

THE POTENTIAL OF THE MODERNIZED LABORATORY INSTALLATION “ATWOOD MACHINE” FOR STUDYING SLIDING FRICTION

A.F. GUSEV, Cand. Sc., V.V. IZMAILOV, Dr. Sc.,
M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

A diagram is presented and a description of the design of a laboratory installation for the experimental determination of the sliding friction coefficient, assembled on the basis of the classical Atwood machine, is given. The measurement technique is described and formulas are proposed to calculate the friction coefficient. The advantage of the presented installation is the extremely simple and most reliable loading scheme for the contact of rubbing surfaces - gravitational, which provides stable and absolutely accurate values of both the normal pressure force on the contact and the tangential force. The relative instrumental error does not exceed 0.5 %, which is significantly less than the random error characteristic of experiments measuring friction coefficients. It is recommended to use a modernized setup and methodology to create laboratory work in tribology and triboengineering courses.

Keywords: tribology, sliding friction coefficient, laboratory work, Atwood machine.

Поступила в редакцию/received: 13.02.2024; после рецензирования/ revised: 22.02.2024;
принята/accepted: 29.02.2024

УДК 621.791.92

ПОРОШКОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук, И.А. СМОЛЯКОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

© Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А., 2024

Представлены результаты металлографического анализа быстрорежущей стали Р6М5, полученной порошковой наплавкой на автоматизированном комплексе ЦЛТ-Ю-5 с многоканальным (48 лучей) CO₂ лазером. Показано, что фазовый состав стали – мартенсит, 10 % остаточного аустенита и 2 % карбидов V₂C. Микротвердость наплавленного металла составляет 8 500...9 000 МПа. Результаты проведенных исследований могут быть полезны производителям биметаллического инструмента с рабочей частью из наплавленной быстрорежущей стали.

Ключевые слова: быстрорежущая сталь, лазерная наплавка, многоканальный CO₂ лазер.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-29-35

ВВЕДЕНИЕ

В промышленности применяются различные способы наплавки: электродуговая, лазерная, плазменная, газовая, токами высокой частоты и др. К преимуществам лазерной наплавки относятся небольшая зона термического влияния, отсутствие

термических поводов, минимальное перемешивание основного и наплавляемого материала; поверхность после наплавки перекрывающимися валиками почти плоская и требует незначительной последующей механической обработки [1–4]. Лазерную наплавку применяют во многих отраслях, в том числе в аэрокосмической, автомобильной, судовой, нефтегазовой, транспортной, энергетической промышленности [5].

Процесс лазерной наплавки сложен, и на качество наплавленного металла влияет множество факторов. В работах [6, 7] показано, что технология лазерной наплавки включает более 19 параметров. Одним из критических, влияющих на формирование наплавленного покрытия, является технологический параметр. Наибольшее влияние на качество наплавленного слоя оказывают мощность лазерного излучения, скорость сканирования луча и скорость подачи порошка. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования показывают, что правильный выбор технологических параметров позволяет значительно улучшить свойства нанесенного слоя [2–7].

Линия сплавления при лазерной наплавке имеет характерный профиль, повторяющий распределение плотности мощности лазерного излучения по сечению дорожки [1]. По мере приближения к поверхности подложки наблюдается частичное перемешивание материала наплавки и подложки. Для формирования наплавленных слоев с малым коэффициентом перемешивания (0,05...0,15) в результате незначительного проплавления основы важную роль играет степень однородности интегрального тепловложения по ширине дорожки. В связи с этим перспективно использование для наплавки многоканальных лазеров с оптимизированным распределением плотности мощности в пятне [8–10].

Цель настоящей работы состоит в исследовании особенностей формирования микроструктуры и фазового состава быстрорежущей стали Р6М5, наплавленной с помощью многоканального CO₂ лазера.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Порошковая лазерная наплавка осуществлялась на комплексе модели ЦЛТ-Ю-5 с применением непрерывного излучения многоканального (48 лучей) CO₂ лазера. Однородность тепловложения по ширине зоны обработки обеспечивалась за счет специально разработанного доктором технических наук В.И. Юговым с соавторами лазерного излучателя с трубками, скомпонованными в виде пакета, состоящего из расположенных один внутри другого четырех восьмигранников [11]. Одноваликовую наплавку образцов выполняли двухступенчатым методом. Стальной порошок предварительно насыпали на поверхность подложки и с помощью трафарета выравняли по толщине, равной 1 мм. Затем проводили его плавление лазерным излучением на различных технологических параметрах. Мощность излучения изменяли в пределах 3...4 кВт, скорость сканирования луча – в диапазоне 3...10 мм/с. Диаметр пятна лазерного излучения не изменялся и был равен 8 мм.

В качестве присадочного материала использовали порошок быстрорежущей стали марки М2 (аналог Р6М5 ГОСТ 19265-73), полученный методом газоструйного распыления расплава. Химический состав порошка по данным производителя представлен в табл. 1. На рис. 1 изображены частицы порошка, средний размер частиц ~100 мкм. Порошки, полученные методом газоструйного распыления расплава, как правило, имеют гранулометрический состав, изменяющийся в широких пределах. На поверхности отдельных частиц встречаются сателлиты, что может влиять на насыпную плотность. Кроме того, внутри частиц нередко встречаются пустоты, заполненные аргоном. Во время наплавки не все пузырьки газа успевают выйти из расплава, что может привести к пористости наплавленного металла.

Таблица 1. Химический состав порошка быстрорежущей стали (% масс.)

C	W	V	Mo	Cr	Mn	Si	Fe
1,0	6,2	2,0	5,0	4,0	0,3	0,3	Основа

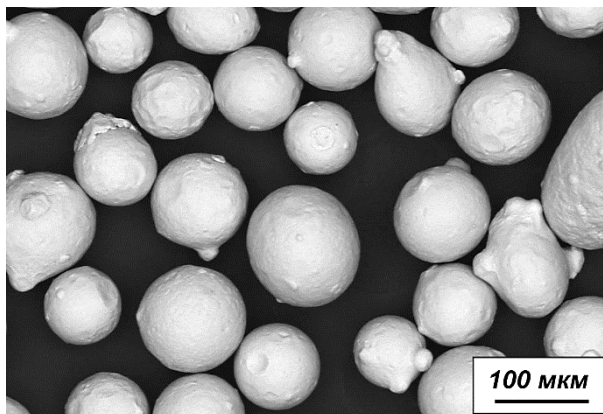


Рис. 1. Изображение частиц порошка быстрорежущей стали

В качестве материала подложки использовали заготовки из среднеуглеродистой низколегированной стали 30ХГСА (ГОСТ 4543-71), предварительно упрочненной закалкой от температуры 880 °С в масле и отпуском при температуре 200 °С в течение одного часа.

Микроструктуру стали изучали с помощью растрового электронного микроскопа. Микроструктуру выявляли химическим травлением шлифов 3%-м раствором азотной кислоты. Для проведения рентгеноспектрального микроанализа использовали энергодисперсионный спектрометр. Фазовый состав определяли методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре в $Co\ K\alpha$ -излучении. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В зависимости от технологических параметров получены разные по типу валики наплавленного металла (рис. 2 и табл. 2). Образец № 1 представляет собой изолированные капли присадочного материала на поверхности подложки. Стальная подложка не успевает расплавиться под слоем порошка и не смачивается расплавленной присадкой, т.е. режим наплавки № 1 соответствует области капельного формирования.

При снижении скорости сканирования луча с 10 до 7 мм/с (образец № 2) формируется неравномерный валик. Режим наплавки также не является оптимальным. Дальнейшее снижение скорости сканирования луча, а также мощности лазерного излучения (образцы № 3–6) приводит к формированию равномерных валиков наплавленного металла. Эти образцы исследовали более детально.

Микроструктура наплавленной быстрорежущей стали вблизи линии сплавления с конструкционной сталью 30ХГСА представлена на рис. 3а. Проплавление основного металла у биметаллических образцов минимально, коэффициент перемешивания γ наплавленного металла и основы близок к 0 %, что показывает высокую степень однородности интегрального тепловложения по сечению дорожки, т.е. выбор режимов наплавки оптимален.

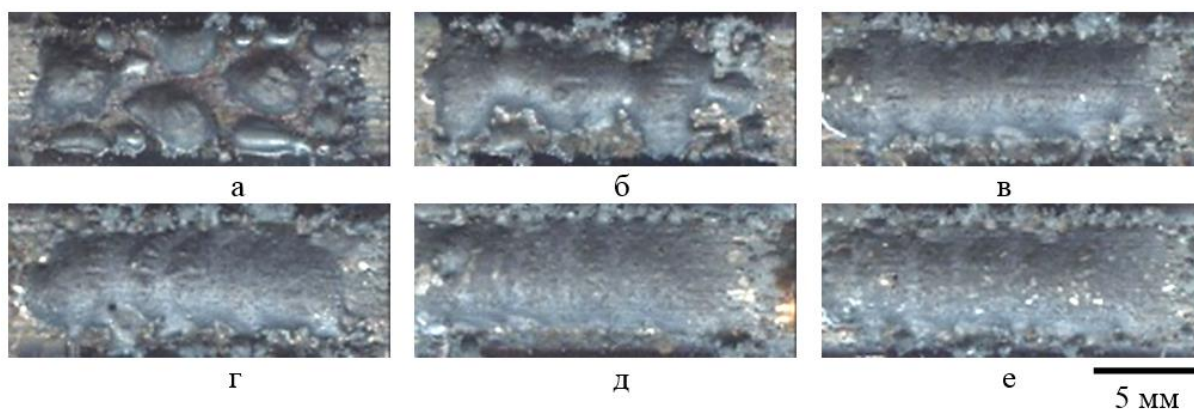


Рис. 2. Изображение наплавленных образцов. Вид сверху:
№ 1 (а); № 2 (б); № 3 (в); № 4 (г); № 5 (д); № 6 (е)

Таблица 2. Характеристики наплавленных образцов

№ образца	Мощность излучения, кВт	Скорость сканирования луча, мм/с	Особенности процесса
1	4	10	Капельное формирование
2	4	7	Неравномерный валик
3	4	5	Равномерный валик
4	3,5	5	
5	3,5	3	
6	3	3	

Данные металлографического анализа подтверждаются рентгеноспектральным микроанализом наплавленных образцов, результаты которого представлены на рис. 3б и в табл. 3. Прямоугольниками обозначены зоны микроанализа. Спектры 1 и 2 показывают химический состав стали 30ХГСА вблизи линии сплавления, спектры 3...5 дают распределение легирующих компонентов в наплавленной быстрорежущей стали по высоте валика. Химический состав наплавленного металла вблизи линии сплавления (спектр 3) и в других частях валика одинаков.

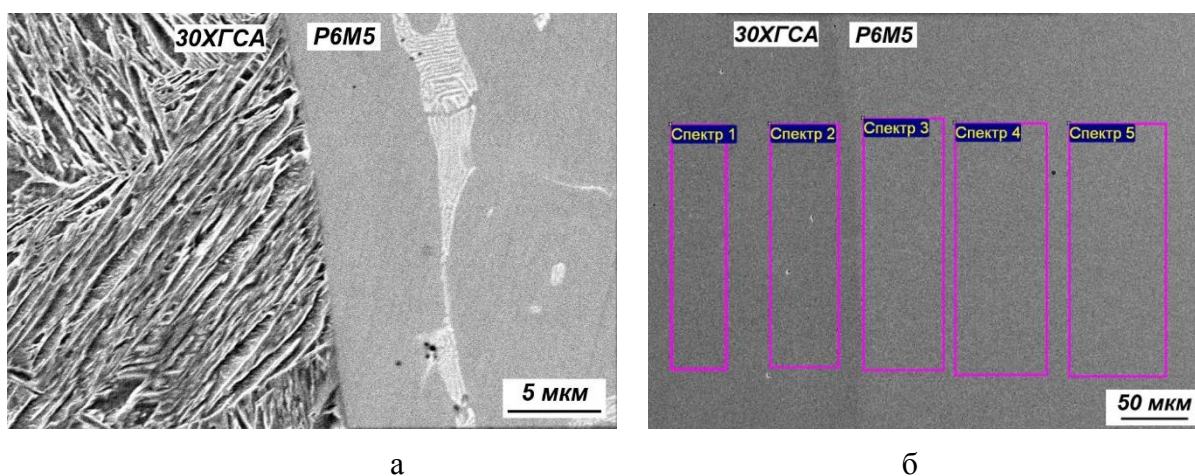


Рис. 3. Микроструктура наплавленной быстрорежущей стали вблизи линии сплавления (а) и электронно-микроскопический снимок зон рентгеноспектрального микроанализа (б)

Таблица 3. Распределение легирующих компонентов в наплавленном биметаллическом образце по спектрам (% масс.)

№ спектра	Si	V	Cr	Mn	Mo	W
1	1,25	–	1,05	1,04	–	–
2	1,25	–	0,99	0,89	–	–
3	–	2,01	4,32	–	5,92	5,40
4	–	2,03	4,33	–	5,75	5,54
5	–	1,93	4,40	–	5,63	5,78

При лазерной наплавке порошка быстрорежущей стали формируется слой с низким содержанием пор. Среднее количество пор по объему наплавленного металла составляет $0,315 \pm 0,001$ % (рис. 4а), средний размер пор около 0,5 мкм. Микротвердость наплавленного металла 8 500...9 000 МПа (рис. 4б). Точками показаны измеренные значения, линией – аппроксимация экспериментальных данных по функции Больцмана с использованием компьютерной программы Origin.

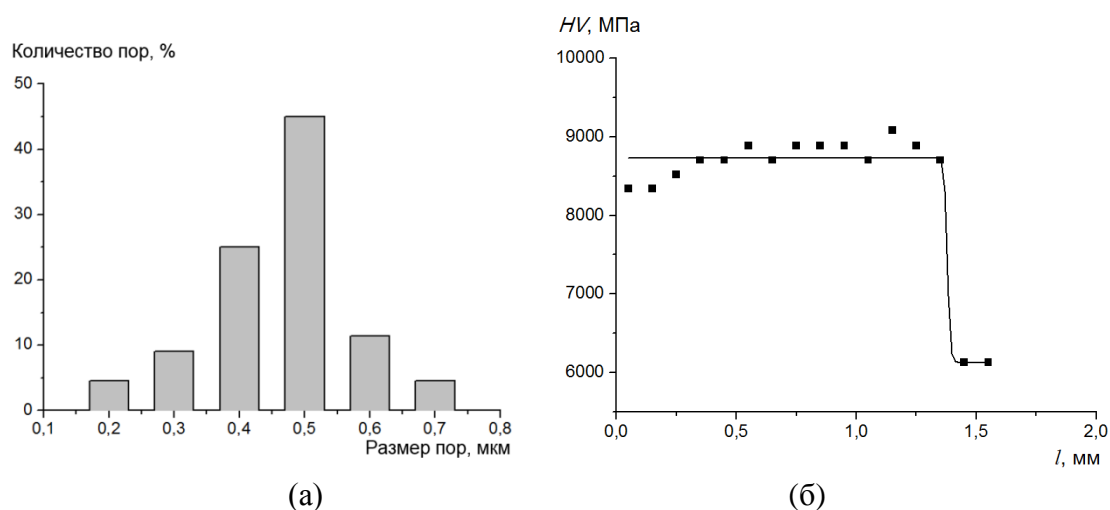


Рис. 4. Распределение пор в наплавленном металле по размеру (а) и изменение микротвердости быстрорежущей стали по высоте наплавленного валика (б)

Результаты фазового рентгеноструктурного анализа представлены на рис. 5. На дифрактограмме зарегистрированы отражения от α - и γ -твердых растворов, количество карбидов незначительно. Зарегистрирована одна линия карбидных фаз – пик, соответствующий межплоскостному расстоянию 2,2497 Å. Эта линия, скорее всего, является отражением от карбида V_2C с гексагональной кристаллической решеткой. Очевидно, что при лазерной наплавке растворились почти все тугоплавкие карбиды, по оценочным расчетам в наплавленном металле содержится порядка 10 % остаточного аустенита, 2 % карбида V_2C и мартенсит.

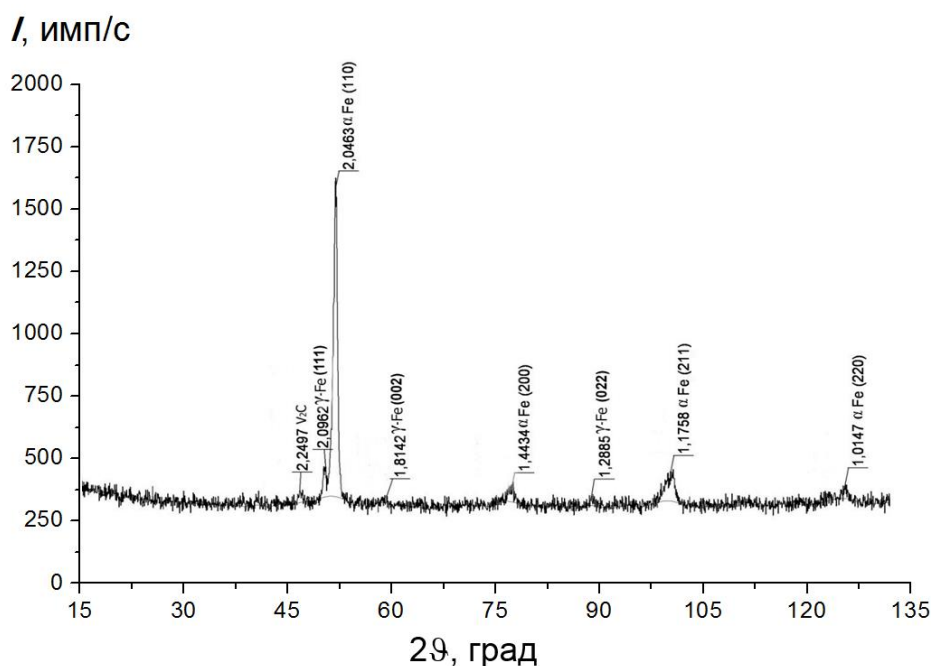


Рис. 5. Дифрактограмма образца быстрорежущей стали

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом порошковой лазерной наплавки получены биметаллические образцы быстрорежущей стали марки М2 (Р6М5) на конструкционной стали при различных режимах. Микротвердость наплавленного металла составляет 8 500...9 000 МПа. Фазовый состав быстрорежущей стали – мартенсит, 10 % остаточного аустенита и 2 % карбидов V_2C . Выявлены мелкие равномерно распределенные микропоры со средним размером 0,5 мкм. Возможной причиной их образования являются особенности строения порошка для наплавки, полученного по технологии газоструйного распыления расплава.

Порошковая наплавка многоканальных CO_2 лазеров обеспечивает высокую степень однородности интегрального тепловложения по сечению дорожки и может использоваться для изготовления высокопроизводительного биметаллического инструмента в целях экономии высоколегированных сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 663 с.
2. Wang K., Liu W., Hong Y., Sohan H.S., Tong Y., Hu Y., Ju J. An Overview of Technological Parameter Optimization in the Case of Laser Cladding // *Coatings*. 2023. V. 13. № 3. P. 496.
3. Liu Y., Ding Y., Yang L., Sun R., Zhang T., Yang X. Research and Progress of Laser Cladding on Engineering Alloys: A review // *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. V. 66. P. 341–363.
4. Zhu L., Xue P., Lan Q., Meng G., Ren Y., Yang Z., Liu Z. Recent Research and Development Status of Laser Cladding: A review // *Optics & Laser Technology*. 2021. V. 138. P. 106915.

5. Биргер Е.М., Москвитин Г.В., Поляков А.Н., Архипов В.Е. Промышленная лазерная наплавка: современное состояние и тенденции // *Сварочное производство*. 2009. № 9. С. 32–42.
6. Zhu L., Wang S., Pan H., Yuan C., Chen X. Research on Remanufacturing Strategy for 45 Steel Gear Using H13 Steel Powder Based on Laser Cladding Technology // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. V. 49. P. 344–354.
7. Muvvala G., Karmakar D. P., Nath A. K. Online Monitoring of Thermo-cycles and its Correlation with Microstructure in Laser Cladding of Nickel Based Super Alloy // *Optics and Lasers in Engineering*. 2017. V. 88. P. 139–152.
8. Югов В.И., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. Особенности формирования структуры и микрогеометрии поверхности лазерных наплавки с использованием многоканального CO₂-лазера // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2016. № 11 (143). С. 19–22.
9. Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А. Порошковая лазерная наплавка с помощью многоканального лазера // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2023. Т. 19. № 9 (225). С. 400–404.
10. Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А. Порошковая лазерная наплавка износостойкого композиционного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 21–26.
11. Патент РФ 2580350 *Устройство для упрочнения поверхности детали* / Югов В.И. и др.; Заявл. 05.11.2014. Опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10.

Для цитирования: Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А. Порошковая лазерная наплавка быстрорежущей стали // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 29–35.

POWDER LASER CLADDING OF HIGH-SPEED STEEL

L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc., I.A. SMOLYAKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ludmila.a@mail.ru

The results of metallographic analysis of high-speed steel R6M5 obtained by powder cladding on an automated complex CLT-Yu-5 with multichannel (48 beams) CO₂ laser are presented. It is shown that the phase composition of steel is martensite, 10 % of residual austenite and 2 % of V₂C carbides. The microhardness of the deposited metal is 8500..9000 MPa. The results of the conducted research may be useful to manufacturers of bimetallic tools with a working part made of fused high-speed steel.

Keywords: high-speed steel, laser cladding, multi-channel CO₂ laser.

Поступила в редакцию/received: 15.02.2024; после рецензирования/revise: 22.02.2024;
принята/accepted: 27.02.2024