

DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-5
УДК 669.2

© Ригин А.Н., Журавлева Ю.М., Шестаков Н.И.,
Запатрина Н.В., Славов В.И., 2018

Ригин Александр Николаевич

Кандидат экономических наук, доцент,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: pte@chsu.ru

Rigin Alexandr Nikolaevich

PhD in economic sciences, Associate professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: pte@chsu.ru

Журавлева Юлия Михайловна

Аспирант,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: ZhuravlevaJM@chsu.ru

Zhuravleva Julia Mikhailovna

Post-graduate student,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: ZhuravlevaJM@chsu.ru

Шестаков Николай Иванович

Доктор технических наук, профессор,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: ShestakovNI@chsu.ru

Shestakov Nikolay Ivanovich

Doctor of Technical Sciences, professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: ShestakovNI@chsu.ru

Запатрина Наталия Владимировна

Кандидат технических наук, доцент,
Череповецкое высшее военное инженерное
училище радиоэлектроники
(Череповец, Россия)
E-mail: z_natalia777@mail.ru

Zapatrina Natalia Vladimirovna

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Cherepovets Higher Military School of
Engineering and Radioelectronics
(Cherepovets, Russia)
E-mail: z_natalia777@mail.ru

Славов Владимир Ионович

Доктор технических наук, профессор,
Череповецкое высшее военное инженерное
училище радиоэлектроники
(Череповец, Россия)
E-mail: vislavov@yandex.ru

Slavov Vladimir Ionovich

Doctor of Technical Sciences, professor,
Cherepovets Higher Military School of
Engineering and Radioelectronics
(Cherepovets, Russia)
E-mail: vislavov@yandex.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА
И СПОСОБА НАНЕСЕНИЯ
ПОКРЫТИЙ С
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ
ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ**

**MODELING DEVICE
AND METHOD OF APPLYING
COATINGS WITH PRELIMINARY
INDUCTION HEATING**

Аннотация. Для повышения стойкости деталей к износу, коррозии наносят на их поверхность покрытие с последующим оплавлением. Разработано устройство и выполнено описание процесса нанесения покрытия, которое включает в себя подготовку и активацию поверхности; нанесение адгезионного покрытия напылением; нанесение суспензии, содержащей связующее, флюсующие и леги-

Abstract. The surface of the parts is coated and then reflowed to increase the resistance of the parts to wear or corrosion. A device has been designed and a description of the coating process which includes the preparation and activation of the surface has been made. The process includes application of an adhesive coating by spraying; applying a slurry containing binder, fluxing and alloying elements; laser reflow coating with

рующие элементы; лазерное оплавление покрытия с предварительным высокочастотным индукционным подогревом. В результате повышается качество покрытий, увеличивается толщина оплавленного слоя, повышается энергоэффективность процесса.

preliminary high-frequency induction heating. As a result, the quality of coatings increases, the thickness of the melted layer increases, and the energy efficiency of the process increases.

Ключевые слова: лазер, оплавление, газотермическое напыление, индукционный нагрев, автоматизированное управление

Keywords: laser, surfacing, gas-thermal spraying, induction heating, automated control

Введение

В металлургии и машиностроении часто возникает необходимость защиты деталей от износа, коррозии, окисления, высоких температур. Использование защитных покрытий позволяет увеличить эксплуатационный ресурс, снизить ремонтные затраты и простои оборудования, обеспечить ресурсосбережение. В настоящее время задача нанесения покрытий с металлической связью с основой решается различными методами наплавки. Свойства наплавленного слоя и основного металла зависят от глубины проплавления материала основы и физико-химических процессов, протекающих непосредственно в плакирующем металле [3].

Известны механизированные способы электродуговой наплавки с использованием электродов, проволоки, лент, из которых формируется слой легированного наплавленного металла на поверхности детали. Общим недостатком данных способов наплавки являются: низкая производительность, тяжелые условия труда, низкое качество и неравномерность наплавленного слоя, окисление материала покрытия и выгорание легирующих элементов [2]. Так, в современной промышленности электроискровая наплавка металлокерамических покрытий осуществляется только ручным способом, так как при автоматизации проявляются существенные недостатки в виде недостаточной сплошности покрытия либо сложности и больших габаритов конструкции и т.д. [1]

Для повышения качества покрытия и коэффициента использования материала, а также уменьшения зоны термического влияния используют способы напыления покрытия с последующим оплавлением. Оплавление может осуществляться различными методами. Известны способы оплавления лазерным излучением покрытий, напыленных газотермическими методами [4]. Преимуществом способа является минимальная зона термического влияния; при этом можно добиться такого состояния поверхности, при котором последующая механическая обработка минимальна. Однако использование лазерного оплавления для образования качественного покрытия с металлической связью возможно только при малой толщине покрытия (примерно до 0,5 мм).

С учетом преимуществ лазерного оплавления покрытий актуально совершенствование данного метода для преодоления данных недостатков и ограничений, увеличения толщины покрытий и повышения их качества.

Основная часть

При нанесении покрытий лазерным оплавлением необходимо решить такие технические задачи, как: снижение неравномерности поверхности и повышение качества покрытия, увеличение толщины оплавленного слоя, предотвращение холодного и горячего растрескивания, повышение энергоэффективности процесса. Решение данных задач достигается использованием при лазерном оплавлении предварительного

индукционного нагрева и автоматизированного управления для контроля и регулирования процессов оплавления и кристаллизации покрытия.

Первоначально следует подготовить и активировать поверхность. Для этого с поверхности детали удаляют оксиды, органические, масляные и другие загрязнения при помощи растворителей, механически либо другими способами. Создаваемая при этом поверхность позволяет образовать прочный адгезионный контакт при последующем нанесении покрытий напылением либо другими методами.

Далее происходит нанесение покрытия газотермическим напылением, гальваническим или химическим осаждением либо другим способом, при котором образуется адгезионная связь с поверхностью детали, и в дальнейшем при оплавлении может быть получена металлическая связь. Толщина покрытия под последующее оплавление, как правило, составляет до 3 мм. После нанесения покрытия осуществляется контроль качества визуально либо с применением средств неразрушающего контроля с целью выявления и исправления дефектов: сколов, вздутий, отслоений, трещин, а также контроля равномерности и толщины покрытия. Для напыления покрытия, как правило, используются порошковые и проволоочные материалы на основе сплавов Fe, Ni, Co, Cr и др.

После этого выполняют нанесение на поверхность детали с покрытием суспензии, содержащей связующее, флюсующие и легирующие элементы. Состав суспензии подбирается в зависимости от материала и требований к покрытию; типичная толщина слоя составляет от 25 до 250 мкм.

Далее лазером оплавляют покрытия с предварительным высокочастотным индукционным подогревом до температуры от 300 до 1300 °С. Оплавление выполняется лазером при удельной мощности воздействия лазерного излучения $1 - 9 \times 10^5$ Вт/см². Оплавление металла основы и образование металлической связи детали с покрытием в этом случае протекает в узкой области на границе их раздела. Режимы предварительного индукционного нагрева и лазерного оплавления подбираются таким образом, чтобы минимизировать тепловложение.

Конечные свойства закаленной зоны зависят от скорости и температуры нагрева, времени выдержки в нагретом состоянии, от закона охлаждения, а также от исходной структуры (т.е. предварительной термообработки и механообработки). Максимальная глубина закалки без нарушения геометрии изделия получается в том случае, если температура на поверхности металла доходит до температуры плавления $T_{пл}$. Для этого интенсивность теплового источника должна составлять:

$$q_{пл}^{эф} = T_{пл} \lambda \left(\frac{\pi}{4at} \right)^{1/2},$$

где $T_{пл}$ – температуры плавления, λ – теплопроводность, a – температуропроводность ($a = \frac{\lambda}{\rho c}$, ρ – плотность, c – удельная теплоемкость), t – время выдержки.

Считая, что закалка происходит во всей области, где температура материала выше температуры закалки $T_{зак}$ (температуры фазового перехода с учетом сдвига критической точки), можно определить максимально достижимую глубину закалки на оси пучка без оплавления поверхности:

$$z_{зак} = \left(\frac{4at}{\pi} \right)^{1/2} - \frac{\lambda T_{зак}}{q_{пл}^{эф}} = \left(\frac{4at}{\pi} \right)^{1/2} \frac{T_{пл} - T_{зак}}{T_{пл}}.$$

Отсюда видно, что для каждого конкретного металла со своими конкретными теплофизическими константами определяющим фактором глубины закалки является время действия источника тепла.

Изменение твердости обрабатываемой поверхности в зависимости от температуры закалки представлено на рис. 1. С повышением нагрева в области более низких температур твердость возрастает из-за растворения комплексных карбидов (повышается легированность аустенита и насыщенность его углеродом), а после более высокого нагрева снижается из-за роста зерна и напряжений. Максимальное упрочнение в исследуемой стали достигается после отпуска на 500 °С. Кроме того, прочность возрастает с повышением температуры закалки благодаря упрочняющему влиянию дисперсных карбидов, выделяющихся при отпуске.

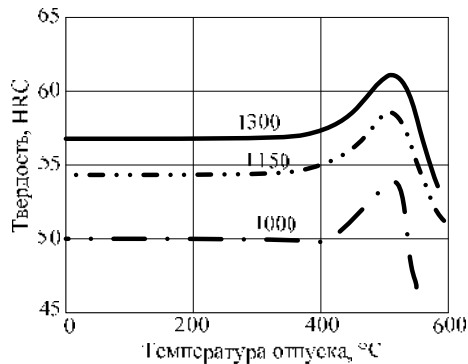


Рис. 1. Влияние температуры закалки на твердость поверхности

Применение термической обработки с оплавлением поверхности позволяет существенно увеличить глубину упрочненного слоя и степень упрочнения.

На рис. 2 представлена общая схема устройства лазерного оплавления с индукционным нагревом, установленного на базе станка с числовым программным управлением (ЧПУ). На рис. 3 – узел индуктора и фокусирующей оптической системы в процессе обработке детали.

Устройство лазерного оплавления с предварительным управляемым индукционным нагревом состоит из фокусирующей оптической системы – 1, пирометра – 2, индуктора – 3, блока согласования генератора с нагрузкой – 4, которые установлены на консоли – 6 каретки – 7 станка с числовым программным управлением – 8.

Деталь 9 устанавливается в центрах станка с ЧПУ 8, которые обеспечивают ее закрепление и вращение. Для деталей – тел вращения (валы, ролики, плунжеры и т.п.) процесс оплавления поверхности может осуществляется по винтовой линии. Управление скоростью и точным позиционированием детали 9 и каретки 7 осуществляется при помощи сервоприводов 10 станка с ЧПУ, управляющий контроллер которого поддерживает протокол взаимодействия устройств электронной автоматики и имеет соответствующее коммуникационное устройство.

Для получения максимального коэффициента полезного действия расстояние между деталью 9 и рабочей поверхностью индуктора 3 минимизируется; для повышения концентрации энергии и уменьшения магнитных потерь может быть использована насадка 13 из ферромагнитного материала.

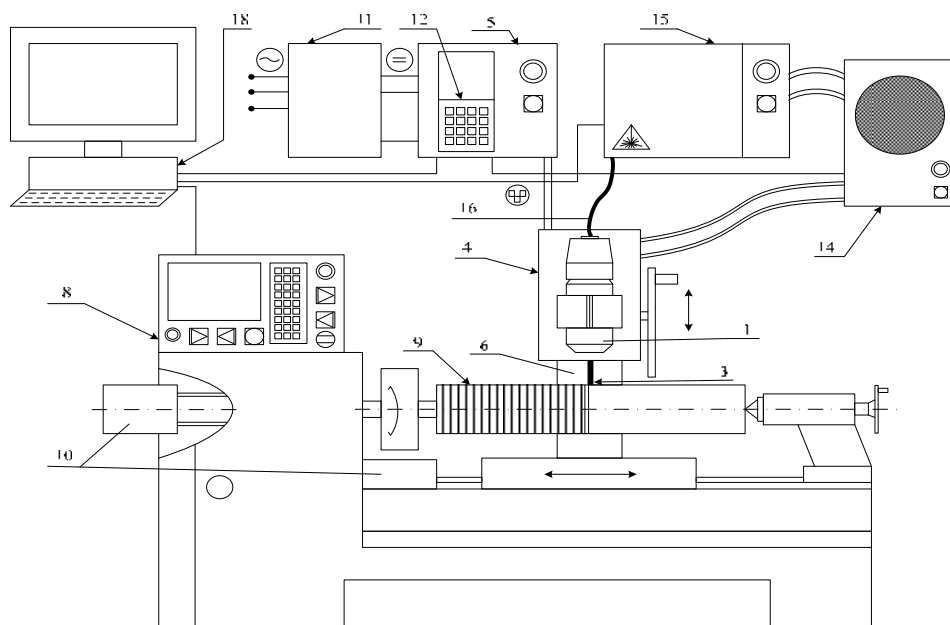


Рис. 2. Схема устройства лазерного оплавления с индукционным нагревом

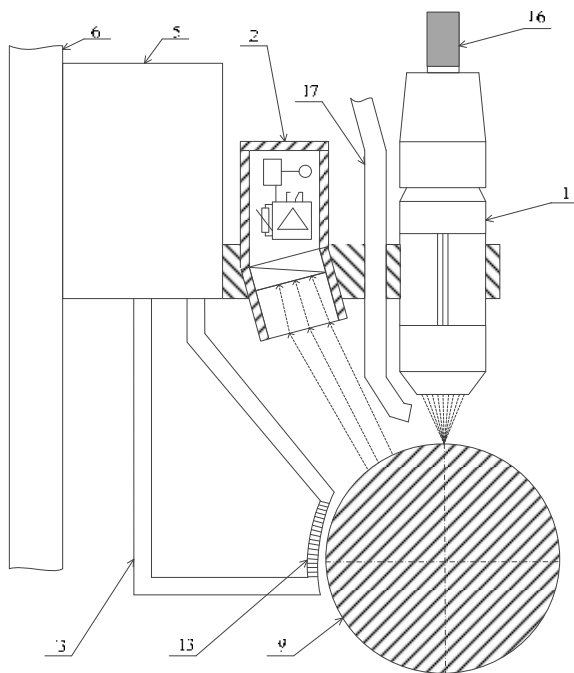


Рис. 3. Узел индуктора и фокусирующей оптической системы в процессе обработки детали

Предварительный нагрев оплаваемого покрытия осуществляется при помощи установки индукционного нагрева, состоящей из: регулируемого выпрямителя – 11, преобразующего переменное напряжение сети в постоянное и имеющего входной силовой выключатель с защитой от перегрузки; управляемого генератора высокочастотных колебаний – 5, преобразующего постоянный ток в переменный ток высокой частоты; блока согласования генератора с нагрузкой – 4; системы управления установки индукционного нагрева – 12.

Для охлаждения индуктора и силовой электроники применяется закрытая система жидкостного охлаждения – 14 с циркуляционным насосом и воздушным теплообменником.

Оплавление поверхности покрытия осуществляется при помощи диодного либо волоконного источника лазерного излучения – 15, от которого излучение передается по оптическому волоконному кабелю – 16 с коннектором на охлаждаемую фокусирующую оптическую систему – 1. При оплавлении поверхности световое пятно лазерного луча располагается позади индуктора, осуществляющего предварительный нагрев, по направлению перемещения обрабатываемой детали. Воздушное сопло – 17 обеспечивает защиту оптики.

При помощи компьютерной системы управления – 18 с установленной программой, задающей режим обработки, осуществляется общее управление устройством, в том числе рабочими операциями станка с ЧПУ; включением/выключением, управлением режимами работы установки индукционного нагрева и источником лазерного излучения. Управление мощностью индукционного генератора и источника лазерного излучения, скоростью перемещения лазерного луча по поверхности детали осуществляется на основе алгоритмов, заложенных в программе управления, в зависимости от фактической температуры предварительного нагрева поверхности детали, измеренной бесконтактным способом при помощи пирометра 2. Программа обеспечивает воспроизводимость режимов при обработке серии деталей, постоянство качества покрытия и позволяет осуществлять отслеживание основных параметров процесса, таких как: сила тока, напряжение и частота тока на индукторе, температура поверхности, мощность источника лазерного излучения, с ведением протокола обработки детали с целью предотвращения брака.

После выполнения обработки детали осуществляется выходной контроль поверхности детали и контроль соответствия технологических параметров по протоколу обработки детали, формируемому программой.

Выводы

Сокращение избыточного тепловложения, использование экономичных источников лазерного и индукционного нагрева, а также увеличение коэффициента поглощения лазерного излучения поверхностью при предварительном нагреве позволяют снизить стоимость нанесения покрытия. Минимизация тепловложения позволяет также снизить время нахождения расплава в жидкой фазе, предотвратить образование газовых каверн. Применение лазерной фокусирующей системы, обеспечивающей равномерное распределение лазерного излучения, и использование суспензии с поверхностно-активным веществом и модификаторами вязкости/текучести позволяют уменьшить воздействие термокапиллярной конвекции, предотвратить разделение расплава на отдельные капли. Это дает возможность применять более высокую удельную мощность лазерного излучения для увеличения возможной толщины оплавления и повышения производительности процесса.

Литература

1. Петров Н.А., Комков А.А., Тартаковский А.И., Шестаков Н.И., Журавлева Ю.М. Исследование температурного режима спекания, определение оптимального химического состава и геометрических параметров электрода на никелевой связке с добавками железа // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. №6. С. 33–36.
2. Хасуи А., Мorigаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
3. Шестаков Н.И., Антонова Ю.В., Лукин С.В. Математическое моделирование теплообмена при плазменной наплавке металла на поверхность роликов // Вестник Череповецкого государственного университета. 2012. Т. 1. №3. С. 14–17.
4. Pawlowski L. The science and engineering of thermal spray coatings second edition // John Wiley & Sons, 2008. 119 p.

References

1. Petrov N.A., Komkov A.A., Tartakovsky A.I., Shestakov N.I., Zhuravleva Yu.M. Issledovanie temperaturnogo rezhima spekaniia, opredelenie optimal'nogo himicheskogo sostava i geometricheskikh parametrov elektroda na nikel'voi sviazke s dobavkami zheleza [Investigation of the temperature regime of sintering, determination of the optimal chemical composition and geometric parameters of the electrode on a nickel binder with iron supplements]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 2016, no. 6, pp. 33–36.
2. Hasui A., Morigaki O. *Naplavka i napylenie* [Surfacing and spraying]. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 240 p.
3. Shestakov N.I., Antonova Yu.V., Lukin S.V. Matematicheskoe modelirovanie teploobmena pri plazmennoi naplavke metalla na poverhnost' rolikov [Mathematical modeling of heat transfer at plasma surfacing of metal on the surface of rollers]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 2012, Vol. 1, no. 3, pp. 14–17.
4. Pawlowski L. *The science and engineering of thermal spray coatings second edition*. John Wiley & Sons, 2008. 119 p.

Для цитирования: Ригин А.Н., Журавлева Ю.М., Шестаков Н.И., Запатрина Н.В., Славов В.И. Моделирование устройства и способа нанесения покрытий с предварительным индукционным нагревом // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. №2(83). С. 40–46. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-5

For citation: Rigin A.N., Zhuravleva J.M., Shestakov N.I., Zapatrina N.V., Slavov V.I. Modeling device and method of applying coatings with preliminary induction heating. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2018, no. 2 (83), pp. 40–46. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-5