

# ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ НА РАЗМЕРЫ ВАЛИКОВ И ДОБАВОК НАНОПОРОШКА ОКСИДА МЕДИ НА ЗАДИРОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ

В.П. Бирюков, А.А. Фишков

Статья посвящена определению влияния режимов лазерной наплавки на геометрические параметры наплавленных валиков и добавок нанопорошка оксида меди в шихту порошка на железной основе ФБХ6-2 на трибологические свойства наплавленных покрытий на образцы из стали 20Х. Металлографическими исследованиями определены геометрические параметры наплавленных слоев, а также глубина зоны термического влияния поверхностного слоя образцов. С помощью метода полного факторного эксперимента получены математические зависимости геометрических размеров наплавленных слоев от режимов обработки. Отклонение расчетных значений от экспериментальных данных составило не более 3 %. Применение лазерного луча, колеблющегося по нормали к вектору его продольного перемещения с фиксированной частотой 220 Гц, позволило повысить производительность лазерной наплавки в 1,3–1,9 раза в зависимости от режимов обработки. Построены двумерные зависимости (поверхности), демонстрирующие преимущества в производительности лазерной наплавки колеблющимся лучом по сравнению с обработкой расфокусированным лучом в зависимости от скорости перемещения, мощности и диаметра лазерного излучения. Показано, что введение в состав наплавочной шихты нанопорошка оксида меди в количестве 3–9 % повышает задиростойкость слоев в 1,5–2 раза и исключает трещинообразование в покрытии при оптимальном его содержании.

**Ключевые слова:** лазерная наплавка, порошки на железной основе, задиростойкость.

## INFLUENCE OF THE LASER SURFACE CLADDING MODES ON SIZES OF THE WELD BEADS AND ADDITIVES OF NANO COPPER OXIDE POWDER ON THE SCORING RESISTANCE OF COATINGS

V.P. Biryukov, A.A. Fishkov

The article is devoted to determination of the influence of the laser cladding modes on geometrical parameters of weld beads and impact of the nano copper oxide powder addition to Fe-B-Cr-6-2 powder stock on tribological properties of the coating deposited on samples of steel 20X. Geometric parameters of deposited layers and the depth of the heat affected zone (HAZ) have being studied by the metallographic method. Mathematical dependences of the geometrical sizes of the deposited layers on processing modes were developed with the method of full factorial experiment (FFE). Deviation of calculated values from experimental data is not more than 3 %. The application of the oscillation laser beam, normal to the vector of its longitudinal travel, with a fixed frequency of 220 Hz, allowed improving the performance of laser cladding in 1,3–1,9 times, depending on the processing modes. The surfaces demonstrate the advantages in the performance of the laser cladding beam oscillating in comparison with the processing of the unfocused beam depending on the speed of movement, power and the diameter of the laser radiation. It is shown that the introduction of nano copper oxide powder of the amount of 3–9 % into the surfacing charge increases the scoring resistance of the layers in 1,5–2 times and eliminates cracking in the coating at an optimal its content.

**Keywords:** laser cladding, powder on iron base, scoring resistance.

## Введение

В современном промышленном производстве применяются различные методы наплавки: электродуговая, плазменная, лазерная, наплавка токами высокой частоты (ТВЧ) и другие. В идеале наплавленный слой не должен содержать дефектов (пор, раковин, трещин) и должен иметь хорошую прочность сцепления наплавленного слоя с основой. Однако существующие методы не могут это обеспечить в полной мере, поскольку имеют свои преимущества и недостатки.

С помощью электродуговой наплавки восстанавливают детали, получившие значительные повреждения рабочих поверхностей при работе в условиях гидроабразивного изнашивания [1]. Однако после электродуговой наплавки припуск на последующую механическую обработку может достигать 2 мм, что увеличивает трудоемкость изготовления изделий. Кроме того, при электродуговой наплавке в покрытии образуется значительное число дефектов: поры, трещины, подрезы материала основы.

Применение более современных плазменных и газодинамических методов позволяет получить покрытия с пористостью 1–10 % [2]. Плазменная наплавка обеспечивает высокую прочность сцепления покрытия с основой, однако в процессе наплавки происходит значительный прогрев деталей, что приводит к их остаточным деформациям, а это недопустимо при восстановлении ответственных деталей. Высокоскоростные методы напыления, как и плазменное напыление покрытий, имеют низкую прочность сцепления с основным материалом: 80 и 40 МПа соответственно.

При лазерной наплавке происходит формирование наплавленного слоя с заданными свойствами за счет минимального коэффициента перемешивания наплавляемого материала с основой. Припуск на механическую обработку после лазерной наплавки не должен превышать 0,5–0,7 мм. Возможные способы подачи присадочных материалов в зону лазерной наплавки можно разделить на две основные группы [3].

К первой группе относятся способы с предварительным расположением присадочных материалов на обрабатываемой поверхности. Одним из таких способов является способ предварительного нанесения покрытий с помощью шликерных обмазок, который отличается высоким коэффициентом использования присадочного материала.

Ко второй группе относятся способы принудительной подачи порошка соосно (коаксиально) с лучом или с вдуванием порошка под углом к лучу, т.е. с боковой подачей порошка. При коаксиальной наплавке коэффициент использования порошкового материала не превышает 26 % даже при оптимально подобранных насадках к оптическим головкам для наплавки [4].

Одним из важных требований к способам наплавки является стоимость восстановления: она не должна превышать 30–40 % стоимости новой детали [5]. Именно из экономических соображений авторами принята технология наплавки шликерных покрытий.

Целью настоящей работы является определение геометрических параметров зон наплавки при различных режимах обработки и добавок наноксида меди для исключения трещинообразования покрытий.

## Оборудование для наплавки образцов и методы исследований

В экспериментальных исследованиях использовали лазерный комплекс ИМАШ РАН на базе установки «Комета-М» [6]. Образцы размерами 15×20×80 мм изготавливали из стали 20Х. Для наплавки выбран порошок на основе железа ФБХ6-2. Присадочный порошковый материал наносился на образцы в виде обмазки в состоянии поставки и с добавлением нанопорошка оксида меди 3–9 % от массы [7–9]. В качестве связующего вещества использовался водный раствор окиэтилцеллюлозы. Толщина шликерного слоя составляла 0,9–1,0 мм.

В качестве варьируемых факторов при планировании экспериментов [10] были выбраны мощность излучения  $P = 700–1000$  Вт, скорость обработки  $V = 5–9$  мм/с и диаметр пучка  $d = 2–3$  мм. Откликами эксперимента были высота наплавленного валика  $H$  (мм), ширина валика  $B$  (мм) и глубина зоны термического влияния (ЗТВ)  $Z$  (мм). В качестве дополнительного дискретного фактора рассматривалось сканирование луча с фиксированной частотой  $f = 220$  Гц. Использовался сканатор резонансного типа с упругим элементом, на котором закреплено зеркало. Фиксированная частота колебаний зеркала позволяет получить одинаковые амплитуды колебаний луча и повторяемость результатов экспериментов на всех режимах обработки. Наплавка производилась при максимальных и минимальных уровнях факторов,

которые обозначены соответственно  $z^+$  и  $z^-$ . Верхний и нижний уровни факторов выбирались по результатам предварительных экспериментов, при которых визуально отмечалось устойчивое формирование наплавленных слоев.

Металлографические исследования наплавленных покрытий проводились на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н, металлографическом микроскопе Альтами МЕТ 1С и цифровом микроскопе АМ413МL.

Для выявления микроструктуры наплавленных покрытий образцы были подвержены химическому травлению в течение ~2 с. Для травления использовался трехпроцентный раствор  $\text{HNO}_3$  в спирте  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ .

Для определения задиростойкости упрочненных образцов применялась универсальная машина трения МТУ-01. Испытания проводили по схеме «плоскость–кольцо». Сравнительный анализ проводили между образцами с наплавкой шихтой порошка ФБХ6-2 и образцами, наплавленными с добавками в шихту нанопорошка оксида меди 3–9 %. Кольцо изготавливали из стали ШХ-15 с внутренним диаметром 24,5 мм и внешним диаметром 30,5 мм, с твердостью 60–62 HRC. В качестве смазочного материала использовали СОЛИДОЛ Ж. Скорость скольжения и давление на образец изменялись дискретно в интервале 0,1–1,1 м/с и 1–4 МПа соответственно. Время испытания составляло 2 ч. После испытаний образцы обезжиривались ацетоном согласно ГОСТ 2786-84 и подвергались сушке в печи при температуре 70 °С в течение 30 мин.

### Результаты экспериментальных исследований

С целью учета дискретного фактора сканирования эксперименты производились в две серии – со сканированием и без него. Уровни факторов, а также зависимости кодированных переменных от натуральных величин приведены в табл. 1.

Согласно рекомендациям [10], в качестве математической модели принят алгебраический линейный полином вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{1,2}x_1x_2 \dots + b_{k-1,k}x_{k-1}x_k, \quad (1)$$

где  $b_i$  – линейные коэффициенты регрессии.

Измерения геометрии наплавленных валков выполнялись с помощью микроскопа «Альтами МЕТ 1С». Замеры производились в каждой точке три раза с целью исключения случайной погрешности.

Полученные математические модели были проверены на адекватность по критериям Стьюдента и Фишера.

Анализ полученных уравнений показывает прямо пропорциональную зависимость между мощностью излучения и высотой валика и обратно пропорциональную зависимость между скоростью перемещения луча и высотой наплавленного слоя. Ширина валика возрастает с увеличением мощности и диаметра луча и уменьшается при увеличении скорости обработки. Сканирование приводит к росту ширины с одновременным уменьшением высоты валика и повышает производительность наплавки в 1,3–1,9 раза. Анализ уравнений для глубины ЗТВ показывает, что наибольшее влияние на глубину ЗТВ оказывает мощность излучения. Увеличение скорости перемещения луча приводит к уменьшению глубины ЗТВ, что объясняется меньшей мгновенной энергией, поглощенной наплавленным материалом в единицу времени. Для сравнения построены поверхности для ширины зон наплавки  $B$  и  $B_{\text{скан}} = f(P, V)$  при  $d = 2$  мм (рис. 1).

При использовании круглого лазерного пятна для упрочнения или наплавки время воздействия в его центре определяется отношением диаметра луча к скорости его перемещения, а по краям пятна время воздействия стремится к нулю. При этом для упрочнения или наплав-

Таблица 1

Уровни факторов эксперимента

Фактор	$z^+$	$z^-$	$z_0$	$\lambda$	Зависимость уровня фактора эксперимента $x_i$
$P$ , Вт	1000	700	850	150	$x_i = (P - 850)/150$
$V$ , мм/с	9	5	7	2	$x_i = 0,5(V - 7)$
$d$ , мм	3	2	2,5	0,5	$x_i = (d - 2,5)/0,5$
$f$ , Гц	220	0	–	–	–

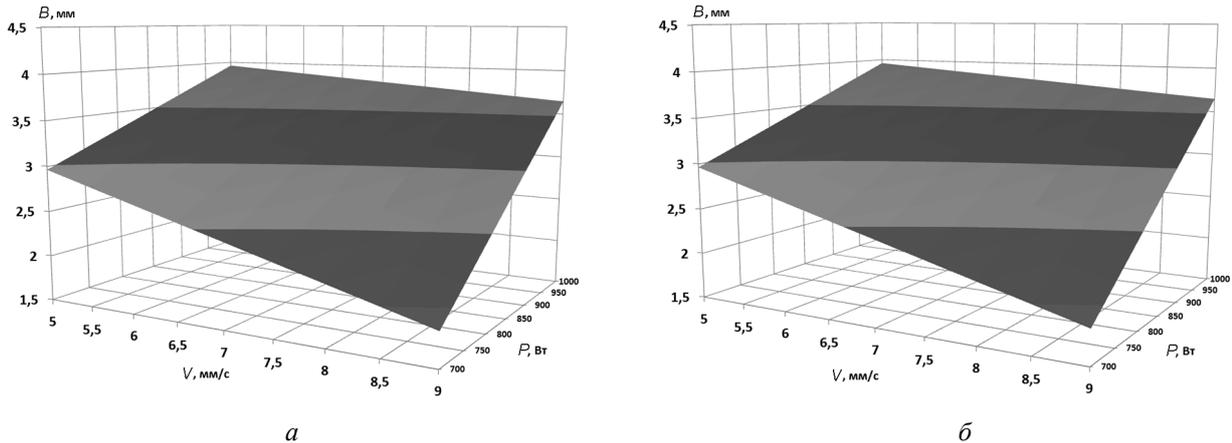


Рис. 1. Зависимость ширины валика от мощности излучения и скорости обработки:  
а – наплавка расфокусированным лучом; б – наплавка сканирующим лучом

ки эффективно используется только часть энергии 30–60 % в зависимости от степени дефокусировки лазерного луча, а остальная энергия расходуется на бесполезный нагрев зон рядом с упрочненной или наплавленной дорожкой. При высокочастотных колебаниях луча по нормали к вектору его перемещения эта потерянная энергия участвует в процессе наплавки, оказывая влияние на производительность процесса.

Это наглядно можно видеть из графиков поверхностей, полученных по результатам экспериментов для ширины валиков. Поскольку высота валиков меняется незначительно, то по ним можно визуальным образом определить и производительность процесса.

Согласно полученным данным, характер линейной зависимости, полученной при расчетах, тот же, что и для экспериментальных значений, однако расчетная функция растет несколько быстрее. Максимальное отклонение расчетных данных от экспериментальных значений составило 3 %.

На рисунке 2 представлены микрошлифы зон сплавления покрытия с цементованным слоем образца и переходной зоны от цементованного слоя к материалу основы стали 20Х.

Наплавленный слой толщиной 0,8 мм имеет высокую твердость, порядка 762–806 HV, под ним располагается ЗТВ с твердостью 540–720 HV, толщина этого слоя 0,8 мм, ниже следуют зоны троостита и сорбита. Основной металл – сорбитообразный перлит и феррит с твердостью 190–210 HV. Наличие зоны оплавления основы на глубину 50–100 мкм свидетельствует о высокой прочности сцепления между покрытием и основным металлом. В процессе наплавки покрытий на основе порошка ФБХ6-2 на различных режимах возникают дефекты типа трещин. Для исключения трещинообразования отработана технология предварительного подогрева образцов при температуре 350 °С в течение 2 ч с последующим оплавлением лучом лазера и выдержкой в печи в течение 2 ч. С целью исключения операции предварительного и по-

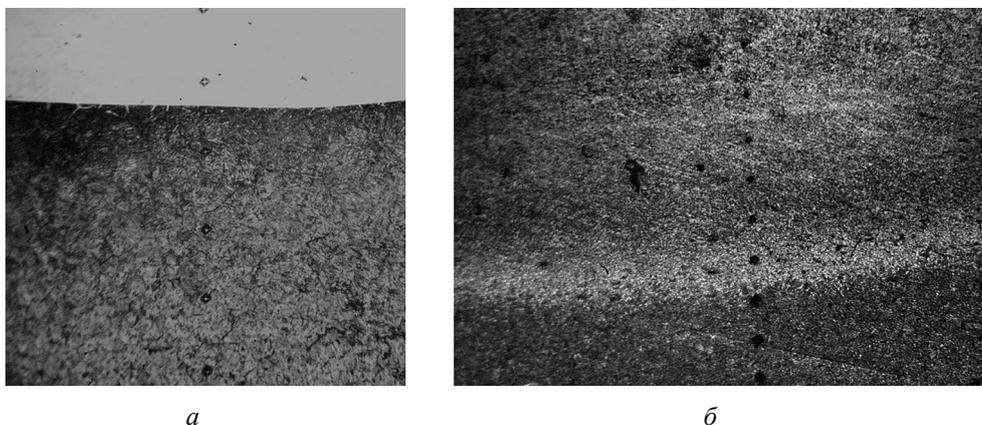
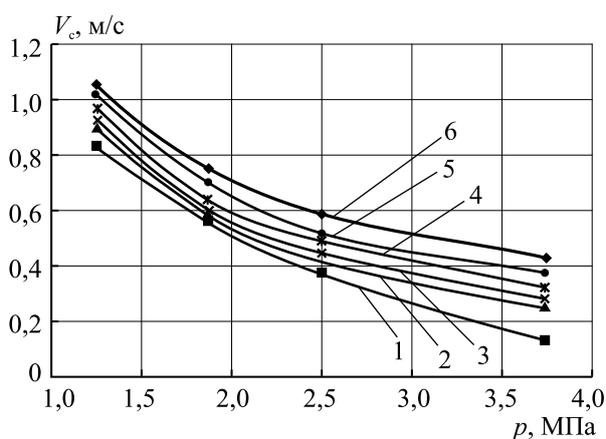


Рис. 2. Микрошлифы зоны сплавления покрытия с цементованным слоем (а) и зоны перехода цементованного слоя к материалу основы стали 20Х (б)  $\times 100$

следующего нагрева и выдержки образцов в течение 2 ч, была разработана технология с применением нанопорошка оксида меди. При наплавке покрытия, содержащего нанопорошок оксида меди, происходит восстановление оксида меди до чистой меди с выгоранием кислорода. Оксид меди выбран по причине малой отражательной способности лазерного излучения. Введение мягкой фазы (Al, Cu, V и др.) широко используется при лазерной и плазменной наплавке. Она способствует релаксации напряжений, возникающих в наплавляемых покрытиях.

Введение в состав шихты оксида меди в количестве 3 % от массы приводит к резкому сокращению числа трещин в наплавленном покрытии. Дальнейшее увеличение содержания нанопорошка оксида меди позволяет полностью исключить трещины в наплавленных слоях. На рисунке 3 представлены кривые задиростойкости; все значения давления  $p$  и скорости скольжения  $V_c$  выше этих кривых недопустимы для нормальной работы пар трения, так как произойдет задиры трущихся поверхностей от давления на образец и скорости скольжения при испытании на машине трения МТУ-01. В каждой точке на рис. 3 фиксируется скачок момента трения, который определяет начало схватывания поверхностей трения. В этот момент испытания прекращаются для предотвращения задира образцов. Для получения следующей точки необходимо при фиксированной нагрузке ступенчато изменять скорость скольжения до резкого повышения момента трения.



**Рис. 3.** Зависимость скорости скольжения от нагрузки заедания в паре трения (наплавленный слой на стали 20 – сталь ШХ15):  
1 – цементация; 2 – ФБХ6-2; 3 – ФБХ6-2+3%CuO;  
4 – ФБХ6-2+5%CuO; 5 – ФБХ6-2+7%CuO;  
6 – ФБХ6-2+9%CuO

Введение в шихту порошка ФБХ6-2 нанопорошка оксида меди приводит к повышению задиростойкости покрытия в 1,5–2 раза при ступенчатом изменении скорости скольжения в интервале 0,1–1,1 м/с и давления в пределах 1–4 МПа.

### Заключение

На основе экспериментальных данных получены уравнения регрессии и построены математические модели влияния мощности излучения, скорости обработки и диаметра пучка на геометрические параметры наплавленных слоев. Расчетные значения параметров наплавленных слоев отличаются от экспериментальных значений на 3 %.

Установлено, что при высокочастотном сканировании луча производительность процесса наплавки в 1,3–1,9 раза выше, чем без сканирования луча. Введение нанопорошка оксида меди в состав шихты на основе порошка ФБХ6-2 повышает задиростойкость наплавленных покрытий в 1,5–2 раза.

### Список литературы

1. Погодаев Л.И., Ежов Ю.Е. Повышение долговечности рабочих устройств судов технического флота износостойкими наплавками // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 6. С. 82–87.
2. Гибридные технологии лазерной наплавки / А.М. Забелин, И.Н. Шиганов, А.М. Чирков и др. М.: Изд-во МГОУ, 2007. – 126 с.
3. Григорьянц А.Г., Мисюрков А.И. Возможности и перспективы применения лазерной наплавки // Технология машиностроения. 2005. № 10. С. 32–56.
4. Korsmik R. S., Turichin G.A., Babkin K.D. Laser cladding technological machine. Investigation of efficiency of various nozzles design // 13th International Conference on Films and Coatings IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 857 (2017) 012021. P. 1–5. doi :10.1088/1742-6596/857/1/012021.
5. Черноиванов В.И., Лялякин В.П., Голубев И.Г. Инновационные проекты и разработки в области технического сервиса. М.: ФГНУ «Росинформатротех», 2010. – 95 с.
6. Бирюков В.П., Дозоров А.В. Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 1. С. 60–66.

7. Пат. 2607278 Российская Федерация, МПК С23С 4/06. Состав шихты для шликерных покрытий / В.П. Бирюков, Э.Г. Гудушаури, Д.Ю. Татаркин, А.А. Фишков, О.Н. Чурляева; опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1.
8. Фишков А.А., Бирюков В.П. Моделирование процесса лазерной наплавки с помощью полного факторного эксперимента // XXVIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС – 2016): Сборник трудов конференции (Москва, 7–9 декабря 2016 г.) / М: Изд-во ИМАШ РАН, 2017. С. 130–133.
9. Бирюков В.П., Фишков А.А. Влияние режимов лазерной обработки на размеры наплавленных валиков // Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике. МНТК ФТИ-2017. Московский технологический университет, Физико-технологический институт. Выпуск 23 (XXIII) / под ред. д.ф.-м.н., проф. Булатова М.Ф. М.: 2017. С. 416–418.
10. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М: Наука. 1980. – 226 с.

Материал поступил в редакцию 21.06.2017

**БИРЮКОВ  
Владимир Павлович**

E-mail: [laser-52@yandex.ru](mailto:laser-52@yandex.ru)  
Тел.: (499) 135-35-19

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН ИМАШ РАН, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения. Сфера научных интересов – лазерная модификация поверхности и методы определения ресурса работы узлов трения по критерию износа. Автор более 120 научных статей, 12 изобретений.

**ФИШКОВ  
Алексей Анатольевич**

E-mail: [spsmetro@yandex.ru](mailto:spsmetro@yandex.ru)  
Тел.: (499) 135-35-19

Научный сотрудник ИМАШ РАН. Сфера научных интересов – технологии лазерной наплавки, трибология наплавленных покрытий. Автор 17 научных работ, четырех изобретений.