



ЛАЗЕРНАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ МОДИФИКАЦИЯ БАНДАЖНЫХ СТАЛЕЙ КАРБИДОМ ВОЛЬФРАМА

А. Г. Григорьянц, А. В. Пересторонин,
a.v.perestoronin@bmstu.ru,
А. И. Мисюров, И. Н. Шиганов
МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

Формирование поверхностных металлокерамических композитных слоев позволяет значительно повысить износостойкость. Для этого может быть использован процесс лазерно-порошковой обработки. При подаче порошка соосно лазерному лучу можно добиться формирования глубокого упрочненного слоя, однако при выборе параметров обработки следует учитывать снижение интенсивности луча при прохождении потока порошка и нагрев частиц в полете через облучаемую область. Расчеты показали, что при реализуемых на практике параметрах обработки снижение интенсивности лазерного излучения на поверхности детали может достигать 10%. Состояние частиц, попадающих в жидкую сталь, зависит от их размера. Частицы сравнительно небольших размеров могут испытывать оплавление, в результате интенсифицируется диффузия вольфрама в сталь.

Статья поступила в редакцию 29.11.2018
Статья принята к публикации 20.01.2019

Для лазерного модифицирования поверхности наибольшее распространение получили такие процессы, как поверхностное легирование и лазерная наплавка [1]. Появление высокоэффективных источников, таких как волоконные и диодные лазеры, дало новый импульс развитию этих технологий, а также появлению новых процессов обработки.

Модификация поверхности используется, в первую очередь, в тех случаях, когда требуется повысить износостойкость изделий. Для колес железнодорожных локомотивов износ гребня является одним из основных факторов, ограничивающих межремонтный пробег. Поэтому для актуальной задачи упрочнения бандажа предложено множество решений, таких как плазменная поверхностная закалка [2-5], электроконтактная обработка [6], механическая обработка [7]. Поскольку для изготовления этих изделий применяются углеродистые стали, упрочнение достигается

LASER SURFACE MODIFICATION OF BANDAGE STEELS WITH TUNGSTEN CARBIDE

A. G. Grigoriants, A. V. Perestoronin,
a.v.perestoronin@bmstu.ru;
A. I. Misyurov, I. N. Shiganov,
N. E. Bauman MSTU, Moscow

Surface metal-ceramic composite layers formation provides significant wear resistance increasing. For this aim, laser-powder processing can be used. With the powder feeding coaxial to the laser beam, it is possible to make a deep hardened layer, but the laser radiation intensity decreasing when the beam passes through the powder flow and the heating of the particles flying in the irradiated region are to be taken into consideration. The calculations showed that when realizable process parameters are used, laser beam intensity decreasing reaches the level of 10% on the component surface. The condition of a particle that is injected into the melted steel depends on its size. The relatively small particles can be partly melted, and it causes the intensification of the tungsten diffusion into the steel.

Article received for editing 29.11.2018
Article accepted for publication 20.01.2019

For laser surface modification, such processes as surface doping and laser surfacing are most widely used [1]. The emergence of highly efficient sources, such as fibre and diode lasers, has given new impetus to the development of these technologies, as well as the emergence of new processing processes.

Surface modification is used, first of all, in those cases when it is required to increase the wear resistance of products. For wheels of railway locomotives, wear of the flange is one of the main factors limiting the turnaround time. Therefore, for the actual task of hardening the bandage, many solutions have been proposed, such as plasma surface hardening [2-5], electric resistance machining [6], and mechanical machining [7]. Since carbon steels are used to manufacture these products, hardening is achieved primarily by changing the phase composition of the material. In the initial state, as a rule, it has a troostite structure, after processing it is bainitic [4] or martensitic [2, 3]. The increase in hardness achieved in this way makes it possible to increase the mileage of locomotives up to 3 times, however, this



в первую очередь изменением фазового состава материала. В исходном состоянии, как правило, он имеет трооститную структуру, после обработки – бейнитную [4] или мартенситную [2, 3]. Достижимое таким образом повышение твердости позволяет увеличить пробег локомотивов до 3 раз, однако этого недостаточно для достижения максимально эффективного цикла их эксплуатации.

Применение лазерной обработки позволяет добиться более высокой твердости стали за счет измельчения мартенситной структуры, однако при ее применении глубина обработанного слоя относительно невелика (до 1,5 мм при обработке без оплавления поверхности) [8], а для достижения высокой производительности требуется применение специальных оптических систем и высокомоощных лазеров [9].

Общим недостатком всех перечисленных способов является ограничение максимально достижимых результатов обработки свойствами материала изделия. Дальнейшее повышение свойств поверхностного слоя можно обеспечить путем наплавки или легирования, в обоих случаях для локализации воздействия эффективно применение лазерного теплового источника.

Лазерная наплавка металлокерамических композитных слоев позволяет добиться рекордных показателей твердости и износостойкости [10, 11], но вносит существенное изменение в геометрию изделия и требует применения больших объемов дорогостоящих присадочных материалов. В то же время получить поверхностный композитный слой системы сталь-карбид вольфрама можно без использования порошка для формирования матрицы, используя процесс, родственный легированию, а именно: путем введения армирующих частиц непосредственно в ванну расплава на поверхности изделия. В частности, показана возможность упрочнения путем применения плазменно-порошковой [12, 13] и лазерно-порошковой [14, 15] обработки стальных деталей.

Как показано в работе [15], лазерно-порошковая обработка позволяет получить композитный слой со сферическими частицами WC. Наиболее рационально использование частиц диаметром 90–150 мкм. Однако, в отличие от процессов наплавки, при этом типе обработки требуется, чтобы лазерное излучение в первую очередь использовалось для расплавления металла подложки. При этом развитие процесса испарения металла нежелательно, так как может привести к затруднению введения порошка [16]. Избыточный нагрев может оплавливать или даже разрушать частицы порошка, что снизит его роль как армирующего компонента композитного слоя, а также может привести к изменению химического состава стали [17].

is not enough to achieve the most effective cycle of their operation.

The use of laser processing allows to achieve a higher steel hardness due to the grinding of the martensitic structure, however, when applied, the depth of the treated layer is relatively small (up to 1.5 mm when processing without melting the surface) [8], and to achieve high performance, special optical systems are required and high-power lasers [9].

A common disadvantage of all these methods is the limitation of the maximum attainable processing results by the material properties of the product. A further increase in the properties of the surface layer can be achieved by surfacing or doping, in both cases the application of a laser heat source is effective for localizing the impact.

Laser surfacing of metal-ceramic composite layers allows achieving record-breaking indicators of hardness and wear resistance [10, 11], but makes a significant change in the product geometry and requires the use of large volumes of expensive filler materials. At the same time, the surface composite layer of the steel-tungsten carbide system can be obtained without using powder to form a matrix using a process related to doping, namely, by introducing reinforcing particles directly into the molten bath on the surface of the product. In particular, the possibility of hardening by using plasma-powder [12, 13] and laser-powder [14, 15] processing of steel parts was shown.

As shown in [15], laser-powder processing makes it possible to obtain a composite layer with spherical WC particles. The most rational use of particles with a diameter of 90–150 microns. However, unlike the processes of surfacing, while the processing requires that laser radiation is primarily used to melt the substrate metal. At the same time, the development of the metal evaporation process is undesirable, since it can lead to difficulty in the introduction of powder [16]. Excessive heating can melt or even destroy powder particles, which will reduce its role as a reinforcing component of the composite layer, and can also lead to changes in the chemical composition of the steel [17].

Thus, when developing the technology of laser-powder modification of the surface in order to form a composite layer of steel-tungsten carbide, it is necessary to evaluate the decrease in the intensity of laser radiation during the passage of the gas-powder flow. Moreover, it is necessary to evaluate the heating of the particles, as well as determine the possibility of changing the chemical composition of the steel matrix.

In this work, steel of grade 2 according to GOST 398–2010 was used as the matrix material, and spherical tungsten monocarbide powder containing particles

Таким образом, при разработке технологии лазерно-порошковой модификации поверхности с целью формирования композитного слоя сталь-карбид вольфрама необходимо оценить снижение интенсивности лазерного излучения при прохождении газопорошкового потока. Кроме этого, следует оценить нагрев частиц, а также определить возможность изменения химического состава стальной матрицы.

В данной работе в качестве материала матрицы использовалась сталь марки 2 по ГОСТ 398-2010, в качестве армирующих частиц – сферический порошок монокарбида вольфрама, содержащий частицы диаметром от 50 до 200 мкм с преобладающей фракцией около 100 мкм. Для экспериментальных исследований использовался роботизированный технологический комплекс на основе волоконного лазера ЛС-5 производства ООО «НТО ИРЭ-Полюс», генерирующий непрерывное лазерное излучение мощностью до 5 кВт на длине волны 1070 нм. Подача порошка осуществлялась соосно с использованием технологической оптической головки для лазерной наплавки и питателя, обеспечивающего непрерывное поступление порошка в потоке транспортирующего газа (аргона). Взаимное расположение лазерного луча и порошкового потока представлено на рис. 1.

Поток частиц, проходящий через область распространения лазерного луча, должен оказывать воздействие на интенсивность излучения, попадающего на стальную подложку.

При оценочном расчете доли излучения, проходящей через порошковый поток, можно использовать следующие допущения:

- частицы попадают под действия лазерного излучения только на завершающем участке пути, вблизи фокуса пятна порошка;
- в пределах завершающего участка пути диаметр лазерного луча и диаметр потока порошка можно считать постоянными, и, с учетом оптимизации расхода последнего, равными;
- распределение плотности мощности по поперечному сечению лазерного луча в той же зоне можно считать равномерным;
- порошковый поток состоит из частиц одного диаметра, движущихся с одинаковой скоростью.

Поскольку диаметр порошинок (минимальная фракция 50 мкм) существенно больше длины волны излучения волоконного лазера (1,07 мкм), коэффициент затухания в области, содержащей частицы, можно рассчитать по методике, предложенной

with a diameter of 50 to 200 microns with a predominant fraction of about 100 microns was used as reinforcing particles. For experimental studies, a robotic technological complex based on LS-5 fibre laser (NTO IRE-Polyus LLC) was used, which generates continuous laser radiation with a power of up to 5 kW at a wavelength of 1070 nm. The powder was supplied coaxially with the use of a technological optical head for laser surfacing and a feeder, ensuring continuous flow of the powder in a stream of carrier gas (argon). The mutual arrangement of the laser beam and the powder flow is shown in Fig. 1.

The particle flux passing through the area of propagation of the laser beam should affect the intensity of the radiation falling on the steel substrate.

When estimating the fraction of radiation passing through a powder stream, the following assumptions can be used:

- particles are affected by laser radiation only on the final part of the path, near the focus of the powder spot;
- within the final section of the path, the diameter of the laser beam and the diameter of the powder flow can be considered constant, and, taking into account the optimization of the flow rate of the latter, equal;
- distribution of power density over the cross section of the laser beam in the same zone can be considered uniform;

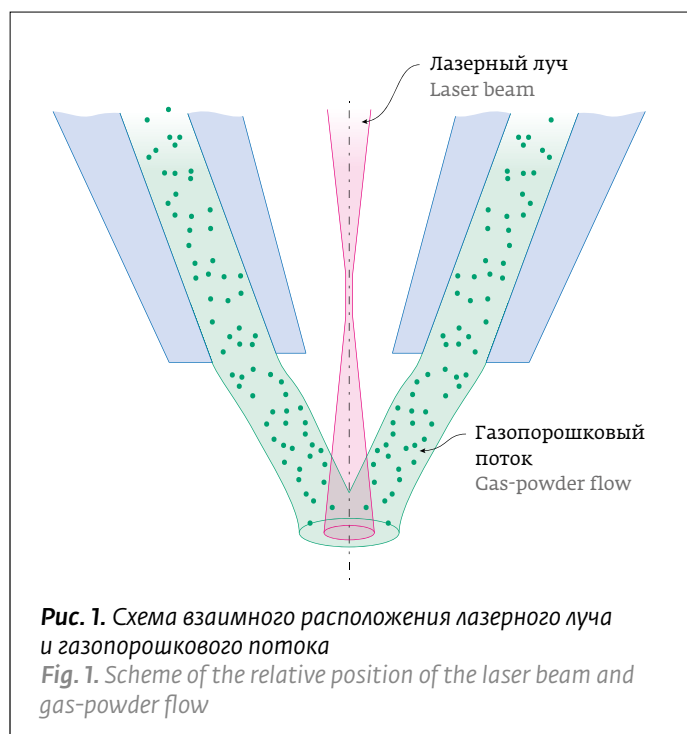


Рис. 1. Схема взаимного расположения лазерного луча и газопорошкового потока

Fig. 1. Scheme of the relative position of the laser beam and gas-powder flow

и изученной в работах [18-19], для коэффициента затухания запишем выражение (1):

$$k_{\lambda} = \frac{3\rho_{\text{fWC}}}{2(1-\rho_{\text{fWC}})d_{\text{WC}}}, \quad (1)$$

где k_{λ} - коэффициент затухания излучения, м^{-1} ;
 ρ_{fWC} - относительная плотность содержания непрозрачных частиц в области распространения луча;

d_{WC} - диаметр частиц карбида вольфрама, м.

Формула учитывает потери излучения на поглощение и рассеяние на частицах и позволяет оценить падение интенсивности луча, проходящего через поток частиц.

Плотность частиц можно рассчитать из геометрических соображений. На последнем участке пути форму луча и потока порошка можно считать цилиндрическими и примерно равными по размерам на длине h_{WC} , объем области, содержащей частицы и влияющей на прохождение лазерного луча можно рассчитать по формуле (2):

$$V_i = \pi h_{\text{WC}} d_i^2, \quad (2)$$

- powder flow consists of particles of the same diameter, moving at the same speed.

Since the diameter of the powder grains (minimum fraction is $50 \mu\text{m}$) is substantially larger than the wavelength of the fibre laser radiation ($1.07 \mu\text{m}$), the attenuation coefficient in the region containing particles can be calculated by the method proposed and studied in [18-19], the following expression can be used for the attenuation coefficient (1):

$$k_{\lambda} = \frac{3\rho_{\text{fWC}}}{2(1-\rho_{\text{fWC}})d_{\text{WC}}}, \quad (1)$$

where k_{λ} is the attenuation coefficient of the radiation, m^{-1} ;

ρ_{fWC} is the relative density of the content of opaque particles in the region of propagation of the beam;

d_{WC} is the diameter of tungsten carbide particles, m.

The formula takes into account the loss of radiation due to absorption and scattering on particles and makes it possible to estimate the drop in the intensity of a beam passing through a stream of particles.



Телефон: +7 (812) 394-53-34
 Эл. почта: info@laserteh.ru
 Адрес: Санкт-Петербург,
 Коломяжский пр, д. 10

ЛАЗЕРТЕХ

www.laserteh.ru



ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНЫ И КАЧЕСТВА

Компания ООО «СП «Лазертех» предлагает широкую линейку лазерных технологических комплексов для лазерной резки, сварки, термообработки, наплавки, очистки, в т. ч. прецизионной обработки от лидера лазерной отрасли Китая - компании HGTECH. ООО «СП «Лазертех» является сертифицированным дистрибьютором и осуществляет гарантийное и постгарантийное обслуживание, ремонт, поставку запасных частей и обучение.

где V_1 – объем области распространения луча, содержащего частицы карбида вольфрама, м^3 ;
 h_{WC} – длина пути частицы через обучаемый участок, в данном расчете на основе экспериментальных данных принимается равной 0,002 м.
 d_1 – диаметр лазерного луча, в данном расчете составляет 0,003 м.

Допустим, что все порошинки WC имеют равный диаметр 100 мкм, тогда объем, занимаемый ими в исследуемой области, зависит от их количества, которое в свою очередь зависит от массового расхода порошка и скорости движения отдельных порошинок. Относительная плотность частиц может быть определена по формуле (3):

$$\rho_{\text{fWC}} = \frac{V_n}{V_1} = \frac{M_{\text{WC}}}{\pi v_{\text{WC}} d_1^2 \gamma_{\text{WC}}}, \quad (3)$$

где M_{WC} – массовый расход порошка, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$.

v_{WC} – средняя скорость движения частиц, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$,

γ_{WC} – плотность порошка карбида вольфрама, составляет $15670 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Интенсивность лазерного излучения, распространяющегося в среде с коэффициентом затухания k_λ , определяется по формуле (4):

$$I_1 = I_0 e^{-k_\lambda h_{\text{WC}}}, \quad (4)$$

где I_0 – плотность мощности лазерного излучения, выходящего из оптической системы, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$;

I_1 – плотность мощности лазерного излучения, попадающего на подложку, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

На основе выражений (1) – (4) для доли излучения, достигающей подложки, можно записать выражение (5):

$$\delta_1 = \exp \left[- \frac{6 M_{\text{WC}} h_{\text{WC}}}{\left(1 - \frac{4 M_{\text{WC}}}{\pi v_{\text{WC}} d_1^2 \gamma_{\text{WC}}} \right) \cdot d_{\text{WC}} \pi v_{\text{WC}} d_1^2 \gamma_{\text{WC}}} \right]. \quad (5)$$

Результаты расчета по формуле (4) для массовых расходов в интервале от 0,005 до 0,05 $\text{кг} \cdot \text{мин}^{-1}$ и скоростей движения частиц от 5 до 10 $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ представлены на рис. 2.

Из графиков видно, что доля излучения, достигшего подложки, составляет от 0,90 до 0,99 при практически реализуемых параметрах подачи порошка. Полученные результаты качественно согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [20] для аналогичной технологической установки. Поскольку количество вводимой энергии влияет на объем ванны расплава, следует корректировать режим лазерной обработки в зависимости от пара-

Particle density can be calculated from geometrical considerations. In the last section of the path, the shape of the beam and the powder flow can be considered cylindrical and approximately equal in size over the length of h_{WC} , the volume of the region containing particles and affecting the passage of the laser beam can be calculated using formula (2):

$$V_1 = \pi h_{\text{WC}} d_1^2, \quad (2)$$

where V_1 is the volume of the propagation region of the beam containing tungsten carbide particles, м^3 ;

h_{WC} is the path length of a particle through the learning site, it is assumed to be 0.002 m in this calculation based on the experimental data; d_1 is the diameter of the laser beam, it is 0.003 m in this calculation.

Suppose that all WC powder grains have an equal diameter of 100 μm , then the volume occupied by them in the studied area depends on their quantity, which in turn depends on the mass flow of powder and the speed of movement of individual powder particles. The relative density of particles can be determined by the formula (3):

$$\rho_{\text{fWC}} = \frac{V_n}{V_1} = \frac{M_{\text{WC}}}{\pi v_{\text{WC}} d_1^2 \gamma_{\text{WC}}}, \quad (3)$$

where M_{WC} is the mass flow rate of the powder, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$;

v_{WC} is the average particle velocity, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

γ_{WC} is the density of tungsten carbide powder, which is $15670 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

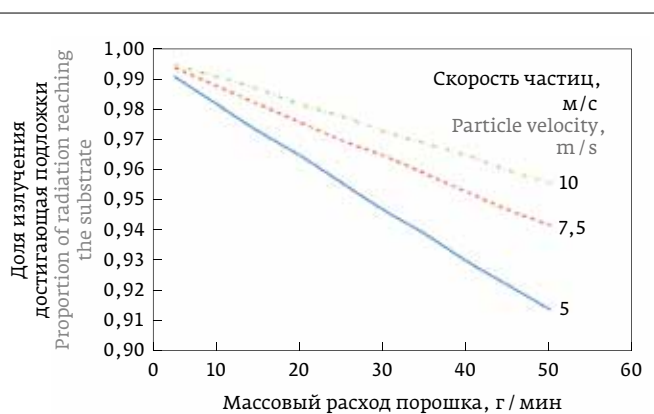


Рис. 2. Зависимость доли излучения, достигающей подложки, от параметров подачи порошка

Fig. 2. Dependence of the fraction of radiation reaching the substrate on the powder feed parameters

метров подачи порошка. При сохранении мощности лазерного излучения на одном уровне с ростом подачи порошка следует ожидать уменьшения объема ванны расплава и уменьшения глубины обрабатываемого слоя.

Расчеты нагрева частиц под действием лазерного излучения показали, что их температура зависит от размера частицы, причем для порошинок минимального и максимального размера, присутствующих в выбранном присадочном материале, могут реализовываться принципиально различные сценарии. В частности, частицы диаметром более 100 мкм могут попадать в расплав, имея температуру ниже температуры плавления стали, благодаря чему они потенциально могут стать центрами кристаллизации. Частицы диаметром менее 60 мкм могут претерпевать оплавление. Из работы [21] известно, что при высоких температурах возможна диффузия вольфрама в сталь, что приводит к изменению свойств последней.

На рис. 3 приведены результаты измерения содержания железа и вольфрама вблизи частицы WC в упрочненном слое на электронном микроскопе методом ЭДС.

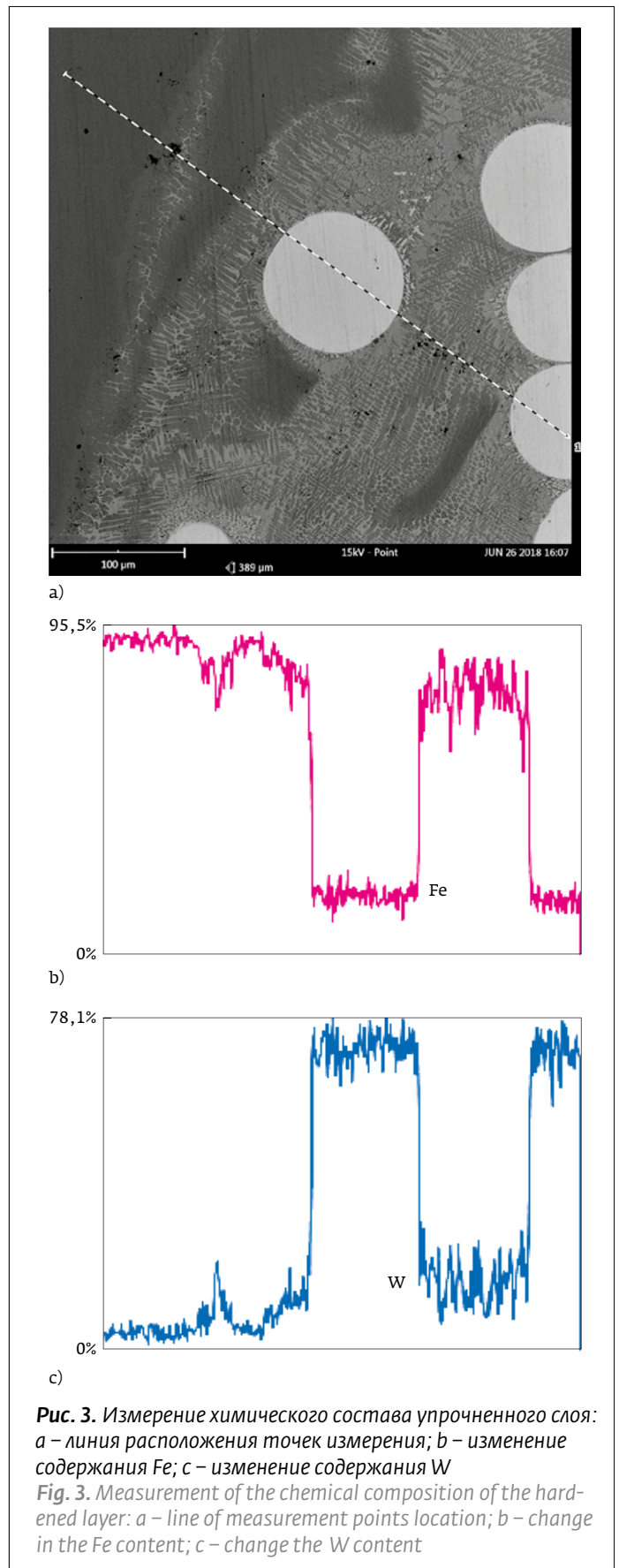
Наблюдается присутствие этого элемента в стальной матрице, что приводит к неоднородности ее свойств.

Таким образом, лазерная модификация поверхности бандажной стали карбидом вольфрама может быть реализована на режимах, обеспечивающих неполное плавление порошка и диффузию вольфрама в стальную матрицу. При этих условиях повышаются механические свойства поверхности и износостойкость, как показано в работе [15].

Выводы

1. Газопорошковый поток, используемый для введения частиц WC в поверхностный слой при лазерной обработке, снижает интенсивность проходящего излучения на величину до 10%, что следует учитывать при оптимизации параметров режима;
2. Нагрев порошка лазерным излучением вызывает интенсификацию диффузии вольфрама, в первую очередь – из небольших частиц, в стальную матрицу композитного слоя;
3. Изменение содержания вольфрама приводит к локальным изменениям свойств стали на поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-20-03230.



ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисуров А. И. *Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А. Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2008.*
Grigor'yanс A. G., SHiganov I. N., Misyurov A. I. *Tekhnologicheskie processy lazernoy obrabotki: Ucheb. posobie dlya vuzov / Pod red. A. G. Grigor'yanca. M.: Izd-vo MG TU im. N. E. Baumana. 2008.*
2. Антиповский С. В., Исакаев Э. Х., Тюфтяев А. С. и др. Плазменное упрочнение как способ увеличения ресурса колесных пар. *Локомотив. 2009; 6: 26–27.*
Antipovskij S. V., Isakaev E. H., Tyuftyaev A. S. i dr. *Plazmennoe uprochnenie kak sposob uvelicheniya resursa kolesnyh par. Lokomotiv. 2009; 6: 26–27.*
3. Тюфтяев А. С., Мордынский В. Б., Желобцов Е. А. и др. Влияние параметров поверхностной плазменной обработки стали 60Г на трибологические характеристики упрочненного слоя – Справочник. *Инженерный журнал. 2014; 11: 6–12.*
Tyuftyaev A. S., Mordynskij V. B., ZHelobcov E. A. i dr. *Vliyaniye parametrov poverhnostnoy plazmennoy obrabotki stali 60G na tribologicheskie harakteristiki uprochnennogo sloya – Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. 2014; 11: 6–12.*
4. Лыков А. М., Маслов В. Э., Глибина Л. А. Плазменное упрочнение гребней локомотивных и вагонных колес. *Вестник ВНИИЖТ. 2005; 1: 31–33.*
Lykov A. M., Maslov V. E., Glibina L. A. *Plazmennoe uprochnenie grebnej lokomotivnyh i vagonnyh koles. Vestnik VNIIZHT. 2005; 1: 31–33.*
5. Korotkov A. V., Zloказov M. V. Studying Wear Resistance of Carbon Steels Strengthened by Plasma Hardening. *Journal of Friction and Wear. 2014; 35(2): 133–136.*
6. Петров С. Ю., Рябов А. А., Костюкевич А. И. Упрочнение гребней и снижение износа колесных пар. *Мир транспорта. 2013; 2: 62–69.*
Petrov S. YU., Ryabov A. A., Kostyukevich A. I. *Uprochnenie grebnej i snizheniye iznosa kolesnyh par. Mir transporta. 2013; 2: 62–69.*
7. Соломин А. П., Гончарова Д. С., Балагура А. С. Повышение эксплуатационного ресурса колесных пар локомотивов. *Вестник института тяги и подвижного состава. 2016; 12:75–77.*
Solomin A. P., Goncharova D. S., Balagura A. S. *Povysheniye ekspluatatsionnogo resursa kolesnyh par lokomotivov. Vestnik instituta tyagi i podvizhnogo sostava. 2016; 12:75–77.*
8. Богданов А. В., Грезев Н. В., Шмелев С. А. Применение волоконных лазеров для повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колес. *Научные технологии в машиностроении. 2015; 6: 30–34.*
Bogdanov A. V., Grezev N. V., SHmelev S. A. *Primeneniye volokonnyh lazerov dlya povysheniya iznosostojkosti i kontaktno-ustalostnoy prochnosti zheleznodorozhnyh koles. Nauchnoye tekhnologii v mashinostroyeni. 2015; 6: 30–34.*
9. Богданов А. В., Соколов В. И., Шмелев С. А. Выбор оптимальных конфигураций оптических систем для задачи лазерной термообработки стальных изделий. *Научные технологии в машиностроении. 2017; 10: 30–34.*
Bogdanov A. V., Sokolov V. I., SHmelev S. A. *Vybor optimal'nyh konfiguracij opticheskikh sistem dlya zadachi lazernoy termoobrabotki stal'nyh izdelij. Nauchnoye tekhnologii v mashinostroyeni. 2017; 10: 30–34.*
10. Григорьянц А. Г., Ставертий А. Я., Базалева К. О., Юдина Т. Ю., Смирнова Н. А., Третьяков Р. С., Мисуров А. И. Лазерная наплавка композиционных износостойких покрытий на никелевой основе, армированных карбидом вольфрама. *Сварочное производство. 2016; 1: 10–15.*
Grigor'yanс A. G., Stavertij A. YA., Bazaleeva K. O., YUdina T. YU., Smirnova N. A., Tre't'yakov R. S., Misyurov A. I. *Lazernaya naplavka kompozitsionnyh iznosostojkikh pokrytij na nikel'evoy osnove, armirovannyh karbidom vol'frama. Svarochnoe proizvodstvo. 2016; 1: 10–15.*
11. Sahour M. C., Bahloul A., Vannes A. B. Characteristics of the laser clad metal made with powder mixture of Ni-based alloy and tungsten carbide. *International Journal of Material Forming. 2008; 1(1): 1379–1382.*
12. Minhai Zhao, Aiguo Liu, Mianhuan Guo, Dejian Liu, Zhijian Wang, Changbai Wang. WC reinforced surface metal matrix composite produced by plasma melt injection. *Surface and Coatings Technology. 2006; 201(3–4): 1655–1659.*
13. Yi-ming Zhong, Xiao-dong Du, Gang Wu. Effect of Powder-Feeding Modes During Plasma Spray on the Properties of Tungsten Carbide Composite Coatings. *Journal of Materials Engineering and Performance. 2017; 26(5): 2285–2292.*
14. Do Nascimento A. M., Ocelik V., Ierardi M. C. F., De Hosson J. Th. M. Wear resistance of WCp / Duplex Stainless Steel metal matrix composite layers prepared by laser melt injection – *Surface and Coatings Technology. 2008; 202(19): 4758–4765.*
15. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Третьяков Р. С., Мисуров А. И., Смирнова Н. А., Асютин Р. Д., Пересторонин А. В., Усов С. В. Особенности формирования поверхностного композиционного слоя методом лазерно-порошкового введения частиц монокарбида вольфрама в матрицу из углеродистой стали. *Сварочное производство. 2018; 10: 25–29.*
Grigor'yanс A. G., SHiganov I. N., Tre't'yakov R. S., Misyurov A. I., Smirnova N. A., Asyutin R. D., Perestoronin A. V., Usov S. V. *Osobennosti formirovaniya poverhnostnogo*

The intensity of laser radiation propagating in a medium with a damping coefficient k_λ is determined by formula (4):

$$I_l = I_0 e^{-k_\lambda h_{wc}}, \quad (4)$$

where I_0 is the power density of the laser radiation emerging from the optical system, $W \cdot m^{-2}$; I_l is the power density of the laser radiation incident on the substrate, $W \cdot m^2$.

Based on expressions (1) – (4) for the fraction of radiation reaching the substrate, we can write down the expression (5):

$$\delta_l = \exp \left[- \frac{6M_{wc} h_{wc}}{\left(1 - \frac{4M_{wc}}{\pi v_{wc} d_l^2 \gamma_{wc}} \right) \cdot d_{wc} \pi v_{wc} d_l^2 \gamma_{wc}} \right]. \quad (5)$$

The results of the calculation by formula (4) for mass flow rates in the range from 0.005 to 0.05 $kg \cdot min^{-1}$ and particle speeds from 5 to 10 $m \cdot s^{-1}$ are presented in Fig. 2

From the graphs it can be seen that the proportion of radiation reaching the substrate is from 0.90 to 0.99 with practically implementable powder supply parameters. The results obtained are in qualitative agreement with the experimental data presented in [20] for a similar process installation. Since the amount of energy input affects the volume of the molten bath, the laser treatment should be adjusted depending on the powder feed parameters. While maintaining the laser power at the same level, with an increase in the powder feed, a decrease in the volume of the molten bath and a decrease in the depth of the treated layer should be expected.

Calculations of the heating of particles under the action of laser radiation showed that their temperature depends on the size of the particles, and fundamentally different scenarios can be realized for powder particles of the minimum and maximum size present in the selected filler material. In particular, particles with a diameter of more than 100 μm can ingress into the melt, having a temperature below the melting point of steel, due to which they can potentially become crystallization grains. Particles less than 60 μm in diameter may partially melt. It is known from [21] that at high temperatures tungsten diffusion into steel is possible, which leads to a change in the properties of the latter.

Fig. 3 shows the results of measuring the content of iron and tungsten near the WC particle in the hardened



kompozicionnogo sloya metodom lazerno-poroshkovogo wvedeniya chastic monokarbida vol'frama v matricu iz uglerodistoj stali. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2018; 10: 25–29.

16. **Шиганов И. Н., Самарин П. Е.** Моделирование процесса формирования на поверхности алюминиевых сплавов композиционного покрытия с частицами SiC мощным лазерным излучением. *Сварочное производство*. 2015; 5: 31–34.
Shiganov I. N., Samarin P. E. Modelirovanie processa formirovaniya na poverhnosti alyuminievykh splavov kompozicionnogo pokrytiya s chasticami SiC moshchnym lazernym izlucheniem. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2015; 5: 31–34.
17. **Babu S. S., David S. A, Martukanitz R. P., Parks K. D.** Toward Prediction of Microstructural Evolution during Laser Surface Alloying. *Metallurgical and Material Transactions A*. 2002; 33(4): 1189–1200.
18. **Гусаров А. В.** Перенос излучения в слоях металлических порошков при лазерном формировании. *Квантовая электроника*. 2010; 40(5): 451–459.
Gusarov A. V. Perenos izlucheniya v sloyah metallicheskikh poroshkov pri lazernom formirovani. *Kvantovaya elektronika*. 2010; 40(5): 451–459.
19. **Гусаров А. В.** Homogenization of radiation transfer in two-phase media with irregular phase boundaries. *Physical Review*. 2008; B77: 144201.
20. **Дренин А. А.** Исследование взаимодействия газопорошкового потока с лазерным излучением при коаксиальной подаче порошковых материалов с различной формой и размерами частиц в процессе лазерной наплавки. *Молодежный научно-технический вестник: электрон. издание, Эл. № ФС77-51038*. 2014. № 05. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/721953.html>.
Drenin A. A. Issledovanie vzaimodejstviya gazoporoshkovogo potoka s lazernym izlucheniem pri koaksial'noj podache poroshkovykh materialov s razlichnoj formoj i razmerami chastic v processe lazernoj naplavki. *Molodezhnyj nauchno-tehnicheskij vestnik: elektron. izdanie, El. № FS77-51038*. 2014. № 05. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/721953.html>.
21. **Shengfeng Zhou, Xiaoqin Dai.** Microstructure evolution of Fe-based WC composite coating prepared by laser induction hybrid rapid cladding – *Applied Surface Science*, 2010, Volume 256, Issue 24, p. 7395–7399.

layer on an electron microscope using the EDS method. The presence of this element in the steel matrix is observed, which leads to the heterogeneity of its properties. Thus, laser modification of the surface of the banding steel with tungsten carbide can be implemented in modes that provide incomplete melting of the powder and diffusion of tungsten into the steel matrix. Under these conditions, mechanical surface properties and wear resistance increase, as shown in [15].

CONCLUSIONS

1. Gas-powder flow, used to introduce WC particles into the surface layer during laser processing, reduces the intensity of the transmitted radiation by up to 10%, which should be taken into account when optimizing the mode parameters;
2. Heating the powder with laser radiation causes an intensification of the diffusion of tungsten, first of all from small particles, into the steel matrix of the composite layer;
3. Changing the content of tungsten leads to local changes in the surface properties of steel.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 17-20-03230.

ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ
"РАПИД"

ЛАЗЕРНЫЕ РАСКРОЙНЫЕ СТАНКИ С ВОЛОКОННЫМИ ЛАЗЕРАМИ ИРГ

ДЛИННОМЕРНЫЕ И КРУПНОФОРМАТНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СТАНКИ

ЛАЗЕРНЫЕ СТАНКИ С ВОЛОКОННЫМИ ЛАЗЕРАМИ ИРГ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РАСКРОЯ ТОНКОИСТОЙКОЙ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

ЛАЗЕРНЫЕ РАСКРОЙНЫЕ КОМПЛЕКСЫ С МОЩНЫМИ СО2-ЛАЗЕРАМИ "ROFIN-SINAR"

ЛАЗЕРНЫЕ СТАНКИ С СО2-ЛАЗЕРАМИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РЕКЛАМНОГО, ШВЕЙНОГО, МЕБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

СКОРОСТНЫЕ СТАНКИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ "РАПИД Плазма"

КООРДИНАТНЫЕ СТОЛЫ С ЧПУ ПОЗИЦИОНЕРЫ

КРУПНОФОРМАТНЫЕ ПЛАНШЕТНЫЕ ПЛОТТЕРЫ, ГРАФОПОСТРОИТЕЛИ, КООРДИНАТОГРАФЫ

- ✓ 12 лет на рынке
- ✓ Простота, надежность, ресурс
- ✓ Комплектующие лучших мировых производителей
- ✓ Поддержка изготовителя на протяжении всей жизни станка

394033 г. Воронеж, ул. Иппоциппа, дом 3

Телефон: +7 (903) 651-67-49
 Тел./факс: +7 (473) 241-94-50
 Email: nprapid@yandex.ru
 http:// www.npk-rapid.ru