В. И. Проскуряков, И. В. Родионов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ЛЕГИРУЮЩЕЙ ОБМАЗКИ НА ИЗМЕНЕНИЕ
СТРУКТУРЫ И МИКРОТВЕРДОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X18H10T***

Саратовский государственный технический университет

им. Ю. А. Гагарина, Россия, г. Саратов

e-mail: Prosku.94@mail.ru

Статья посвящена экспериментальному анализу влияния процесса лазерного импульсного легирования в слое легирующей обмазки на качественные и физико-механические характеристики модифицированной поверхности нержавеющей хромоникелевой стали аустенитного класса 12X18H10T. Установлено, что использование в качестве легирующей обмазки графитовой пасты приводит к существенному повышению микротвердости, изменению микроморфологии и образованию в приповерхностном слое стали зоны термического упрочнения. Выявлено сглаживание границ структурных изменений и определен эффект упрочнения поверхности при добавлении в легирующую обмазку мелкодисперсного порошка диоксида титана (анатаза). С помощью полученных данных проведен сравнительный анализ зависимости микротвердости модифицированной поверхности от напряжения лампы накачки и диаметра пятна лазерного импульса. Максимальное

© Проскуряков В. И., Родионов И. В., 2020.

* Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ (конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре – «Аспиранты»), проект № 19-33-90101.

значение микротвердости, равное 9,56 ГПа, было достигнуто в результате лазерной обработки серии образцов, где в качестве предварительной подготовки поверхности наносили графитовую пасту. Рекомендованы рациональные технологические режимы лазерной модификации поверхности стали 12Х18Н10Т, предварительно прошедшей абразивноструйную обработку, режимы лазерного импульсного легирования в слое графитовой обмазки и лазерного импульсного легирования стали в слое обмазки, состоящей из графитовой пасты и порошка анатаза в соотношении 4:1 соответственно.

Ключевые слова: лазерное импульсное легирование, легирующая обмазка, нержавеющая сталь, микроструктура, микротвердость.

V. I. Proskuryakov, I. V. Rodionov

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION
OF THE ALLOYING COVERING ON THE CHANGE IN THE STRUCTURE
AND MICROHARDNESS OF STAINLESS STEEL 12KH18N10T**

Yuri Gagarin Saratov state technical University, Russia, Saratov

The article is devoted to the experimental analysis of the influence of the process of laser pulsed alloying in a layer of alloying mixture on the qualitative and physical and mechanical characteristics of the modified surface of stainless chromium-nickel steel of the austenitic class 12Cr18Ni10T. It was found that the use of graphite paste as an alloying compound leads to a significant increase in microhardness, a change in micromorphology, and the formation of a heat hardening zone in the near-surface layer of steel. The smoothing of the boundaries of structural changes is revealed and the effect of surface hardening is determined when a finely dispersed powder of titanium dioxide (anatase) is added to the alloying coating. According to the data obtained, a comparative analysis of the dependence of the microhardness of the modified surface on the voltage of the pump lamp and the diameter of the laser pulse spot is carried out. The maximum microhardness value, equal to 9,56 GPa, was achieved as a result of laser processing of a series of samples, where graphite paste was applied as a preliminary surface preparation. Rational technological modes of laser modification of the surface of 12Cr18Ni10T steel that have previously undergone abrasive blasting, modes of laser pulsed alloying in a layer of graphite coating and laser pulsed alloying of steel in a layer of coating consisting of graphite paste and anatase powder in a ratio of 4:1, respectively, are recommended.

Keywords: laser pulsed alloying, alloying coating, stainless steel, microstructure, microhardness.

Актуальность применения ресурсосберегающих методов упрочнения рабочих поверхностей ответственных элементов и деталей машиностроения сохраняется в связи с высокими требованиями к качеству рабочей поверхности и экономической эффективности технологического процесса. К высокоэффективным методам модификации относится лазерное импульсное легирование с предварительным нанесением на обрабатываемую поверхность специально подготовленной легирующей обмазки. Указанный способ обработки характеризуется рядом преимущественных факторов, например, относительно низкими энергозатратами, минимизацией расходуемых материалов, возможностью варьирования полученными свойствами в широком диапазоне, а также локальностью процесса обработки [1–3].

Известно, что в качестве компонентов легирующей обмазки зачастую используют смесь различных металлических или керамических порошковых материалов, а также жидкую суспензию для улучшения адгезии смешанной массы с поверхностью обрабатываемого материала. К основным легирующим компонентам, входящим в состав обмазок, следует отнести: углерод (C), повышающий прочностные характеристики; борный ангидрид (B_2O_3), вызывающий образование боридов, обладающих высо-

кой объемной прочностью и твердостью; оксид хрома (Cr_2O_3), повышающий трещиностойкость. Дополнительно следует отметить способы лазерной обработки, где в качестве основных легирующих элементов использовались молибден, хром и вольфрам, также приводящие к повышению прочности обрабатываемых поверхностей [4–10].

Несмотря на большое количество проведенных аналитических и экспериментальных исследований методов лазерного импульсного легирования остаются не до конца рассмотрены и изучены вопросы структурообразования модифицированных поверхностных слоев, механизмов возникновения зон термических превращений и их зависимость от режимов импульсного воздействия лазера.

Опытные образцы были изготовлены из нержавеющей хромоникелевой стали аустенитного класса 12Х18Н10Т в виде квадратных пластин размерами 10×10 и толщиной 3 мм. Образцы подвергались предварительной воздушно-абразивной обработке порошком электрокорунда дисперсностью 150–250 мкм при избыточном давлении воздуха 0,4–0,6 МПа для создания исходной микрошероховатости поверхности и эффективного удержания слоя обмазки. После абразивноструйной обработки образцы подвергались последующей очистке от

технологических загрязнений с использованием ультразвуковой ванны «Кристалл-2.5» в водном растворе этилового спирта в течение 20 минут. В качестве легирующей обмазки использовались графитовая паста (ГОСТ 8295–73) и порошок диоксида титана (с кристаллической решеткой анатаза) дисперсностью 20–25 нм. Обмазку наносили на поверхность опытных образцов равномерным слоем толщиной 150 ± 50 мкм.

Лазерную обработку проводили на автоматизированной установке для термофизической когерентной модификации поверхности LRS-50A при напряжении импульса $U=250, 300, 350, 400$ и 450 В и длительности 0.5 мс. Луч фокусировался в пятно диаметром $0,5$ и 1 мм на поверхности нанесенной обмазки. Обработка осуществлялась при частоте сканирования 20 Гц и коэффициенте перекрытия $0,2$.

Морфология и микроструктура модифицированного поверхностного слоя исследовались методом оптической микроскопии с использованием микроскопа «МБС-10М» и оптической системы микротвердомера «ПМТ-3М».

Для определения механических свойств опытных образцов были проведены измерения микротвердости модифицированной поверхности методом Виккерса с использованием микротвердомера «ПМТ-3М» при нагрузке на индентор $1,9614$ Н (ГОСТ 9450–76).

Для определения влияния легирующих ком-

понентов обмазки на модифицированную поверхность были проведены три серии экспериментального исследования:

1. Лазерная обработка поверхности после предварительной абразивноструйной обработки (ЛО+АСО).

2. Лазерная обработка образцов с микрошероховатой поверхностью и нанесенной графитовой пастой (ЛО+АСО+Гр).

3. Лазерная обработка микрошероховатой поверхности с нанесенной графитовой пастой и добавлением диоксида титана (ЛО+АСО+Гр+Ан).

Согласно полученным результатам исследования микроморфологии, установлены некоторые сходства для каждой серии образцов. Так, например, пороговое значение напряжения заданного импульса 250 В приводит к незначительному изменению цвета побежалости поверхностей образцов, а максимально установленное напряжение 450 В для каждой серии приводит к заметному оплавлению поверхности. При лазерной обработке в интервале напряжения 300 – 400 В поверхность характеризуется формированием упорядоченной ячеистой структуры с четко выраженными границами кратеров, зависящими от геометрических параметров лазерного луча и коэффициента перекрытия. Следует отметить, что при напряжении импульса 400 В наблюдается размытость границ образовавшихся кратеров (рис. 1).

Рис. 1. Морфология поверхности образцов при напряжении импульса 400 В и диаметре пятна импульса $0,5$, где а – серия (ЛО+АСО); б – серия (ЛО+АСО+Гр); в – серия (ЛО+АСО+Гр+Ан)

Исследования микроструктуры опытных образцов также показали определенную схожесть результатов. Для каждого образца всех трех серий лазерной обработки характерно образование модифицированного поверхностного слоя, толщина которого не превышает 7 – 8 мкм, и зоны термического влияния, толщина которой варьируется в диапазоне 50 – 180 мкм и сильно зависит от параметров импульсного воздействия. Также выявлено, что серия образ-

цов, где в качестве легирующей обмазки используется смесь графитовой пасты и порошка анатаза, характеризуется неоднородным формированием зоны термического влияния (рис. 2, в).

Отмечена особенность протекания термодиффузионных процессов для серии образцов (ЛО+АСО+Гр), которая заключается в проявлении четкой граница основы стального образца и зоны термического влияния (рис. 2 б).

Рис. 2. Микроструктура поверхности образцов при напряжении импульса 400 В и диаметре пятна импульса 0,5, где *а* – серия (ЛО+АСО); *б* – серия (ЛО+АСО+Гр); *в* – серия (ЛО+АСО+Гр+Ан)

Дополнительно проведенные результаты измерения микротвердости показали, что в результате лазерной импульсной обработки об-

разцов всех серий значение микротвердости модифицированной поверхности существенно возрастает (таблица).

Микротвердость поверхности при разных способах обработки

Способ обработки	Режимы ЛО		Микротвердость поверхности	
	ø, мм	U, В	200 кгс	
			HV	H, GPa (±0,1)
ЛО + АСО	0,5	250	296	2,90
		300	298	2,92
		350	286	2,8
		400	966	9,47
		450	–	–
	1	250	853	8,37
		300	296	2,9
		350	323	3,17
		400	456	4,47
		450	381	3,74
ЛО + АСО + Графитовая паста	0,5	250	784	7,69
		300	334	3,28
		350	360	3,53
		400	975	9,56
		450	–	–
	1	250	875	8,58
		300	481	4,72
		350	544	5,34
		400	476	4,67
		450	400	3,92
ЛО + АСО + Графитовая паста + Анализ (соотношение 4/1)	0,5	250	384	3,76
		300	311	3,05
		350	686	6,73
		400	684	6,71
		450	–	–
	1	250	660	6,47
		300	570	5,39
		350	360	3,53
		400	352	3,45
		450	311	3,05

Наиболее высокие показатели микротвердости были получены в результате лазерного импульсного легирования нержавеющей стали с использование графитовой обмазки. Вероятно, полученный результат вызван диффузией в поверхностные слои содержащегося в графитовой обмазке углерода, способствующего образованию и развитию закалочных структур.

В результате проведенного экспериментального исследования было установлено, что после лазерной импульсной обработки при каждом способе предварительной подготовки поверхности на нержавеющей стали 12X18H10T формируется тонкий упрочненный модифицированный слой с оптически выраженной зоной термического изменения. Указанные особенности зависят от параметров процесса лазерной модификации, а именно от напряжения импульса и диаметра лазерного импульса, сфокусированного в пятно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Минаков, Н. В. Влияние лазерной обработки на структуру и свойства поверхностных слоев деформируемого титанового сплава ОТ4, легированного В, Nb, С / Н. В. Минаков // Электронная микроскопия и прочность материалов. Серия: Физическое материаловедение, структура и свойства материалов. – 2018. – № 24. – С. 59–64.
2. Гиржон, В. В. Структура поверхностных слоев силумина после импульсного лазерного легирования кобальтом и никелем / В. В. Гиржон, В. Н. Ковалева // Физика и химия обработки материалов. – 2015. – № 1. – С. 85–90.
3. Piasecki, A., Kotkowiak, M., Kulka, M. Self-lubricating surface layers produced using laser alloying of bearing steel // Wear. 2017. Т. 376. С. 993–1008.
4. Ким, В. А. Локальное лазерное легирование нержавеющей стали 12X18H10T / В. А. Ким, О. В. Башков, И. В. Сатаева // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2016. – Т. 1. – № 2. – С. 64–70.
5. Yamaguchi T., Hagino H. Formation of a titanium-carbide-dispersed hard coating on austenitic stainless steel by laser alloying with a light-transmitting resin // Vacuum. – 2018. – Т. 155. – С. 23–28.
6. Белова, С. А. Формирование структуры поверхностных слоев сталей при лазерном легировании / С. А. Белова, М. С. Калашникова, В. С. Постников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2010. – Т. 12. – № 2. – С. 93–104.
7. Гиржон, В. В. Структура поверхностных слоев доэвтектического силумина после лазерного легирования смесью порошков меди и кобальта / В. В. Гиржон, В. Н. Ковалева, А. В. Смоляков // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – № 37, № 5. – С. 703–712.
8. Антропов, А. В. Моделирование лазерной обработки и определение рациональных режимов / А. В. Антропов [и др.] // Современные материалы и технологии. – 2020. – С. 167–170.
9. Гаврилов, Г. Н. Технологические особенности лазерного легирования сталей / Г. Н. Гаврилов [и др.] // Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии. Теория и практика. – 2015. – С. 66–71.
10. Говоров, И. В. Повышение контактной прочности функциональных поверхностей стальных изделий при лазерной обработке / И. В. Говоров // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – № 2. – С. 10.