

УДК 621.6.076

## ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ В ПОКРЫТИИ НА ОСНОВЕ КАРБИДОВ ВОЛЬФРАМА, ПОЛУЧЕННОМ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ НА ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

© 2023 г. Н. С. Довбыш<sup>1</sup> \*, Д. И. Гаврилов<sup>1</sup>, А. В. Жданов<sup>1</sup>, В. В. Морозов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Владимирский государственный университет имени Николая Григорьевича и Александра Григорьевича Столетовых”, Владимир, Россия

\*E-mail: Nickita863@gmail.com

Поступила в редакцию 07.07.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 28.07.2023 г.

Изнучена микротвердость износостойкого покрытия, полученного методом лазерной порошковой наплавки на поверхности нержавеющей стали марки 20X13. Установлены зависимости между режимом обработки, полученной твердостью и геометрией покрытия. Определено, что при подаче общего равномерного напряжения на все диоды, генерируемое излучение не обеспечивает равномерного проплавления основы, и как следствие, формирования равномерного покрытия, как с точки зрения геометрии, так и с точки зрения общей поверхностной твердости. Получены значения твердости как отдельных твердых частиц карбидов вольфрама, так и общей поверхности зоны термического влияния.

DOI: 10.31857/S0367676523702812, EDN: FEEWHV

### ВВЕДЕНИЕ

Тяжелые условия эксплуатации трубопроводных узлов в газопроводной и нефтедобывающей промышленности накладывают весьма жесткие требования на периодичность технического обслуживания наиболее уязвимых участков системы. На постоянный износ арматуры влияют отчасти агрессивные рабочие среды, так и циклические действия по перекрытию потоков. Интенсивно изнашиваемыми элементами, несомненно, являются те составляющие узлов, которые подвержены комбинированному эффекту износа от механического движения в циклах открытия/закрытия, а также от химического и абразивного эффекта потоков рабочих сред. Применительно к шаровым кранам, особое внимание следует уделять паре седло/шар, так как при их активном взаимном перемещении может образоваться пробой герметичности, который весьма трудно устранить, не прибегая к изоляции сектора трубопровода [1].

На данный момент предложено внушительное количество конструктивных и технологических решений крайне интенсивного износа трубопроводной арматуры, к примеру предлагается в качестве материала задвижек использовать керамические кольца, которые способны выдерживать куда более продолжительные абразивные воздействия

[2]. Другим возможным вариантом решения является нанесение защитных покрытий на рабочие поверхности пары шар/седло. При этом, для достижения герметичности соединения и требуемой шероховатости проводят операцию механической притирки. Проводятся эксперименты с различными способами нанесения покрытий, в их число входят: электроннолучевая наплавка [3, 4], плазменное напыление [5], высокоскоростное газопорошковое напыление [6], порошковая наплавка [7, 8], а также лазерная порошковая наплавка, изучению которой посвящена данная работа.

Материалами, выступающими в роли армирующих элементов, могут выступать различные износостойкие элементы по типу никелевых сплавов, сплавов на основе кобальта (стеллиты), сплавов с высоким содержанием карбидов и боридов, а также хромоникелевые сплавы.

В настоящей работе представлены результаты изучения микротвердости покрытия с высоким содержанием керамических включений, которое было получено методом лазерной порошковой наплавки. В качестве порошкового состава использовалась композиция на основе никелевой матрицы с добавлением 60% карбидов вольфрама, а подложкой выступала нержавеющая сталь марки 20X13. Была построена карта микротвердости поперечного шлифа в направлении от нане-

Таблица 1. Режимы обработки стали 20X13

Марка стали (хим. состав композиции)	Номер образца	Режим обработки			Твердость, HRC
		мощность излучения $W$ , кВт	скорость сканирования поверхности $V$ , мм/с	фокусное расстояние $F$ , мм	
20X13 (NiCrWc)	1	5	8	30	68.4
	2		9	30	64.4
	3		10	35	63.3
	4		11	35	70.5

сенного слоя в сторону основного металла подложки, построен график распределения твердости по глубине и ширине покрытия. Установлена зависимость между полученной геометрией покрытия и выбранным режимом лазерной обработки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материалов данной работы были использованы округлые образцы нержавеющей стали марки 20X13 в количестве четырех штук диаметром 35 мм. Выбранная марка стали является распространенной в сфере проектирования трубопроводной арматуры, так как обладает высоким сопротивлением к коррозии, хорошей пластичностью и стойкостью. Кроме того, данная сталь мартенситного класса является жаропрочной, что позволяет ей упрочняться при термических воздействиях, к примеру при лазерном излучении.

Порошковая композиция, из которой в результате формировалось покрытие, выбиралась на основании отраслевых требований. Никелевая матрица с 60% содержанием частиц карбида вольфрама, в качестве покрытия, способна обеспечить требуемые значения износостойкости и сопротивления коррозии, а в сочетании со способом нанесения обеспечить высокую степень адгезии между подложкой и покрытием.

Нанесение дорожек производилось на гибридном лазерном комплексе с источником излучения, в основе которого лежит 40 самостоятельных диодов, формирующих общий пучок, а перенос излучения производится за счет оптического волокна. Длина волны при этом равна 780 нм, а максимальная мощность 5 кВт. Используемые режимы обработки образцов приведены в табл. 1.

Как видно, мощность излучения на всех образцах оставалась неизменной, а варьируемыми параметрами являлись скорость и фокусное расстояние. На основании 5 независимых измерений твердости методом Роквелла по шкале С, был сде-

лан вывод о том, что образец под номером 4 обладает более высокой твердостью, сравнительно с остальными образцами выборки, поэтому было решено более детально изучить природу возникновения таких высоких значений. Для этого образец 4 был разрезан на две равные половины, а его поперечное сечение тщательно отполировано до зеркального блеска, с целью выполнения точечных измерений микротвердости.

Одной из основных задач исследования являлся анализ равномерности распределения твердости в направлении от покрытия вглубь к основе. Для этого была проведена серия из 40 равноудаленных измерений, результаты которой продемонстрировали очевидную тенденцию к снижению твердости по направлению вглубь металла. На рис. 1 изображено направление индентирования, а цветами выделены зоны стабильности значений: красный – значения имеют тенденцию к снижению, зеленый – значения вышли на плато. Следует отметить, что некоторые значения выбиваются из общего ряда, что связано с попаданием индентора в упрочненную фазу и карбидные частицы в наплавке. На рис. 2 приведен график, построенный по результатам этой серии измерений.

Для изучения продольного распределения твердости была выполнена вторая серия измерений, включающая в себя уже 100 равномерно распределенных точечных измерений. По результатам этой серии измерений был сделан вывод о возникновении “просадок”, сконцентрированных по краям дорожки. Снижение значений твердости при этом наблюдалось по обеим сторонам дорожки. Построенный, на основании полученных значений график (рис. 3) свидетельствует о том, что твердость по краям значительно проседает по сравнению со значениями в середине, а его форма напоминает распределение по закону Гаусса (нормальное распределение).

Твердость армирующих частиц в нанесенном покрытии представляла не меньший интерес, чем твердость материала в зоне термического влия-

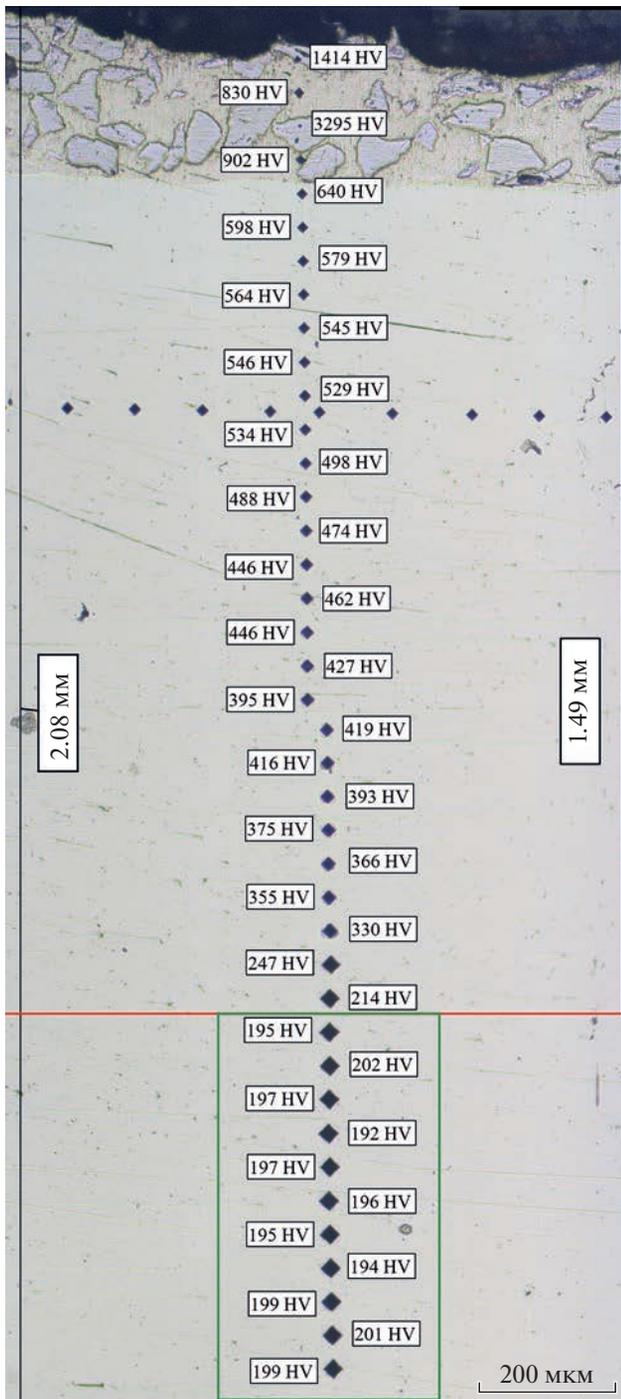


Рис. 1. Значения микротвердости при измерении в направлении к основному металлу.

ния. Были выбраны три пограничные зоны, в которых точно выполнены измерения твердых частиц карбидов. В каждой зоне было выполнено по 10 измерений, по одному на отдельный карбид. Таким образом, была сформирована картина, изображенная на рис. 4. Средняя твердость кар-

бидов в двух крайних зонах была гораздо ниже, чем твердость карбидов в средней зоне. Отсюда можно сделать вывод о том, что тугоплавкие армирующие частицы карбида вольфрама при поглощении разной степени излучения могут формировать различную поверхностную твердость покрытия.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В процессе формирования покрытия, на конечные физико-механические свойства влияет множество параметров, которые зачастую весьма трудно подвергнуть прямому контролю. Лазерная порошковая наплавка позволяет контролировать целое множество параметров, таких как мощность излучения, скорость сканирования, скорость подачи порошковой композиции в зону обработки, фокусное расстояние и т.д. Все вышеперечисленные параметры могут напрямую влиять на формирование геометрически равномерного и равномерно распределенного по твердости покрытия. Как показали результаты представленного исследования, не всегда удается добиться равномерного распределения твердости в покрытии и этому, предположительно, есть несколько объяснений.

Опираясь на полученные значения твердости по краям дорожки, можно предположить, что в процессе излучения наиболее интенсивно подвергаются проплавлению те объекты, которые попадают в центральную область пятна, что влечет за собой перепады в геометрии дорожки и значениях твердости. Связано это, предположительно, с неравномерностью интенсивности излучения крайних диодов, которые формируют внешнюю окружность пятна. Еще одним предположением здесь может являться некорректная установка фокусного расстояния, при котором пятно на поверхности было сформировано недостаточно четко, что повлекло за собой расфокусировку излучения и отсутствие стабильного результата.

На основании полученных результатов выработаны следующие рекомендации к дальнейшей работе по теме:

1. Использование расширенной выборки режимов лазерной обработки, включающей варьирование по мощности в сторону уменьшения значений, а также фокусировку пятна с учетом диаметра перетяжки линзы для формирования равномерного пятна на поверхности подложки;
2. Формирование нескольких дорожек с ободным перекрытием и наложением друг на друга с целью нивелировать эффект нормального распределения излучения;
3. Включение в выборку нескольких образцов, обработанных на разных режимах.

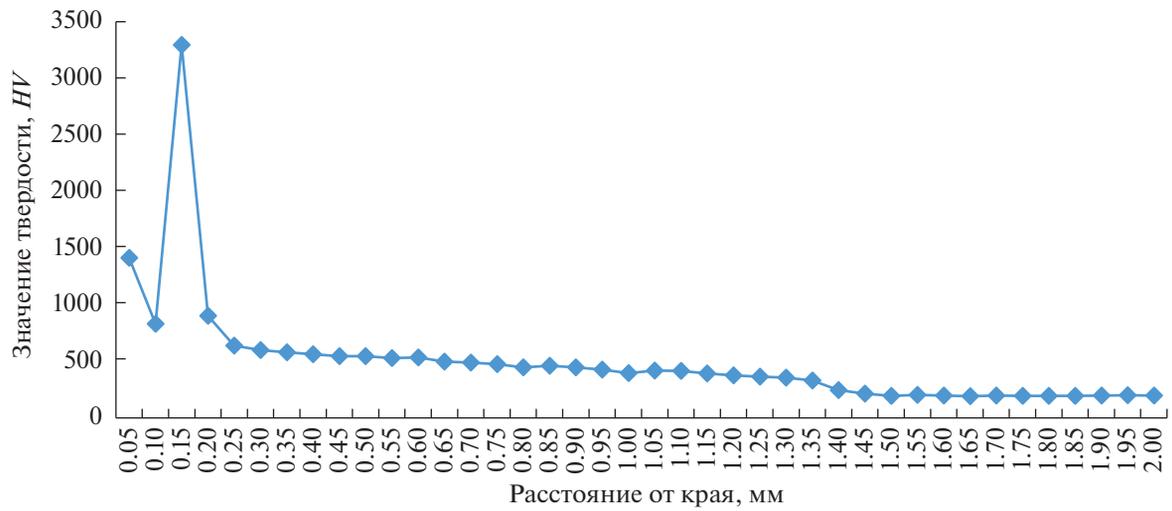


Рис. 2. Тенденция распределения твердости в глубину.

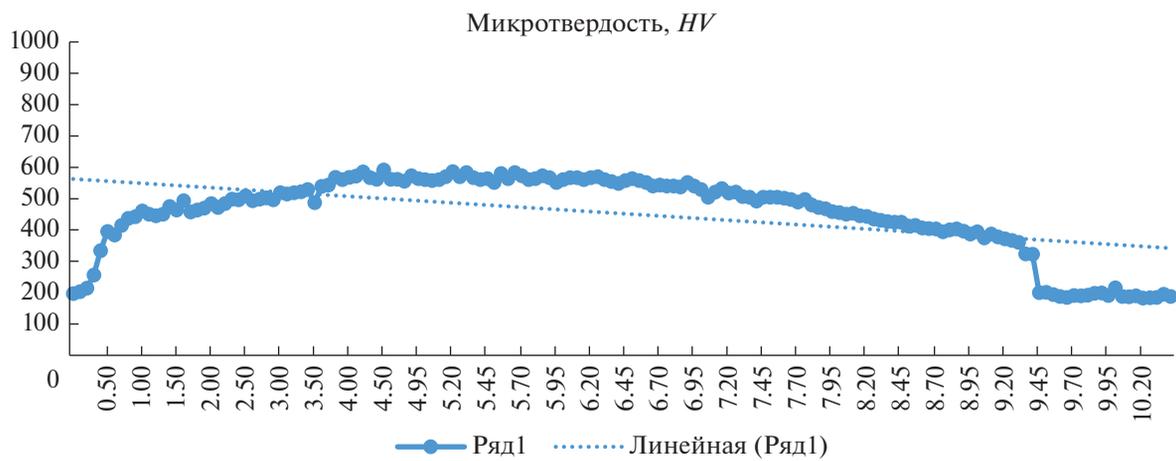


Рис. 3. Значения продольного измерения твердости с просадкой по краям.

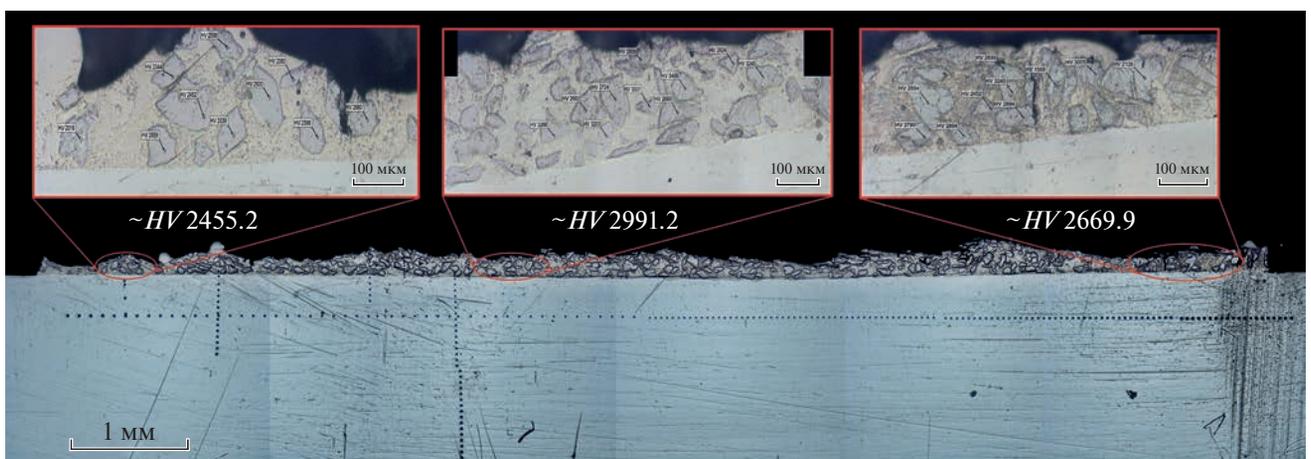


Рис. 4. Панорамный снимок проведенной работы по индентированию в продольном направлении покрытия с указанием зон.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были определены дальнейшие шаги в изучении влияния лазерного излучения на формирование геометрии и распределение твердости в покрытии и подложке. Представленные результаты позволяют глубже понимать механизмы взаимодействия лазерного излучения с металлическими и керамическими объектами, а также демонстрируют важность подбора режимов обработки при лазерной порошковой наплавке. В дальнейших работах планируется уделить внимание аспекту корректного подбора режимов лазерной обработки, исходя из задачи получения равномерного износостойкого покрытия.

Проведен ряд измерений твердости в направлении подложки с целью определения глубины влияния лазерного излучения. Определено расстояние в 1.49 мм от поверхности образца, на котором значения выходят на стабильное плато. Проведен ряд измерений твердости в продольном сечении образца на уровне зоны термического влияния. Выяснено, что значения твердости распределены нестабильно и имеют значительные равномерные снижения при отдалении от центральной области. Разница в значениях при этом достигает почти 400 HRC. Показатели твердости карбидных частиц продемонстрировали схожую тенденцию к неравномерному поглощению излучения. Так, крайние зоны с карбидами формиру-

ют менее прочную структуру со средними значениями твердости в 2455 HV и 2660 HV, в то время как карбиды, находящиеся в центре, демонстрируют среднюю величину в 2990 HV.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хорохордин И.С.* // Пробл. геол. и осв. недр. 2019. Т. 2. С. 526.
2. *Шегельман И.Р., Васильев А.С., Ключев Г.В.* // Научн. иссл.: от теор. к практ. 2015. № 1(2). С. 198.
3. *Радченко М.В., Радченко Ю.О., Шевцов Т.Б.* // 7 междунар. научн.-практ. конф. "Инновации в машиностроении – 2015" (Кемерово, 2015). С. 405.
4. *Шевцов Ю.О., Радченко М.В.* // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении, 2019. С. 119.
5. *Лантева И.А., Сариллов М.Ю., Коннова Г.В.* // Междунар. научн.-техн. конф. "Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2018" (Севастополь, 2018). С. 206.
6. *Екубов Т.Д., Фоменко Р.Н.* // Сб. научн. статей "Наука и инновации – современные концепции" (Москва, 2021). С. 210.
7. *Бородихин С.А., Лосев А.С., Еремин Е.Н.* // Россия молодая: передовые технол. – в промышленность. 2017. № 1. С. 8.
8. *Полосков С.С.* // Персп. иннов. и разр. 2019. Т. 1. С. 243.

## Study of the microhardness distribution in a coating based on tungsten carbides obtained by laser surfacing on a stainless steel surface

N. S. Dovbysh<sup>a</sup>, \*, D. I. Gavrillov<sup>a</sup>, A. V. Zhdanov<sup>a</sup>, V. V. Morozov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Vladimir State University, Vladimir, 600000 Russia

\*e-mail: Nickita863@gmail.com

We studied the microhardness of the wear-resistant coating obtained by laser powder surfacing on the surface of 420 stainless steel. The dependences between the treatment mode, the obtained hardness and the geometry of the coating are established. It is determined that when a total equal voltage is applied to all diodes, the generated radiation does not provide uniform penetration of the substrate, and as a result, the formation of a uniform coating, both from the point of view of geometry and from the point of view of overall surface hardness. The hardness values of both individual solid particles of tungsten carbides and the total surface of the zone of thermal influence are obtained.

**Keywords:** laser surfacing, protective coating, tungsten carbide, nickel powder, microhardness, normal distribution