

**Ключевые слова:**

лазерная наплавка, упрочняющая фаза, нанопорошки, износостойкость, склерометрирование

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ

Владимир БИРЮКОВ

Представлена методика определения износостойкости покрытий систем NiCrBSi и NiCrBSi + TiC при лазерной наплавке с помощью склерометрирования. Показано, что превышение плотности энергии лазерного излучения приводит к резкому снижению коэффициента износостойкости при лазерной наплавке в результате проплавления материала основы.

Для восстановления поверхностей трения деталей машин с использованием лазерного излучения применяют порошки на никелевой основе. Упрочняющими фазами таких покрытий могут быть карбиды Cr₂₃C₆, Cr₇C₂, CrB, Cr₂B, Cr₇C₃ [1,2] или высокопрочные карбиды вольфрама WC, хрома Cr₃C₂, кремния SiC, титана TiC и др. Это позволяет получать крупные первичные или более мелкие вторичные карбиды этих элементов [3].

Упрочняющие фазы NiCrBSi покрытий имеют большие значения твердости по сравнению с матрицей и вносят существенный вклад в общую твердость покрытий. Однако наличие таких фаз в структуре покрытия может неоднозначно влиять на его износостойкость. Известно, что под действием абразивного зерна крупные карбиды склонны к локальной фрагментации [4]. Наличие крупных упрочняющих частиц может даже приводить к ускоренному износу [5]. Введение в состав хромоникелевого покрытия значительных количеств карбида титана может сопровождаться охрупчиванием покрытия [6]. В работе [7] композиционные покрытия NiCrBSi-TiC характеризовались пониженной способностью сопротивляться воздействию в условиях повторяющегося упругопластического деформирования. Это объяснялось наличием в покрытии крупных карбидов TiC, способствующих ускоренному трещинообразованию при пульсирующем механическом контакте.

В качестве материалов для покрытий были использованы порошки сплавов системы NiCrBSi гранулометрического состава 40–160 мкм – ПГ-CP2 (0,48% C; 14,8% Cr; до 5% Fe; 2,9% Si; 2,1% B; остальное – Ni) и порошка TiC гранулометрического состава 50–100 мкм в количестве 25 мас.% [8]. Газопо-

рошковая лазерная наплавка проводилась CO₂-лазером непрерывного действия при мощности излучения 1,4–1,6 кВт, скорости 160–180 мм/мин, расходе порошка 2,9–4,9 г/мин, размере лазерного пятна на поверхности 6 × 1,5 мм.

При лазерной наплавке порошков ПГ-CP2 и 75% ПГ-CP2 + 25% TiC микротвердость покрытий составила соответственно 520 ± 10 и 770 ± 60 HV 0,1. Формирование твердых упрочняющих фаз TiC (2500–2900 HV) и (Ti,Cr)(C,B) (~ 2000 HV) в покрытии 75% ПГ-CP2 + 25% TiC обуславливает резкое снижение интенсивности изнашивания в 2,2–2,5 раза по сравнению с покрытием ПГ-CP2 при испытании по корунду, твердость которого близка твердости карбидов, боридов и карбоборидов хрома и заметно уступает твердости карбида титана.

Металлокерамические порошки для наплавки содержали 60% карбида вольфрама и 40% порошок на основе никеля по массе [9]. Плазменную наплавку производили при напряжении 25 В и токе 140–160 А и расстоянии от торца плазматрона 14 мм при расходе порошка 25–30 г/мин и скорости перемещения 0,3–0,5 мм/с. Ширина наплавленных дорожек составляла 25–30 мм при толщине 4–6 мм. Испытание на абразивное изнашивание производили по стандарту США ASTM-G65-04. Абразивная износостойкость увеличилась в 2–5 раз, причем большие ее значения наблюдаются при увеличении содержания хрома от 8 до 14%. Твердость порошка на никелевой основе не превышала 50 HRC.

На образцы высокопрочной низколегированной стали Q550 с размерами 10 × 20 × 60 мм наносили порошковую обмазку толщиной 1,0 мм с использованием в качестве связующего спирта [10]. Химический состав

используемого порошка на основе никеля в весовых процентах: С 0,8–1,2%, В 3–3,5%, Si 3,5–4,0%, Cr 14–16%, Fe 14–15%. В состав шихты для обмазки вводили монокристаллический карбид вольфрама с размером частиц 100–200 мкм в количестве 20% по массе. Образцы высушивали при температуре 250 °С в течение 30 мин. Для лазерной наплавки использовали установку фирмы Laserline LDF4000-100 с длиной волны 980 нм и максимальной мощностью лазера 4,4 кВт. Размер лазерного пятна на поверхности образца составлял 17×1,5 мм, скорость перемещения луча – 3 мм/с. Расход аргона составлял 12 л/мин. Испытание на износ проводили на машине трения ММ-2000.

Покртия, полученные при мощности излучения 3,6 кВт, имеют износостойкость в 6,8 раза выше, чем материал основы образца.

Целью работы является определение коэффициента износостойкости покрытий в зависимости от химического состава шихты и режимов лазерной наплавки с помощью склерометрирования и испытаний на абразивное изнашивание.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАПЛАВКИ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводили на автоматизированном комплексе ИМАШ РАН [11]. Мощность излучения варьировали в пределах 800–1200 Вт, при скорости перемещения луча 5–10 мм/с. Удельная плотность мощности составляла 38–126 Вт·с/мм². Для наплавки были выбраны порошки на основе никеля с размером частиц 40–100 мкм марок ПР-НХ15СР2 и ПР-НХ17СР4. В качестве добавок использовали нанопорошки карбидов вольфрама и титана с размером частиц 20–100 нм. Образцы изготавливали из стали 40Х и чугуна ВЧ60-2 с размерами 15×20×60 мм. Толщина наплавленного слоя составляла 0,7–0,8 мм. Металлографические исследования выполняли с использованием микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н. Структура и химический состав наплавленных слоев исследовались на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH с системой энергодисперсионного анализа с применением режимов отраженных и вторичных электронов. Испытания на абразивное изнашивание проводили по схеме Бринелля – Хаворта [12]. К вращающемуся резиновому диску прижимался плоский образец с наплавленным покрытием или образец из основного материала с нагрузкой 15 Н. В зону трения подавался кварцевый песок с размером частиц 0,2–0,6 мм. Продолжительность испытаний составляла 10 мин. Кроме того, оценку коэффициента износостойкости покрытия и основного материала выполняли склерометрированием [13, 14]. Нагрузка на индентор при царапании составляла

0,98 Н на приборе ПМТ-3. Скорость перемещения алмазного индентора составляла 10 мм/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В первой серии экспериментов лазерную наплавку выполняли порошком ПР-НХ15СР2 на образцы из чугуна ВЧ60-2. В табл. 1 представлены результаты определения микротвердости и износостойкости по ширине царапины в сравнении с испытаниями на абразивное изнашивание при наплавке чугуна. Коэффициент износостойкости определялся из соотношения [13]:

$$K=C \cdot b/d,$$

где b – ширина царапины основного материала, d – ширина царапины наплавленного слоя, измеряемые в микрометрах. $C = 0,7–5,5$ – коэффициент, определяемый с учетом особенностей процесса лазерной наплавки (твердость покрытия, режимы обработки и добавки).

При лазерной наплавке образца № 2 глубина зоны оплавления основного материала не превышала 100 мкм. Зона наплавки образцов № 3 и 4 имеет пониженное значение микротвердости связанное с глубоким проплавлением основы на 0,4–0,5 и 0,7–0,8 мм соответственно, что вызвано превышением погонной энергии при обработке образцов.

Во второй серии экспериментов лазерную наплавку на образцы стали 40Х выполняли порошком ПР-НХ17СР4. При оптимальных режимах обработки получены значения микротвердости наплавленного покрытия 7840–10600 МПа. При этом коэффициент износостойкости при склерометрировании равен 10, а при испытании на абразивное изнашивание 10,3 (табл. 2).

Таблица 1. Определения коэффициента износостойкости при наплавке чугуна

№ п/п	Марка материала основы или порошка и микротвердость, МПа	Ширина царапины, мкм	Коэффициент С	Коэффициент износостойкости, расчет/эксперимент
1	Чугун ВЧ60-2, 3910–4380	35	1	1/1
2	ПР-НХ15СР2, 4950–5520	28	1,2	1,5/1,53
3	ПР-НХ15СР2 4680–5220	28,5	1	1,18/1,22
4	ПР-НХ15СР2 4390–4960	28,9	0,7	0,85/0,088

Таблица 2. Определения коэффициента износостойкости при наплавке стали 40X порошком ПР-НХ17СР4 и с добавками нанокарбида титана

№ п/п	Марка материала основы или порошка и микротвердость, МПа	Ширина царапины, мкм	Коэффициент, С	Коэффициент износостойкости, расчет/эксперимент
1	Сталь 40X, 1970–2260	40	1	1/1
2	ПР-НХ17СР4, 7840–10600	18	4,5	10/10,3
3	ПР-НХ17СР4, 7180–9640	19,2	3	6,25/6,2
4	ПР-НХ17СР4, 6120–9180	20,3	1,8	3,54/3,52
5	1360 с добавками нанокарбида титана 10%, 8670–11200	18	5	11,1/11,2
6	1360 с добавками нанокарбида титана 10%, 7650–9870	18,7	3	6,41/6,5
7	1360 с добавками нанокарбида титана 10%, 6580–8960	20,1	1,9	3,78/3,9

Примечание. Глубина проплавления основы образцов 6 и 7 составила 0,4 и 0,8 мм соответственно.

При повышенной мощности излучения или низкой скорости перемещения детали (луча) происходит проплавление материала основы на глубину 0,4–1,0 мм. Это приводит к резкому уменьшению микротвердости наплавленного слоя и появлению дефектов в виде пор и трещин. При отклонении от оптимальных режимов наплавки и проплавлении основы на глубину более 0,1 мм наблюдается уменьшение износостойкости покрытия.

В третьей серии экспериментов на образцы стали 40X наплавляли порошок ПР-НХ15СР2 и с добавками нанопорошка карбида вольфрама в количестве 3–7% с размером частиц 20–100 нм (табл. 3). На рис. 1 представлен микрошлиф единичной наплавленной дорожки порошком ПР-НХ15СР2 с нанесенной царапиной. Под зоной наплавки расположена зона лазерной закалки из твердого состояния. Равномерная ширина царапины в зоне наплавки свидетельствует о равномерности механических свойств в покрытии.

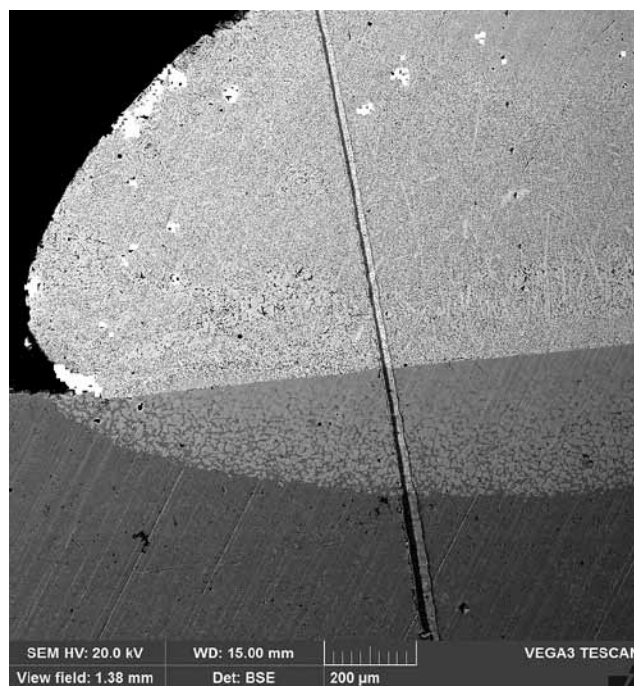
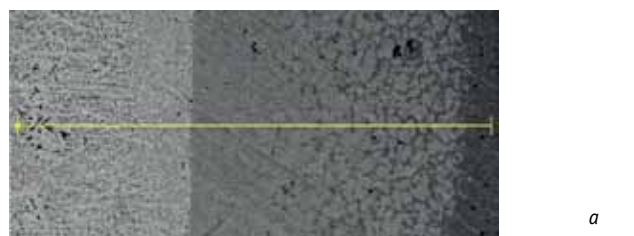


Рис. 1. Микрошлиф единичной наплавленной дорожки порошком ПР-НХ15СР2–200

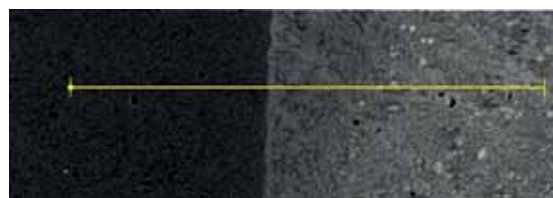
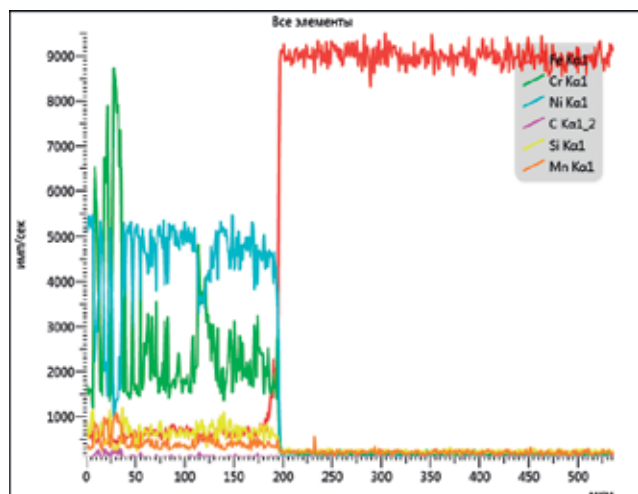
На рис. 2 показаны микрошлифы и графики распределения химических элементов наплавленного слоя на границе с материалом основы. Применение поперечных высокочастотных колебаний лазерного луча приводит к оплавлению стали 40X на глубину до 50 мкм. На графике, приведенном на рис. 2б, появляется железо, содержание которого практически равно содержанию никеля на границе со сталью 40X.

Химическое соединение материала наплавки и основы свидетельствует о более высокой прочности сцепления покрытия при использовании высокочастотного сканирования луча при одинаковой мощности излучения и скорости перемещения образца. Положительные результаты наплавки получены при плотности энергии излучения до 50 Вт·с/мм². При дальнейшем увеличении плотности энергии происходит выгорание легирующих элементов и разложение карбидной фазы. Износостойкость при этом резко снижается.

Разработанная методика определения коэффициента износостойкости с помощью склерометрирования позволяет на образцах свидетелях металлографическими исследованиями сократить цикл испытаний и в случае, когда невозможно определить износостойкость крупногабаритных изделий (например, коленчатых валов, валков прокатных станов, шеек валов газовых и паровых турбин и других узлов трения) является единственным способом. Дальнейшие исследования в этой области позволят более точно определять коэффициент износостой-



a



b

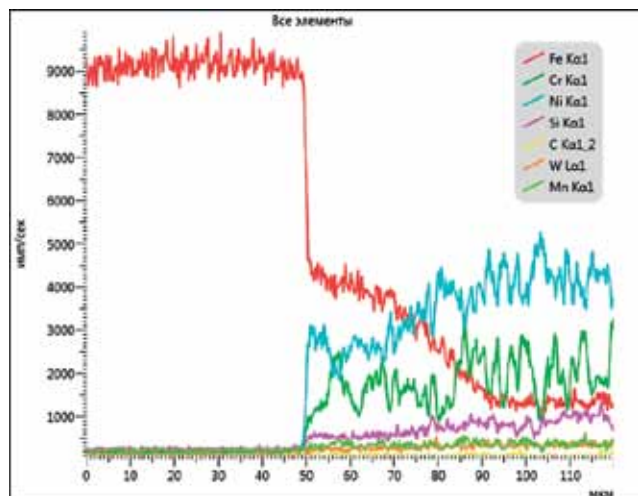


Рис. 2. Распределение химических элементов в наплавленном слое на границе со сталью 40X: а – расфокусированным лазерным лучом, б – сканирующим лазерным лучом с частотой 220 Гц

кости с учетом поступления новых данных по различным порошковым материалам.

Таблица 3. Определения коэффициента износостойкости при наплавке стали 40X порошком ПР-НХ15СР2 и с добавками нанопорошка карбида вольфрама

№ п/п	Марка материала основы или порошка и микротвердость, МПа	Ширина царапины, мкм	Коэффициент, С	Коэффициент износостойкости, расчет/эксперимент
1	Сталь 40X, 2320–2440	32	1	1/1
2	ПР-НХ15СР2, 6400–6600	23	2,5	3,5/3,54
3	ПР-НХ15СР2 С добавками нанокарбида вольфрама 3% 6920–6600	20,5	2,9	4,6/4,58
4	ПР-НХ15СР2 С добавками нанокарбида вольфрама 5% 7180–8060	18,9	3,16	5,8/5,83
5	ПР-НХ15СР2 С добавками нанокарбида вольфрама 7% 7620–9160	17,4	3,85	7,1/7,12

ВЫВОДЫ

Разработана методика определения износостойкости покрытий при лазерной наплавке с помощью склерометрирования.

Отклонение коэффициентов износостойкости покрытий при склерометрировании и абразивном изнашивании составило не более 5%.

Показано, что превышение плотности энергии лазерного излучения более 50 Вт·с/мм² приводит к резкому снижению коэффициента износостойкости при лазерной наплавке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Li Q., Zhang D., Lei T., Chen Ch., and Chen W. Comparison of Laser-Clad and Furnace-Melted Ni-Based Alloy Microstructures // Surface and Coatings Technology. 2001. (137). С. 122–135.
2. Gomez-del R. T., Garrido M. A., Fernandez J. E., et al. Influence of the Deposition Techniques on the Mechanical Properties and Microstructure of NiCrBSi Coatings // Journal of Materials Processing Technology. 2008. (204). N 1–3. P. 304–312.
3. Nurminen J., Nakki J., and Vuoristo P. Microstructure and Properties of Hard and Wear Resistant MMC Coatings

- Deposited by Laser Cladding // Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2009. (27). P. 472–478.
4. **Leech P. W., Li X. S., and Alam N.** Comparison of Abrasive Wear of a Complex High Alloy Hardfacing Deposit and WC–Ni Based Metalmatrix Composite // Wear. 2012. (294–295). P. 380–386.
 5. **Van Acker K., Vanhoyweghen D., Persoons R., and Vangrunderbeek J.** Influence of Tungsten Carbide Particle Size and Distribution on the Wear Resistance of Laser Clad WC/Ni Coatings // Wear. 2005. (258). P. 194–202.
 6. **Cai B., Tan Y.-F., He L., et al.** Tribological Properties of TiC Particles Reinforced Ni-Based Alloy Composite Coatings // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2013. (13). P. 1681–1688.
 7. **Саврай Р. А., Макаров А. В., Соболева Н. Н. и др.** Контактная выносливость NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2014 (65). № 4. С. 43–51.
 8. **Макаров А. В., Соболева Н. Н., Малыгина И. Ю.** Роль упрочняющих фаз в сопротивлении абразивному изнашиванию NiCrBSi покрытий, сформированных лазерной наплавкой // Трение и износ. 2017. № 4. (38). С. 311–318.
 9. **Liyanage T., Fisher G., Gerlich A. P.** Microstructures and abrasive wear performance of PTAW deposited Ni–WC overlays using different Ni-alloy chemistries // Wear 2012. (274–275) P. 345–354.
 10. **Ma Q., Li Y., Wang J., Liu K.** Microstructure evolution and growth control of ceramic particles in wide-band laser clad Ni60/WC composite coatings // Materials and Design 2016. (92). P. 897–905.
 11. **Бирюков В. П., Дозоров А. В.** Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 1. С. 60–66.
 12. **Хрущов М. М., Бабичев М. М.** Абразивное изнашивание. — М.: Наука, 1970. 256 с.
 13. **Пат. 2 644 440** Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Способ определения износостойкости покрытия / Бирюков В. П., Гудушаури Э. Г., Фишков А. А. и др.; опубл. 12.02.2018. Бюл. № 5.
 14. **Бирюков В. П., Гудушаури Э. Г.** Определение коэффициента износостойкости наплавленных лазерным лучом покрытий // Сборник докладов конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» Физико-технологического института Московского технологического университета. — М.: МИРЭА, 2018. С. 817–819.

БИРЮКОВ Владимир Павлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1210 руб.

ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ СТАЛЕЙ, ЖАРОПРОЧНЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С УЧЕТОМ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Райхельсон В.А.

В книге освещены основные виды механической обработки резанием современных конструкционных сталей, жаропрочных и титановых сплавов лезвийными инструментами: точение, строгание, сверление, фрезерование, протягивание, разрезка заготовок и прорезка пазов.

Книга содержит большой научно-практический и справочный материал, рассчитана на инженерно-технических работников предприятий машиностроения, авиакосмической отрасли, энерго- и автостроения, оборонной промышленности. Она также послужит учебным пособием для студентов и преподавателей высших и средних учебных заведений машиностроительных специальностей.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2018. – 508 с.
ISBN 978-5-94836-476-6

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎125319, Москва, а/я 91; ☎+7 495 234-0110; ☎+7 495 956-3346; ✉knigi@technosphere.ru, sales@technosphere.ru