, 20X13, 15X11МФ, существенное условие успешного проведения операции восстановления РЛ – это минимизация теплового воздействия на основной материал для исключения формирования зон подкалки. Такое возможно при использовании технологий лазерной наплавки, которая заключается в нанесении на поверхность обрабатываемого изделия покрытия путем расплавления основы и присадочного материала. Вследствие того что основа подплавляется минимально, свойства покрытия главным образом зависят от свойств присадочного материала. При этом процесс лазерной наплавки проходит в несколько стадий, включающих создание физического контакта, химического взаимодействия (поглощения лазерного излучения), протекание объемных процессов с образованием прочных связей в объеме провзаимодействовавших материалов.

Активация контактной поверхности при наплавке основы осуществляется путем воздействия сфокусированного излучения, вызывающего локальный нагрев с образованием ванны расплава, в которую подается присадочный материал. При этом подача присадочного материала проходит по приведенной на рис. 1 схеме.

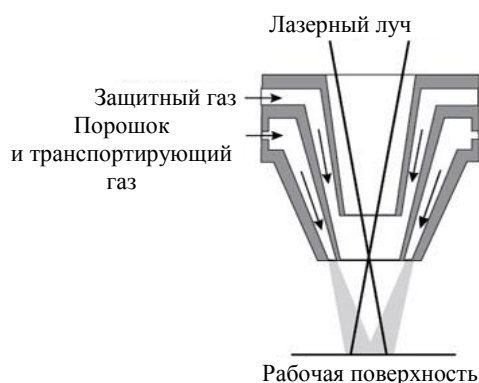


Рис. 1. Схема подачи присадочного материала в ванну расплава при лазерной наплавке

Fig. 1. The feeding diagram of adding material to the molten pool at overlaying laser welding

Высокая концентрация энергии в пятне нагрева создает возможность проведения процесса при повышенных скоростях обработки, обуславливающих:

- формирование наплавленного слоя с малым коэффициентом перемешивания  $\gamma = 0,05-0,15$  в результате незначительного подплавления основы;
- минимальное термическое воздействие на основной материал, что особенно важно для материалов, претерпевающих структурные и фазовые превращения;
- малые остаточные деформации наплавленных деталей.

Процесс лазерной наплавки выполняется при помощи лазерной установки типа LDF 6000, обладающей следующими техническими характеристиками:

- тип лазера – твердотельный, диодный;
- длина волны – 900–1030 нм;
- максимальная мощность излучения – 6 кВт;
- фокусное расстояние – 250 мм;
- форма и размер луча в фокусе – круглая  $\varnothing 3,13$  мм или прямоугольник размером 16×3 мм.

Для восстановления геометрии входной кромки РЛ применяли присадочный материал, схожий по химическому составу с материалом основы. Перед наплавкой стеллитовые пластины удаляли, остатки дефектных слоев на РЛ зачищали абразивным кругом в зоне подбандажного промыва и прилегающих к ней зонах. Предварительно перед наплавкой проводили выборку материала основы в зоне подбандажного промыва лопатки. Затем лопатку устанавливали в специализированной оснастке, закрепленной на планшайбе поворотного стола. Процесс наплавки выполнялся по заранее разработанной управляющей программе при помощи промышленного автоматизированного робота, входящего в состав комплекса лазерной наплавки.

Проведено металлографическое исследование контрольных образцов стали 20X13 с наплавкой схожего по химическому составу присадочного материала. Полученная микроструктура шлифа, показанная на рис. 2, характеризуется однородностью наплавки, отсутствием зон несплавления, а также трещин и дефектов. Твердость наплавленного слоя составила 50–52 HRC. Величина зоны термического влияния варьируется в пределах 200–400 мкм, что является отличительной особенностью метода лазерной наплавки.

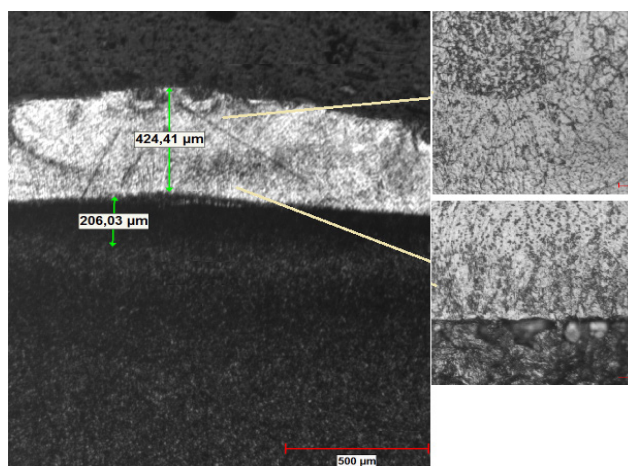


Рис. 2. Микроструктура контрольного образца стали марки 20X13

Fig. 2. Microstructure of the 20Kh13 steel reference sample

В процессе наплавки распространение температурного поля по материалу основы, а также температуру пера РЛ в нескольких точках контроли-

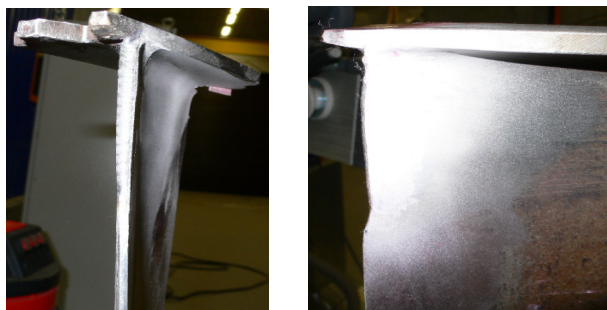
ровали с помощью тепловизора. Полученные данные помогли подобрать оптимальную траекторию движения лазерного луча по поверхности заготовки лопатки для восстановления ее геометрии с целью не допустить значительного нагрева материала основы и образования зон подкалки.

В последующем восстановленный участок пера РЛ механически обрабатывали до требуемых размеров (рис. 3), контроль наплавленного слоя на наличие трещин проводили методом цветной дефектоскопии (рис. 4).



*Рис. 3.* Восстановленное перо РЛ турбины К-300-23,5 Ленинградского металлургического завода (ЛМЗ)

*Fig. 3.* Restored RB (rotor blades) airfoil of К-300-23,5 Leningrad Metallurgical Works (LMZ) turbine



*Рис. 4.* Результаты цветной дефектоскопии восстановленной части пера РЛ турбины К-300-23,5 (ЛМЗ)

*Fig. 4.* The dye penetrant inspection results for the restored RB airfoil portion of К-300-23,5 (LMZ) turbine

После восстановления геометрии РЛ восстанавливали слой стеллита с использованием технологии лазерной наплавки. При этом формирование наплавленного слоя осуществляли с минимальными остаточными напряжениями, что позволяло сохранить первоначальный профиль РЛ. Контроль качества РЛ осуществляли путем контроля технологических параметров процесса (для 100 % заготовок), капиллярной дефектоскопии и контроля зон подкалки с использованием прибора типа ЗОНД ВД-96.

В настоящее время данная технология ремонта РЛ проходит апробацию на базе филиала ремонтно-сервисного предприятия ОАО «КВАРЦ

Групп» (Кострома). Проведенные Московским энергетическим институтом в апреле 2015 г. исследования на образцах показали повышение стойкости наплавки порошкового стеллита к абразивному износу под воздействием влажно-парового потока с частицами влаги размером 800 мкм по сравнению со стойкостью припаянных стеллитовых пластин на входную кромку РЛ в семь и более раз.

Для дополнительной защиты от эрозионного разрушения РЛ последних ступеней паровых турбин ООО «ТЭСЗП» разработана технология нанесения защитного покрытия методом высокоскоростного газопламенного напыления. Данная технология реализована компанией в 2012 г. в период ремонта турбины К-200-12,8 (ЛМЗ) на Заинской ГРЭС ОАО «Татэнерго». Работы по упрочнению поверхностей РЛ двух последних ступеней ЦНД были выполнены на облопаченном роторе [9].

Время нанесения покрытия на облопаченное колесо турбинной ступени составило до одной недели при односменной работе трех человек. При осмотре РЛ турбины К-200-12,8 (ЛМЗ) в январе 2015 г., через два года после нанесения упрочняющего покрытия и последующей эксплуатации турбины, не выявлено следов его повреждения (эрозионного разрушения покрытия).

Газотермические технологии нанесения покрытий [10] могут быть применены в электроэнергетике при ремонте турбин, например для восстановления и упрочнения поверхностей посадки деталей и сборочных единиц, восстановления баббитовых подшипников, нанесения прирабатываемых покрытий взамен изношенных концевых и надбандажных уплотнений, а также для защиты элементов конструкций запорной и регулирующей арматуры ТЭС и других деталей.

## ВЫВОД

Использование современных технологий нанесения покрытий методами газотермического напыления и наплавки позволяет существенно повысить качество ремонта и изготовления рабочих лопаток последних ступеней цилиндра низкого давления паровых турбин ТЭС, продлить сроки службы деталей и сборочных единиц оборудования. Расширение применения новых технологий принесет в электроэнергетику повышение эффективности ремонтов, улучшение изготовления и эксплуатации оборудования ТЭС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Неуймин, В. М. О мерах по снижению эрозионного износа рабочих лопаток современных паровых турбин ТЭС / В. М. Неуймин // Энергетик. 2011. № 3. С. 15–20.
2. Технология ремонта рабочих лопаток паровых турбин. Ч. 1: Ремонт методом нанесения высокохромистой наплавки / Ф. А. Хромченко [и др.] // Сварочное производство. 1998. № 11. С. 19–23.
3. Технология ремонта рабочих лопаток паровых турбин. Ч. 2: Ремонт комбинированным способом сварки и наплавки / Ф. А. Хромченко [и др.] // Сварочное производство. 1999. № 2. С. 25–30.
4. Технология ремонта рабочих лопаток паровых турбин. Ч. 3: Усталостная прочность отремонтированных рабочих лопаток / Ф. А. Хромченко [и др.] // Сварочное производство. 1999. № 4. С. 6–7.
5. Беляков, А. В. Практика формирования электроискровых покрытий для упрочнения и восстановления лопаточного аппарата проточной части паровых турбин тепловых и

- атомных электростанций / А. В. Беляков, В. И. Шапин, А. Н. Горбачев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2008. Вып. 4. С. 1–9.
6. Рыженков, В. А. Повышение износостойкости оборудования паротурбинных установок электрических станций / В. А. Рыженков. М., 2002. 58 с.
  7. Яблоков, Л. Д. Паровые и газовые установки / Л. Д. Яблоков, И. Г. Логинов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 350 с.
  8. Перельман, Р. Г. Эрозия элементов паровых турбин / Р. Г. Перельман, В. В. Пряхин. М.: Энергоатомиздат, 1986. 180 с.
  9. Прохоров, Д. В. Внедрение высокоскоростного газопламенного метода напыления защитного покрытия на лопатки последних ступеней турбины К-200-130 Заинской ГРЭС / Д. В. Прохоров // Энергоэффективность и энергосбережение: тр. XIII Междунар. симпоз. под общ. ред. Е. В. Мартынова. Казань, 2012. Казань: Изд-во ООО «Скрипта», 2012. 512 с.
  10. Газотермическое напыление / Л. Х. Болдаев [и др.]; под общ. ред. Л. Х. Балдаева. 2-е изд. М.: ООО «Старая Басманная», 2015. 540 с.

Поступила 12.02.2015    Подписана в печать 10.04.2015    Опубликована онлайн 16.12.2015

#### REFERENCES

1. Neuimin V. M. (2011) On Reducing the Rotor Blade Erosive Wear of the TPP Modern Steam Turbines. *Energetik* [Power Engineer], 3, 15–20 (in Russian).
2. Khromchenko F. A., Lappa V. A., Fedina I. V., Karev A. N., & Dolzhanskii P. R. (1998) Repair Procedures for the Rotor Blades of Steam Turbines. Part 1. Repair by Method of High-Chromium Weld Deposition. *Svarochnoe Proizvodstvo* [Welding Engineering], 11, 19–23 (in Russian).
3. Khromchenko F. A., Lappa V. A., Fedina I. V., Karev A. N., & Dolzhanskii P. R. (1999) Repair Procedures for the Rotor Blades of Steam Turbines. Part 2. Combined Repair Technique – Welding and Weld Deposition. *Svarochnoe Proizvodstvo* [Welding Engineering], 2, 25–30 (in Russian).
4. Khromchenko, F. A., Komarov, V. A. Karev, A. N., & Dolzhanskii, P. R. (1999) Repair Procedures for the Rotor Blades of Steam Turbines. Part 3. Fatigue Strength of Reconditioned Rotating Blades. *Svarochnoe Proizvodstvo* [Welding Engineering], 4, 6–7 (in Russian).
5. Belyakov A. V., Shapin V. I., & Gorbachev A. N. (2008) Practice of Forming Electrospark Coating for Hardening and Restoring the Air-Gas Channel Blading of the Thermal and Nuclear Power Plant Steam Turbines. *Vestnik Ivanovskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 4, 1–9 (in Russian).
6. Ryzhenkov V. A. (2002) *Povyshenie Iznosostoikosti Oborudovaniia Paroturbinykh Ustanovok Elektricheskikh Stantsii. Dis. d-ra tekhn. nauk* [Increasing Wearing Capacity of the Steam Turbine Plant Equipment of the Electric Power Stations. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow. 58 p. (in Russian).
7. Yablokov L. D., & Loginov I. G. (1988) *Steam Installations and Gas-Fired Plants*. Moscow, Energoatomizdat. 350 p. (in Russian).
8. Perelman R. G., & Pryakhin V. V. (1986) *Erosion of the Steam Turbine Elements*. Moscow, Energoatomizdat. 180 p. (in Russian).
9. Prokhorov D. V. (2012) Implementing the Technique of High-Speed Gas-Flame Sputter Coating for the Last Stages Blades of the K-200-130 Turbine in Zainsk SDPP. *Energy Efficiency and Energy Saving. Proceedings of XIII Intern. Symposium*. Kazan, Skripta, 2012, 512. (in Russian).
10. Baldaev L. Kh., Borisov V. N., Vakhalin V. A., Gannochenko G. I., Zatoka A. E., Zakharov B. M., Ivanov A. V., Ivanov V. M., Kalita V. I., Kudinov V. V., Puzriakov A. F., Sborshchikov Iu. P., Khamitsev B. G., Shkolnikov E. Ia., & Iaroslavtsev V. M. (2015) *Gas-Thermal Coating*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Staraya Basmannaya. 540 p. (in Russian).

Received: 12 February 2015    Accepted: 10 April 2015    Published online: 16 December 2015