В. И. Проскуряков, И. В. Родионов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ
ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ В СЛОЕ ОБМАЗКИ***

Саратовский государственный технический университет

им. Ю. А. Гагарина

e-mail: Prosku.94@mail.ru

В работе описано экспериментальное исследование лазерной импульсной модификации поверхности нержавеющей хромоникелевой стали аустенитного класса 12X18H10T с предварительно нанесенной на нее графитовой обмазкой. Определялась микротвердость обработанной поверхности и ее зависимость от режимов лазерного излучения. Методом истирания исследовалось изменение износостойкости модифицированного слоя и возможность ее повышения. Для количественной оценки стойкости поверхности к изнашиванию проведен гравиметрический анализ образцов, подвергшихся шаровому истиранию, результаты которого полностью согласуются с проведенным расчетом безразмерного показателя износостойкости. Установлено, что на величину микротвердости в большей степени влияет напряжение импульсов. Так, наибольшие показатели микротвердости отмечены при обработке лазерными импульсами в диапазонах напряжений 250–280 В и 340–440 В и принимают значения 5–6 ГПа и 4–5 ГПа соответственно. Комплексное исследование устойчивости к истиранию, включающее расчет безразмерного показателя износостойкости и анализ потери массы стальных образцов, в результате теста показало, что, в наибольшей степени эффект упрочнения поверхности характерен для образцов, подвергшихся обработке лазерными импульсами, сфокусированными в пятно диаметром 1 мм при напряжении импульса в диапазоне 300–400 В.

Ключевые слова: лазерное импульсное легирование, легирующая обмазка, нержавеющая сталь, микротвердость, износостойкость, гравиметрический анализ.

V. I. Proskuryakov, I. V. Rodionov

**STUDY OF CHANGE IN WEAR RESISTANCE OF STAINLESS STEEL SURFACE
OBTAINED BY LASER PULSE ALLOYING IN THE COATING LAYER**

Yuri Gagarin Saratov state technical University, Russia, Saratov

The paper describes an experimental study of laser pulsed modification of the surface of stainless chromium-nickel steel of the austenitic class 12Cr18Ni10T with a graphite coating previously applied to it. The microhardness of the treated surface and its dependence on the modes of laser radiation were determined. The abrasion method was used to study the change in the wear resistance of the modified layer and the possibility of its increase. For a quantitative assessment of the surface resistance to wear, a gravimetric analysis of samples subjected to ball abrasion was carried out, the results of which are fully consistent with the calculation of the dimensionless wear resistance index. It was found that the value of the microhardness is largely influenced by the voltage of the pulses. Thus, the highest

© Проскуряков В. И., Родионов И. В., 2021.

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

microhardness indicators were observed during processing by laser pulses in the voltage ranges of 250–280 V and 340–440 V and take values of 5–6 GPa and 4–5 GPa, respectively. A comprehensive study of abrasion resistance, including the calculation of a dimensionless wear resistance index and an analysis of the weight loss of steel samples as a result of the test, showed that, to the greatest extent, the surface hardening effect is characteristic of samples subjected to treatment with laser pulses focused into a spot 1 mm in diameter at a pulse voltage of range 300–400 V.

Keywords: laser pulsed alloying, alloying coating, stainless steel, microhardness, gravimetric analysis.

Повышение долговечности и эксплуатационной надежности механических узлов и ответственных деталей машин была и остается одной из актуальных проблем современного машиностроения. Особого внимания в данном вопросе заслуживают стальные изделия, работающие в условиях интенсивного гидро- и газоабразивного изнашивания, например, шнеки осадительных центрифуг, затворные элементы гидро- и газо-запорной регулирующей арматуры, лопатки газотурбинных двигателей и т. д. Зачастую вышеперечисленные детали и механизмы изготавливаются из нержавеющей стали и относятся к классу непрерывного действия, функционирующих под воздействием агрессивных сред с широким диапазоном размеров твердых частиц, воздействующих на них и приводящих к преждевременному изнашиванию [1–3].

В данном случае, основной потенциальной проблемой считается износ рабочей поверхности, решить которую можно за счет поверхностного упрочнения стальных изделий. Следует отметить, что традиционные методы термической закалки нержавеющей стали аустенитного класса в виду низкого содержания в ней углерода не достаточно эффективны [4].

Известно множество способов упрочнения и повышения износостойкости деталей из нержавеющей стали типа шнеков или лопатки турбин, в основе которых лежат процессы наплавки или плазменного напыления. Однако проведение подобных технологических операций связано с высокой трудоемкостью, негативным воздействием на окружающую среду и необходимостью применения большого количества дополнительных расходуемых материалов и энергоресурсов, в ряде случаев требуется финишная токарная обработка уже модифицированной поверхности [5–7].

Сегодня наибольшую актуальность находят способы лазерного поверхностного упрочнения, а именно способы легирования поверхности в слое предварительно нанесенной обмазки. Это объясняется рядом преимуществ, среди которых особенно следует подчеркнуть возможность варьирования полученными свойствами в большом диапазоне за счет регулировки ха-

рактеристик лазерных импульсов, а также компонентного состава и способа нанесения обмазки. Также среди ярко выраженных достоинств данного способа упрочнения можно выделить локальность технологического воздействия и возможность обработки отдельных функциональных поверхностей конструкций с экономией общего времени технологической операции и расходуемых материалов [8–10].

В связи с этим были проведены экспериментальные исследования лазерной импульсной обработки нержавеющей стали с предварительно нанесенной на ее поверхность графитовой обмазкой. Цель исследований заключалась в установлении влияния режимов импульсного воздействия на микротвердость и износостойкость модифицированной поверхности.

В качестве исследуемого материала была взята нержавеющая сталь марки 12X18H10T. Образцы представляли квадратные пластины 10×10 и толщиной 3 мм. С целью повышения химической активности поверхности и наиболее эффективного удержания обмазки опытные образцы подвергались предварительной воздушно-абразивной обработке порошком электрокорунда дисперсностью 150–250 мкм при избыточном давлении воздуха 0,4–0,6 МПа. От технологических загрязнений образцы очищали с использованием ультразвуковой ванны «Кристалл-2.5» в водном растворе этилового спирта в течение 20 минут.

В качестве легирующей обмазки использовалась графитовая паста (ГОСТ 8295–73), которая наносилась на поверхность опытных образцов равномерным слоем толщиной 250±50 мкм.

Лазерную обработку проводили на автоматизированной установке для термофизической когерентной модификации поверхности LRS-50A при напряжении импульса 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.

Микротвердость модифицированной поверхности определялась методом Виккерса с использованием микротвердомера «ПМТ-3М»

при нагрузке на индентор 0,9807 Н (ГОСТ9450–76). Статистическая обработка результатов измерения проводилась с использованием программного продукта «DataFit9».

Морфология модифицированной поверхности исследовалась методом оптической микроскопии с использованием микроскопа «Olympus BX51».

Определение износостойкости модифицированных поверхностей методом шарового истирания производилось на приборе «Calotest, CSM Instruments». Истирание проводилось путем контакта обработанной поверхности опытных образцов с вращающимся твердосплавным шариком диаметром 25 мм в течении 5 минут при частоте вращения шпинделя 400 об/мин. при наличии в тестовой зоне суспензии с алмазными частицами абразива размером 0,5–1 мкм.

Характеристикой износостойкости служил диаметр отпечатка, оставленного шариком в ходе истирания. Износостойкость рассчитывалась согласно известным рекомендациям Р 50-95-88 по определению износостойкости I и класса износостойкости KI [11].

Для оценки потери массы образцов в результате истирания был проведен гравиметрический анализ методом количественного измерения с использованием многофункциональных весов марки МЛ В1Ж «Ньютон ЛС».

Согласно результатам измерения микротвердости было установлено, что при обработке лазерными импульсами в диапазоне напряжения лампы накачки 280–320 В значение микротвердости поверхности варьирует в диапазоне 3,5–4 ГПа. Максимальные показатели микротвердости были отмечены при обработке с заданными значениями напряжения 250 и 280 В и составляли 5 и 6 ГПа соответственно. Как показывают результаты измерения, варьирование диаметра фокусировки пятна от 0,5 мм до 1 мм на изменение исследуемых показателей существенно не влияет. Следует отметить, что микротвердость исходной поверхности нержавеющей стали составляет 170 HV или 1,5–1,6 ГПа.

По результатам измерений была построена эмпирическая модель зависимости микротвердости нержавеющей стали от параметров лазерной импульсной обработки (рис. 1).

Рис. 1. Зависимость микротвердости стальных образцов от параметров лазерного импульсного воздействия

Построенная эмпирическая модель описывается регрессионным уравнением:

$$H = 101751,5 + 0,17 / x_1 + (-66341,1) \times \ln(x_2) + 16167,162654437 \times \ln(x_2)^2 + (-1744,7) \times \ln(x_2)^3 + 70,32 \times \ln(x_2)^4,$$

где x_1 – диаметр пятна излучения (ϕ , мм); x_2 – напряжение (U , В).

При этом коэффициент множественной детерминации R^2 достигал ≈ 0.70 , т.е. полученная математическая модель на 70 % удовлетворяла экспериментальным данным.

Для изучения и оценки характера износа поверхности были подготовлены оптико-ком-

пьютерные микроизображения области съема поверхностного слоя в результате теста шаровым истиранием (рис. 2).

Результаты полученных в ходе теста отпечатков, расчетов безразмерных показателей износостойкости и определение класса и разрядности износостойкости представлены в таблице (табл. 1).

Рис. 2. Износ поверхности образца, прошедшего обработку при напряжении импульсов 450 В и диаметре пятна 0,5 мм

Таблица 1

Результаты исследования износостойкости

Режимы лазерной обработки		Диаметр отпечатка D на поверхности образца в результате теста, мкм	Линейная величина износа ΔH , мкм	Износостойкость I	Класс / разрядность KI
$\varnothing$, мм	U, В				
0,5	250	1358,7	1,84	$5,66775 \times 10^6$	6/4
	300	1272,9	1,61	$6,46066 \times 10^6$	6/5
	350	1200,3	1,44	$7,2597 \times 10^6$	6/5
	400	1117,9	1,24	$8,37933 \times 10^6$	6/5
	450	1494,4	2,23	$4,68212 \times 10^6$	6/4
1	250	1147,8	1,31	$7,94652 \times 10^6$	6/5
	300	1053,4	1,10	$9,42937 \times 10^6$	6/5
	350	937,9	8,78	$1,190967 \times 10^7$	7/1
	400	880,7	7,74	$1,350305 \times 10^7$	7/1
	450	887,1	7,87	$1,329069 \times 10^7$	7/1

Определение класса износостойкости позволяет косвенно определить жизненный цикл триботехнического изделия от проектирования до ремонта. Установленные классы износостойкости КИ 7-6 модифицированной поверхности можно сопоставить с такой изнашиваемой деталью, как тормозная колодка, трущаяся о тормозной барабан. Известно, что КИ 5/2 характерен для резцов (точения на токарном станке), изготовленных из минералокерамики ЦМ-332 или твердого сплава ВК-8, режущих Сталь 0 или Сталь углеродистую соответственно.

Дополнительно были проведены гравиметрические исследования тестируемых образцов с

целью определения потери массы в результате истирания и количественной оценки износостойкости (табл. 2).

Согласно результатам измерения износостойкости, наименьшие потери массы образцов 0,0028 и 0,0019 зафиксированы при режимах обработки I_{400} и I_{450} соответственно, где I – диаметр сфокусированного в пятно лазерного импульса (мм), 400 – напряжение импульса (В). Наибольшее значение потери массы 0,0115 г характерно для образца $0,5_{450}$. При указанном режиме наименьший показатель износостойкости коррелирует с микротвердостью, которая не превышает 4 ГПа.

Таблица 2

Результаты гравиметрического анализа опытных образцов после истирания

Режимы лазерной обработки		Масса образца, г		
ø, мм	U, В	После лазерной обработки	После истирания	Потеря массы
0,5	250	1,6427	1,6336	0,0091
	300	2,2115	2,2030	0,0085
	350	1,8525	1,8444	0,0081
	400	1,4966	1,4920	0,0046
	450	3,5799	3,5684	0,0115
1	250	2,7120	2,7070	0,0050
	300	2,6404	2,6369	0,0035
	350	3,3131	3,3103	0,0028
	400	3,3131	3,3111	0,0019
	450	2,8859	2,8836	0,0022

Таким образом, исследования изменения механических характеристик поверхности показали, что метод лазерной импульсной обработки в слое графитовой обмазки приводит к повышению микротвердости и износостойкости нержавеющей стали. Упрочнение поверхности связано с диффузией в поверхностные слои содержащегося в графитовой обмазке углерода, способствующего образованию и развитию закалочных структур. К наиболее рациональным технологическим режимам лазерного упрочнения, рассматриваемым в работе, следует отнести режимы I_{400} и I_{450} , обеспечивающие повышенные показатели микротвердости (~ 5 ГПа) и износостойкости поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Круцило, В. Г. Эксплуатационные испытания турбинных лопаток, упрочненных термопластическим методом / В. Г. Круцило, Н. Б. Кротинов // VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. – 2011. – № 3–1 (27). – С. 380–383.
2. Еремин, Е. Н. Влияние карбида бора на свойства наплавленного металла на основе дисперсионно-твердеющей хромоникелевой стали / Е. Н. Еремин [и др.] // Омский научный вестник. – 2017. – № 4 (154).
3. Кравченко, И. Н. Обоснование рациональных режимов нанесения плазменных покрытий на детали декантерных центрифуг перерабатывающих производств АПК /

И. Н. Кравченко [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2019. – № 11. – С. 43–48.

4. Obeidi M. A. et al. Laser surface texturing of stainless steel 316L cylindrical pins for interference fit applications // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Т. 252. С. 58–68.

5. Тарельник, В. Повышение экологической безопасности формирования износостойких покрытий на поверхностях деталей типа тел вращения из стали 12Х18Н10Т с применением комбинированной технологии на основе электроискрового легирования / В. Тарельник [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2020. – Т. 56. – № 5. – С. 115–127.

6. Pradhan K. K., Matawale C. R. Heat treatment analysis of SS304 for gas turbine application // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Т. 33. – С. 5734–5739.

7. Bogdanovich V. E., Giorbelidze M. G. Increment of steam turbine blades service life by means of erosion-resistant plasma coating deposition with meso-ordered structure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2020. Т. 986. №. 1. С. 012062.

8. Murzin S. P. et al. Improving tribological properties of stainless steel surfaces by femtosecond laser irradiation // Coatings. 2020. Т. 10. №. 7. С. 606.

9. 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.

10. F. Laroudie, C. Tassin, M. Pons Hardening of 316L stainless steel by laser surface alloying J. Mater. Sci., 30. 1995. С. 3652–3657.

11. Р 50-95-88 Рекомендации. Обеспечение износостойкости изделий. М.: Гос.комитет СССР по стандартам, 1989. – 25 с.