

УДК 621.791.92

Лазерная наплавка износостойких покрытий на основе нитрида титана

Поликахин Александр Алексеевич

polikakhinaa@student.bmstu.ru

Фам Хонг Куан

famkh@student.bmstu.ru

Холопов Андрей Андреевич

xol@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Методом лазерной наплавки на поверхность седельного кольца шарового крана было нанесен слой из нитрида титана. С помощью электронной микроскопии было произведено исследование структуры и химического анализа. Толщина покрытия составила 700 мкм. Установлено, что структура данных материалов представляет собой титановую матрицу с равномерно распределенными частицами нитрида. Пористость и расслоения по объему материала не наблюдалась. Так же был произведен анализ микротвердости по глубине наплавленного слоя. Твердость частиц нитрида составила более 1100 HV, титановой матрицы до 750 HV. Данное покрытие обладает повышенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: наплавка, композиты, износостойкие покрытия, структура, составы

Laser surfacing of wear-resistant coatings based on titanium nitride

Polikakhin Alexander Alekseevich

polikakhinaa@student.bmstu.ru

Pham Hong Kuan

famkh@student.bmstu.ru

Kholopov Andrey Andreevich

xol@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. A layer of titanium nitride was applied to the surface of the seat ring of the ball valve by laser surfacing. The structure and chemical analysis were studied using electron microscopy. The thickness of the coating was 700 microns. It is established that the structure of these materials is a titanium matrix with uniformly distributed nitride particles. Porosity and delamination by volume of the material were not observed. The microhardness was also analyzed by the depth of the deposited layer. The hardness of the nitride particles was more than 1100 HV, and the titanium matrix was up to 750 HV. This coating has improved performance characteristics.

Keywords: surfacing, composites, wear-resistant coatings, structure, compositions

Введение. Процесс лазерной наплавки может использоваться для восстановления изношенных поверхностей и устранения трещин в деталях, подверженных усталостным и износным нагрузкам. Он особенно эффективен в случае материалов, при обработке которых традиционные методы оказываются недостаточно результативными [1].

Лазерная наплавка представляет собой процесс нанесения покрытия на поверхность изделия путем локального расплавления присадочного материала с минимальным термическим воздействием на основной металл. За счет ограниченного расплавления основы, формируемое покрытие приобретает свойства, в основном определяемые составом и характеристиками присадочного материала [2].

В коаксиальной лазерной наплавке порошковый материал заданного состава подается к обрабатываемой поверхности по оси лазерного луча. В отличие от технологии с поперечным соплом, в этом случае частицы дольше находятся в зоне действия лазерного излучения, что приводит к их более сильному нагреву и повышенной степени расплава к моменту контакта с подложкой. Это обеспечивает доставку к поверхности большего количества расплавленных частиц.

Ключевым преимуществом коаксиальной наплавочной головки является возможность наплавки в любом направлении, а также улучшенная защита зоны обработки от внешней среды. Кроме того, снижается размер зоны термического влияния, что особенно важно при обработке тонкостенных или прецизионных изделий. Такая система позволяет точно наносить защитные или восстановительные покрытия только на заданные участки, подверженные износу или локальным повреждениям.

В данной работе проводится исследование перспектив использования лазерной наплавки титановых сплавов. Титановые сплавы широко применяются в различных сферах промышленности, в частности в трубопроводной арматуре [3].

Материалы и методы. Трубопроводная арматура, используемая в системах трубопроводов и емкостях, служит для управления потоками рабочей среды (жидкости, газы, смеси жидкостей и газов, порошки, суспензии и другие). Она выполняет функции перекрытия, регулирования, распределения, смешивания и разделения фаз, что достигается за счет изменения проходного сечения.

Запорная арматура играет ключевую роль в любой трубопроводной системе. Ее доля в общих капитальных и эксплуатационных расходах обычно составляет около 10–12 %. В процессе эксплуатации арматура сталкивается с широким спектром внешних факторов, включая экстремальные температуры, высокое и низкое давление, вибрации и воздействие агрессивных сред.

По этой причине предъявляемые к ней требования чрезвычайно разнообразны. Основная цель арматуры — обеспечивать эффективное управление движением рабочей среды внутри функционального контура установки. Самыми нагруженными элементами считаются шаровые краны (шар затворный и седельные кольца), которые отвечают за поддержание необходимого уровня герметичности на протяжении всего срока службы.

Седельное кольцо шарового крана является важнейшим элементом запорного устройства, обеспечивающего герметичность и точное сопряжение с шаровой частью крана. Изготавливается данное кольцо из титаново-алюминиевого сплава марки ВТ6 (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав ВТ6

Ti	Al	Fe	V	Zr	O	C	Si	N	H	Примеси
86,45–90,9	5,3–6,8	0,6	3,5–5,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,05	0,015	0,3

Изготовление детали из материала ВТ6 обеспечивает следующие характеристики [4]: высокая прочность, коррозионная стойкость, способность выдерживать значительные температуры и механические нагрузки.

Поверхность контакта шара и седла (рис. 1) наиболее подвержено к износу. Поэтому на него наплавляется покрытие из нитрида титана, которое обладает высокой твердостью, низким коэффициентом трения, коррозионной стойкостью (возможность работы в агрессивных средах), способностью сохранять свои свойства при высоких температурах.

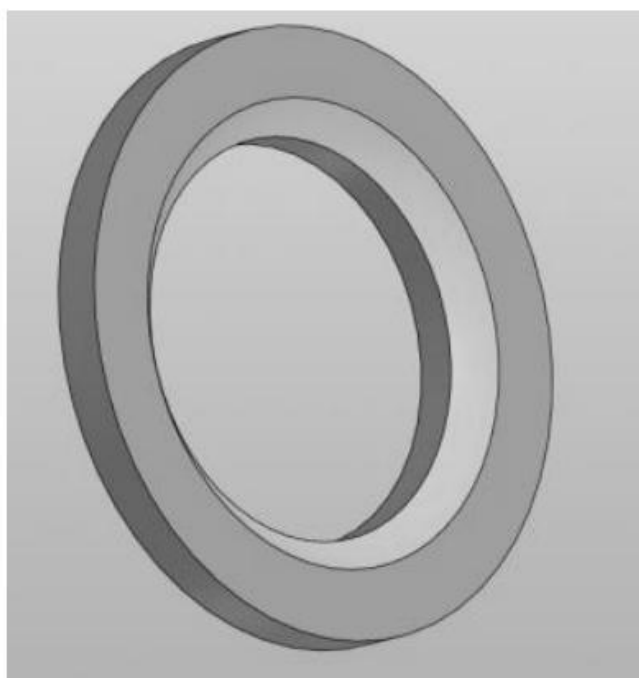


Рис. 1. 3D-модель уплотнительного кольца шаровой задвижки (оранжевый цвет показывает место повышенного износа, где производится лазерная наплавка)

Данная деталь используется в автоклавном выщелачивании — процесс, который проводится с целью извлечения из твердых веществ (руды, концентраты) различных компонентов (золота, меди, серебра, железа, цинка, вольфрама, никеля, алюминия). В основе данного процесса лежит химическая реакция, при которой извлекаемый компонент переходит из нерастворимого в растворимое состояние. Седельное кольцо относится к деталям повышенной ответственности, так как обеспечивает герметичность подачи агрессивных растворов (для выщелачивания золота), выход ее из строя может приве-

сти к потере дорогостоящего сырья, загрязнению окружающей среды, поломке технологического оборудования и опасности для здоровья персонала.

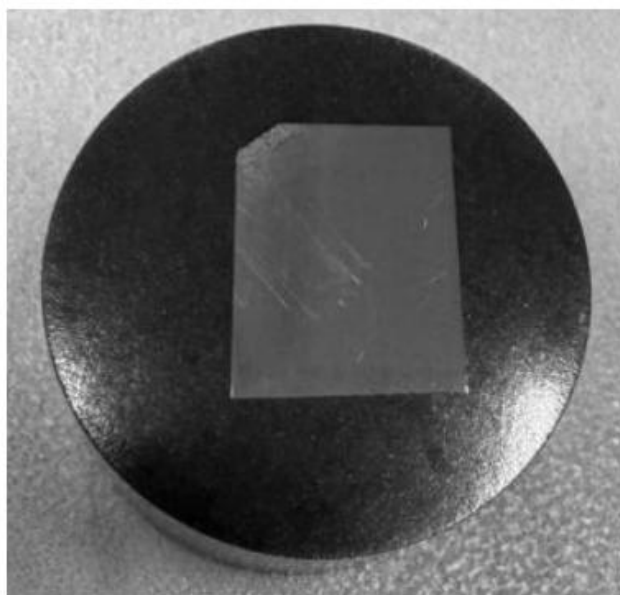
Результаты. Процесс наплавки проводился на лазерном технологическом комплексе «Универсал» при помощи наплавочной головки для волоконных лазеров YC52 от компании «Precitec». Процесс осуществлялся на режиме, представленном в табл. 2. Данный режим обеспечивает нанесение дорожек нитрида титана высотой 0,8 мм, шириной 2 мм и глубиной проплавления основного материала 0,3 мм.

Таблица 2

Параметры наплавки нитрида титана на кольцо ВТ6

Параметр	Обозначение	Значение
Мощность лазерного излучения, Вт	P	1100
Скорость наплавки, мм/мин	v	800
Диаметр пятна, мм	$d_{\text{п}}$	3

Для измерения микротвердости наплавленного слоя подготовили образец для исследования: вырезка, запрессовка в оправки, шлифовка, полировка, промывка образцов на оборудовании «Struers» (рис. 2). Микрошлифы после изготовления травились специальными реактивами.

**Рис. 2.** Образец для исследования, вырезанный сегмент кольца

Оборудование для измерения: твердомер Виккерса EMCOTEST DuraScan (табл. 3).

Таблица 3

Основные технические характеристики оборудования

Характеристики	Значение
Размер рабочей зоны (Д×Ш), мм	130×130
Максимальная масса образца, кг	50
Программное обеспечение	ECOS
Точность, %	
При нагрузке $\leq 1,961$ Н	$\pm 1,5$
При нагрузке $> 1,961$ Н	$\pm 1,0$
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	690×450×680

Была выбрана следующая методика испытания — HV0,1, что соответствует нагрузке на индентор, равной 0,1 кг, или усилию около 9,8 Н. Измерение проводили от начала наплавленного слоя в глубь к основному материалу с шагом 0,15 мкм. И так же были 4 дополнительных измерения с наведением на нитрид (табл. 4).

Таблица 4

Результаты микротвердости 10 измерений

Смещение	Значение микротвердости HV 0,1
0	749
0,15	454
0,3	424
0,45	990
0,6	473
0,75	667
Наведение на нитрид	1331
Наведение на нитрид	1538
Наведение на нитрид	1153
Наведение на нитрид	1243

Титановая матрица обладает твердостью от 400 до 500 HV, а включенные в нее нитриды могут иметь твердость до 1600 HV. Такая структура позволяет значительно увеличивает износостойкость поверхности кольца. Это особенно важно для автоклавных процессов, где кольцо подвергается высокому механическому давлению и трению.

Далее было произведено исследование структуры и химического анализа с помощью электронного микроскопа Phenom Pharos первого поколения (табл. 5).

Таблица 5

Характеристики электронного микроскопа Phenom Pharos

Параметр	Значение
Разрешающая способность – предельная – реальная	3,0 нм 10,0 нм
Максимальное увеличение	×1000000
Тип электронного эмиттера	Полевой (эмиттер Шоттки)
Габаритные размеры образцов – для фактографии – прочие образцы	Диаметр до 5 мм, длина до 80 мм; Диаметр (диагональ) до 30 мм, высота до 18 мм
Типы детекторов	ЭДС детектор для РФА, детекторы обратно рассеянных и вторичных электронов

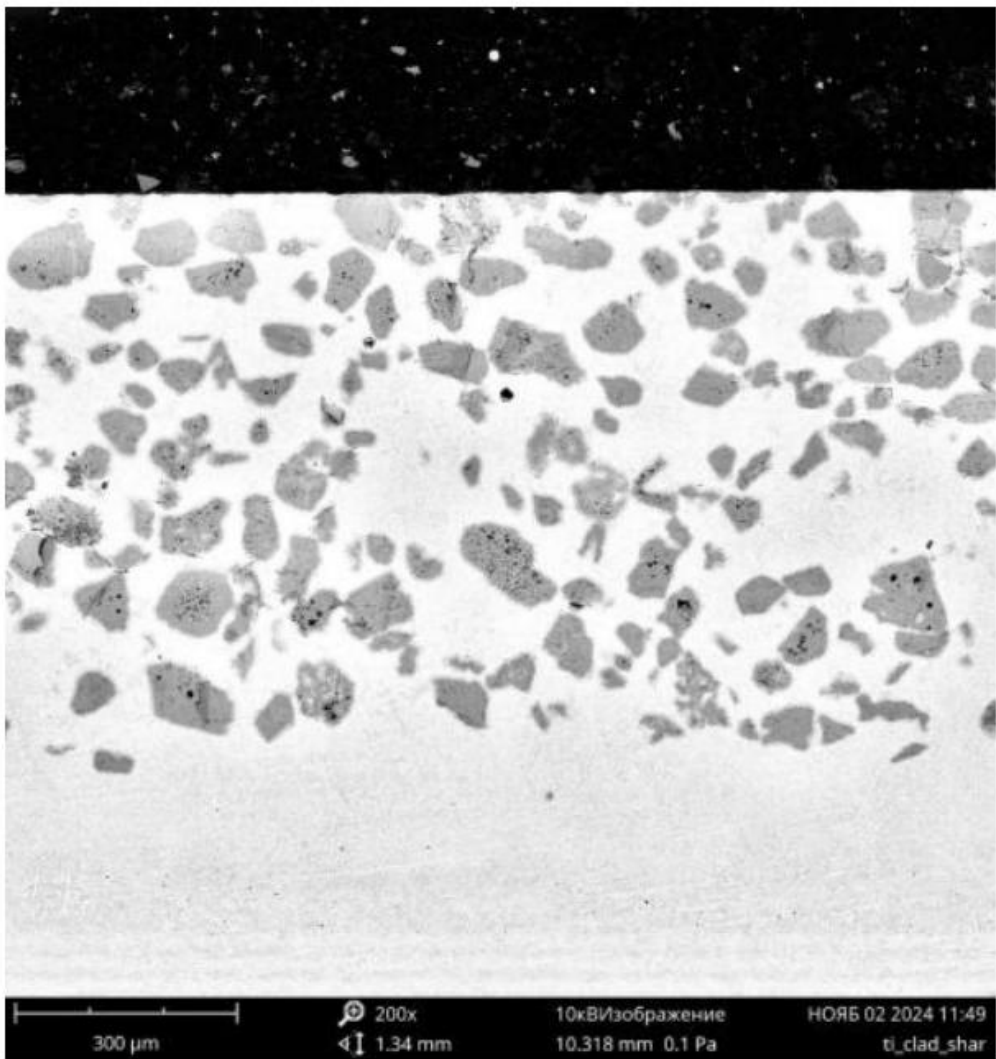


Рис. 3. Изображение наплавленного слоя на увеличении 200 ×

На увеличении $200\times$ четко видно структуру наплавленного слоя, мы наблюдаем частицы нитрида в титановой матрице на глубину 700 мкм от основания (рис. 3). Они имеют равномерное распределение по площади среза. Средняя площадь частиц нитрида составила $1948,42\text{ мкм}^2$, а суммарная $360458,30\text{ мкм}^2$ — 33% от анализируемого наплавленного слоя. Средняя длина частиц — $57,98\text{ мкм}$ (рис. 4, 5).

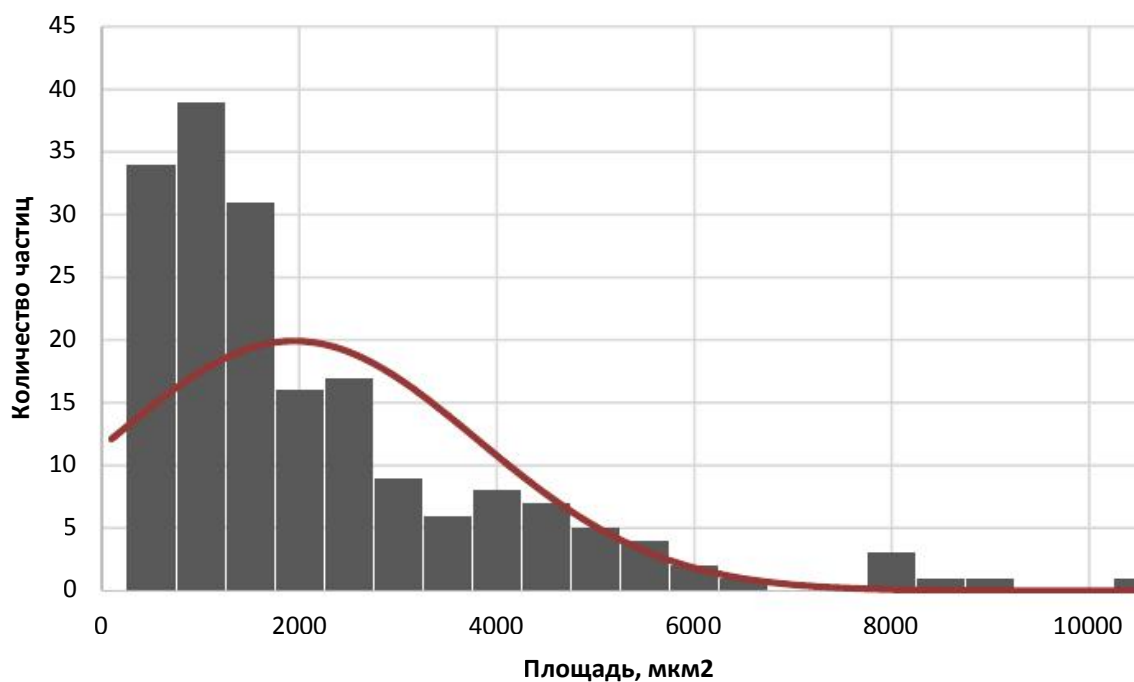


Рис. 4. График распределения частиц нитрида по площади

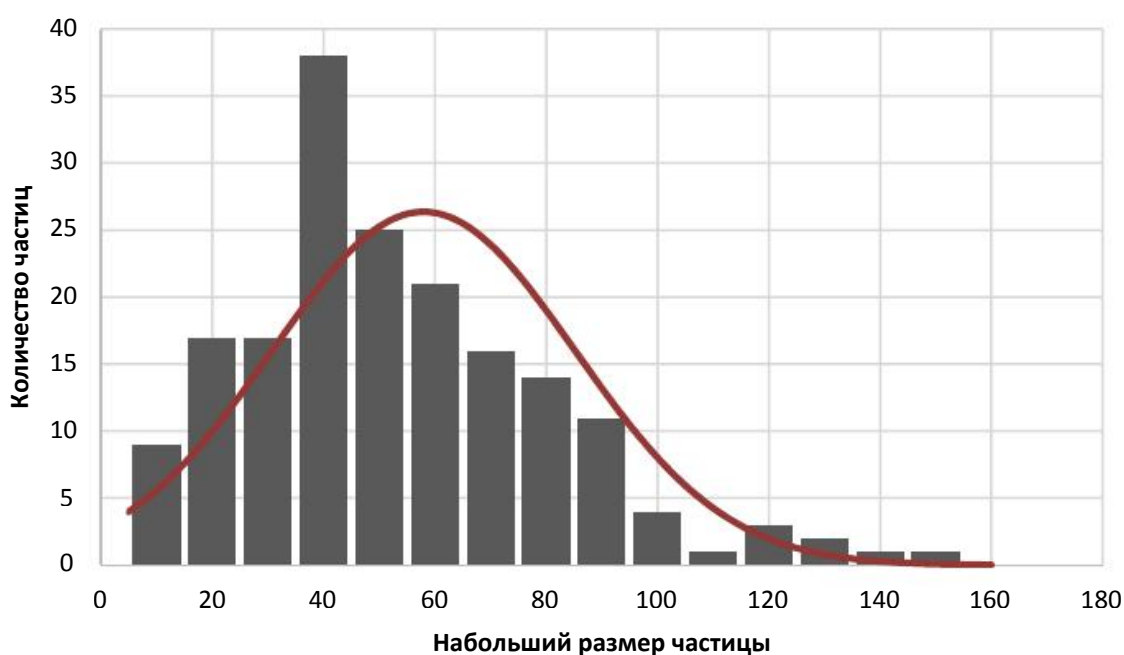
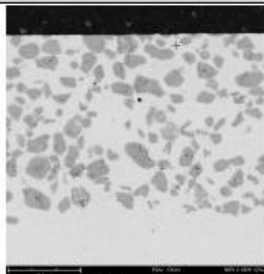
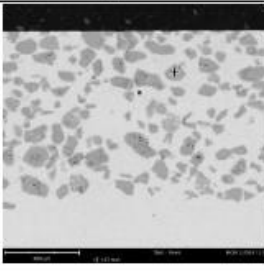
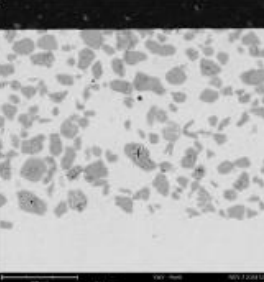
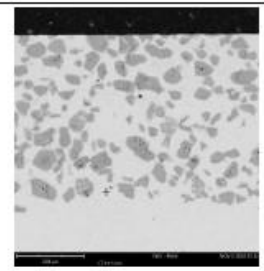
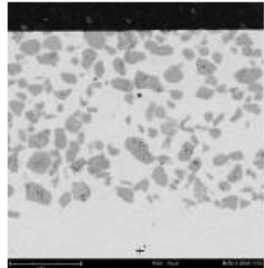


Рис. 5. График распределения частиц нитрида по длине

Таблица 6

Анализ в 5 точках наплавленного слоя

№	Изображение	Химический состав			
1		Номер элемента	Элемент	Атомная концентрация	Weight Conc.
		7	N	50,38	27,34
		22	Ti	35,68	66,17
		6	C	13,94	6,49
2		Номер элемента	Элемент	Атомная концентрация	Weight Conc.
		7	N	71,11	47,75
		22	Ti	20,72	47,54
		6	C	8,17	4,70
3		Номер элемента	Элемент	Атомная концентрация	Массовая концентрация
		7	N	58,17	32,58
		22	Ti	32,87	62,93
		6	C	8,68	4,17
		14	Si	0,28	0,31
4		Номер элемента	Элемент	Атомная концентрация	Массовая концентрация
		7	N	48,80	27,88
		22	Ti	32,16	62,79
		6	C	19,04	9,33
5		Номер элемента	Элемент	Атомная концентрация	Массовая концентрация
		22	Ti	63,65	86,82
		6	C	35,79	12,25
		28	Ni	0,56	0,93

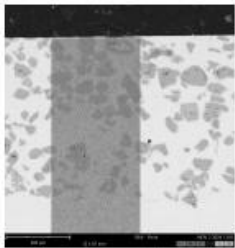
Обсуждение результатов. После анализа изображений было выявлено, наплавленный слой имеет толщины 700 мкм и представляет из себя титановую матрицу с частицами нитрида. Частицы имеют различную форму (преимущественно округлую) и по размерам близки к нормальному распределе-

нию. При наведении на нитрид электронный микроскоп фиксирует повышенное содержание N до 70 %.

При рассмотрении атомарной концентрации наплавленного слоя по площади наплавки выявлено, что слой состоит преимущественно из нитридов (52,60 %) и титана (34,54 %), что свидетельствует о высокой степени насыщения покрытия основным функциональным компонентом — нитридом титана (TiN). Это подтверждает успешность выбранной технологии наплавки в обеспечении требуемых эксплуатационных свойств покрытия, таких как высокая твердость, износостойкость и устойчивость к коррозии, высоким температурами и агрессивным средам (табл. 6, 7).

Таблица 7

Анализ зоны основного металла

№	Изображение	Химический состав			
		Номер элемента	Элемент	Атомная концентрация	Массовая концентрация
6		22	Ti	89,50	97,14
		6	C	10,50	2,86
7		7	N	52,60	28,53
		22	Ti	34,54	64,02
		8	O	9,09	5,63
		6	C	3,69	1,72
		14	Si	0,09	0,09

Состав наплавленного слоя соответствует требуемым характеристикам для обеспечения надежной работы седельного кольца. Высокое содержание нитридов и титана обеспечивает покрытие оптимальные механические и эксплуатационные свойства.

Заключение. В результате проведенного исследования установлена высокая эффективность применения технологии лазерной наплавки для нанесения износостойкого покрытия на основе нитрида титана на седельное кольцо шарового крана из сплава ВТ6. Проведенный анализ микроструктуры и химического состава наплавленного слоя показал равномерное распределение нитридных включений в титановой матрице, отсутствие пор и расслоений, а также высокую степень насыщения функциональным компонентом — нитридом титана.

Микротвердость покрытия значительно превышает твердость основного материала: титановой матрицы — до 750 HV, частиц нитрида — более 1100 HV, с отдельными значениями до 1500 HV. Это обеспечивает существенное

повышение износостойкости поверхности, что особенно важно для условий эксплуатации в агрессивной среде автоклавного выщелачивания.

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения лазерной наплавки с коаксиальной подачей порошка для локального упрочнения ответственных элементов трубопроводной арматуры. Используемая технология обеспечивает прецизионное нанесение покрытий, снижает зону термического влияния и позволяет добиться требуемых эксплуатационных характеристик. Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация состава порошка и режимов наплавки для повышения ресурса изделий в реальных условиях эксплуатации.

Список источников

- [1] Попова Е.В., Тарасова Т.В., Смуров И.Ю., Сарбаев Б.С. Применение лазерной наплавки для устранения дефектов в титановых сплавах. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 03. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_17874581_94359567.pdf (дата обращения 15.09.2025).
- [2] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
- [3] Татаринов Е.А. Лазерная наплавка элементов запорной арматуры. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2015, № 11, с. 101–104.
- [3] Горунев А.И., Гильмутдинов А.Х. Упрочнение и наплавка волоконным лазером как способы целенаправленного формирования структуры и свойств титанового сплава ВТ6. *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*, 2015, № 4, с. 41–44. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-4-40-44>
- [4] Полосков С.С. Проблемы наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры и пути их решения. *Вестник Донского государственного технического университета*, 2019, т. 19, № 4, с. 349–356.