

Повышение износостойкости бандажной стали методом лазерного поверхностного модифицирования карбидом вольфрама

А. Г. ГРИГОРЬЯНЦ¹, И. Н. ШИГАНОВ¹, Р. С. ТРЕТЬЯКОВ², А. И. МИСЮРОВ¹, Р. Д. АСЮТИН¹,
А. А. ДРЕНИН¹, А. В. ПЕРЕСТОРНИН¹

¹ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана), Москва, 105005, Россия

² ООО «Московский центр лазерных технологий» (ООО «МЦЛТ»), Москва, 125190, Россия

Аннотация. Металлокерамические композиты обладают крайне высокими показателями твердости и износостойкости. Введение армирующих частиц в поверхностный слой изделия позволяет получить упрочненный слой с минимальным расходом порошка. В настоящей работе приведены результаты испытаний на износ образцов из бандажной стали марки 2 по ГОСТ 398–2010, поверхность которых была подвергнута лазерной модификации с введением сферических частиц монокарбида вольфрама.

Было установлено, что уже при содержании карбида вольфрама 9 % по объему достигается снижение массового износа более чем в 65 раз по сравнению с неупрочненной бандажной сталью. Введение упрочняющих частиц имеет при этом большее значение, чем формирование в матрице закалочных структур.

Ключевые слова: железнодорожное колесо; износостойкость; карбид вольфрама; лазерная обработка

Введение. На сегодняшний день для производства бандажей колес локомотивов преимущественно используют углеродистые стали с малым содержанием легирующих элементов, из конструкционных сталей ближайшими аналогами являются 60Г и 65Г. Эти материалы обладают комплексом необходимых механических свойств, кроме того, их локальная закалка позволяет снизить износ участков, подвергающихся постоянному истиранию при взаимодействии с рельсом. Так, плазменная обработка дает возможность достигнуть увеличения пробега между обточкой колес до 3 раз [1].

В то же время предельный износ гребня по-прежнему является главной причиной обточек колес и приводит к более частым выводам локомотива из эксплуатации. Для дальнейшего увеличения износостойкости необходимо улучшить свойства поверхностного слоя выше возможностей используемых сталей, что предполагает изменение его состава. При этом следует обеспечить отсутствие дефектов в упрочненной зоне.

Самых высоких свойств с точки зрения стойкости к износу можно добиться при формировании на поверхности композитных металлокерамических слоев,

например, с применением технологии наплавки [2]. Однако для этого необходимо нанести слой толщиной около 1,5–2,0 мм, состоящий из материала матрицы, как правило, из никелевого сплава и армирующих частиц. Такое покрытие искажает геометрию изделия. Кроме того, требуется высокий расход дорогостоящих присадочных материалов. Этих проблем можно избежать, если в качестве матрицы композита использовать металл изделия и вводить частицы в расплавленный тепловым источником участок поверхности. При этом добиться значительного повышения износостойкости можно даже при малой объемной доле упрочняющих частиц в том случае, если применять для армирования монокарбид вольфрама [3].

Такой процесс возможно реализовать с помощью плазменной [4] или лазерной [5] обработки. При этом в первом случае наиболее эффективный с точки зрения глубины получаемого слоя метод соосной подачи порошка и энергии нагрева исключается ввиду значительного теплового воздействия плазменного факела на летящие упрочняющие частицы [4], что приводит к их разрушению или расплавлению в металле матрицы. Во втором случае, при лазерной обработке, введение частиц такого типа соосно лазерному лучу возможно без их существенного искажения.

В работе [6] была показана принципиальная возможность получения равномерно упрочненного по глубине композиционного слоя с матрицей из бандажной стали марки 2 по ГОСТ 398–2010 методом лазерной модификации с введением сферических частиц монокарбида вольфрама. Схема процесса представлена на рис. 1. В настоящей работе изучено влияние содержания частиц WC на износостойкость, твердость металлической матрицы и образование дефектов в упрочненном слое.

Используемые материалы, образцы и оборудование. Обработку режимов и исследование формирования модифицированных дорожек и их структуры производили на пластинах размером 100×50×15 мм, на которых были выполнены отдельные упрочненные

■ E-mail: a.v.perestoronin@bmstu.ru (А. В. Пересторонин)

дорожки. Для испытаний на износ согласно схеме, представленной на рис. 2, из банджа вырезали образцы в виде роликов, цилиндрическую поверхность которых упрочняли за несколько проходов с частичным перекрытием для получения сплошного однородного слоя. Дорожки наносили по направляющей цилиндра с вращением образца относительно неподвижного источника излучения и порошка, шаг 1,5 мм между ними обеспечивали смещением положения лазерного источника вдоль оси вращения образца.

Обработку производили на роботизированном технологическом комплексе на базе волоконного лазера ЛС-5, генерирующего непрерывное излучение на длине волны 1,07 мкм с максимальной мощностью до 5 кВт. Вводили порошок монокрибида вольфрама, химический и фракционный состав которого представлен в табл. 1 и 2 соответственно. Использование такого армирующего материала, как показал опыт упрочнения деталей бурового оборудования композитами на основе никелевых сплавов, а также анализ литературных источников [7, 8], позволяет добиться максимальной износостойкости.

Исследование структуры металла. В пределах оптимальных (с точки зрения глубины армированного слоя, объемной доли монокрибида вольфрама (WC) и эффективности использования порошка) диапазонов параметров режимов обработки удается получить равномерное распределение упрочняющих частиц. Их расположение в модифицированном слое одного из испытуемых образцов видно на снимке поперечного шлифа, представленном на рис. 3.

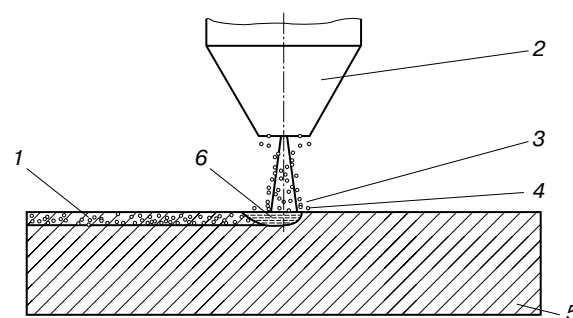


Рис. 1. Схема соосной лазерной поверхностной модификации [6]:
1 — упрочненный слой; 2 — сопло; 3 — лазерный луч;
4 — подаваемый порошок; 5 — обрабатываемое изделие;
6 — расплавленный металл
Fig. 1. Diagram of in-line surface laser modification [6]:
1 — reinforced layer; 2 — nozzle; 3 — laser beam;
4 — supplied powder; 5 — work piece; 6 — melted metal

Таблица 1

Химический состав порошка монокрибида вольфрама [6]

Table 1

Chemical composition of the tungsten monocarbide powder [6]

Химический элемент	W	C	Fe	Другие
Массовая доля, %	Основа	3,9	0,3	0,2

Лазерная обработка бандажной стали должна вызывать образование мартенсита в матрице модифицированного слоя, металл которого переплавляется, а также в зоне термического влияния, претерпевающей закалку из твердого состояния. Изменение фазового состава, таким образом, само по себе повышает твердость и износостойкость стали. Кроме того,

Таблица 2

Фракционный состав порошка монокрибида вольфрама

Table 2

Particle size distribution of the tungsten monocarbide powder

Фракция, мкм	>212	>180	>150	>90	>53	>45	<53	<45
Содержание, %	0	0	4,6	68,2	25,7	1,4	1,5	0,1

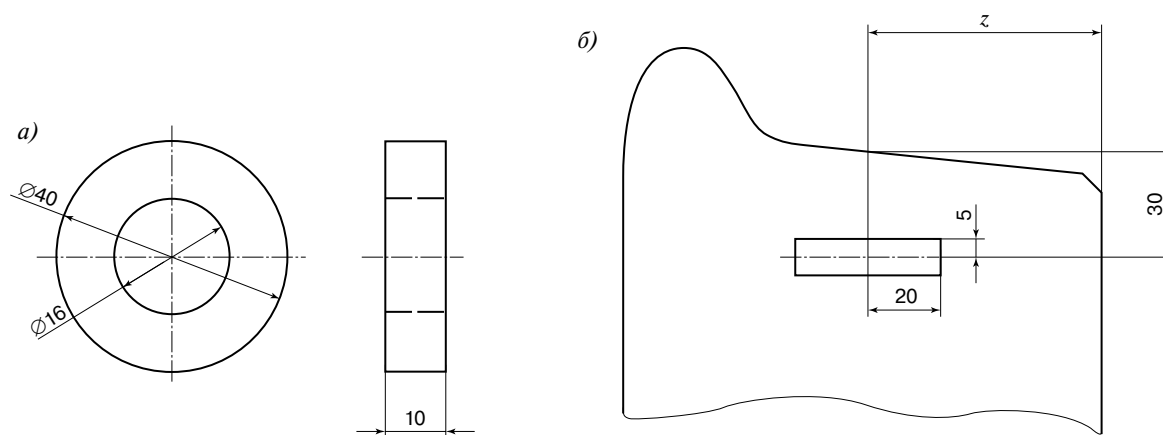


Рис. 2. Эскиз ролика для испытаний на износ (а) и схема вырезки из банджа ролика для испытаний на износ (б): z — $1/2$ ширины банджа
Fig. 2. Sketch of roller for wear-resistance test (a) and diagram of roller cut out of bandage for wear-resistance test (b): z — $1/2$ band width

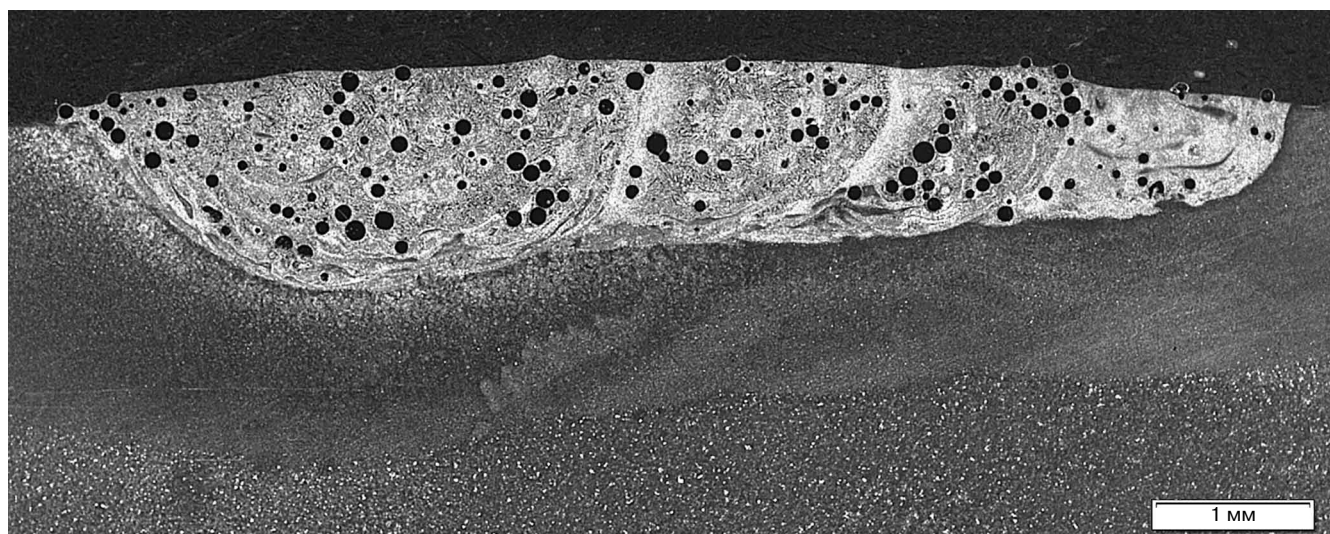


Рис. 3. Поперечное сечение слоя, полученного лазерным поверхностным модифицированием на образце в виде ролика
Fig. 3. Cross section of the layer obtained with surface laser modification on the roller-shape sample

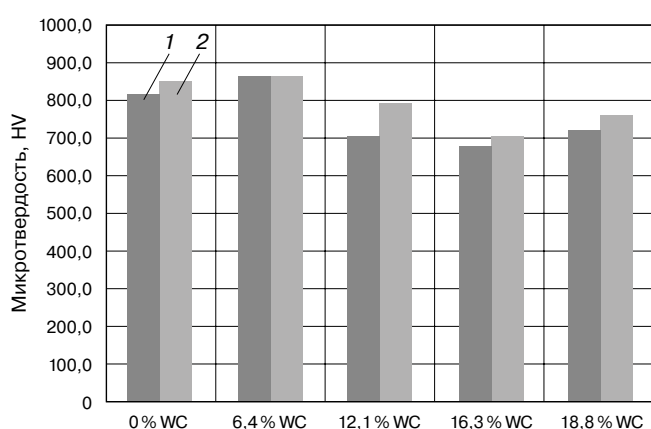


Рис. 4. Влияние объемной доли частиц монокрида вольфрама на среднюю микротвердость матрицы (1) и металла зоны термического влияния (2): WC — монокрид вольфрама
Fig. 4. Effect of the volumetric fraction of particles of tungsten monocarbide on the average microhardness of the matrix (1) and metal of the thermal impact area (2): WC — tungsten monocarbide

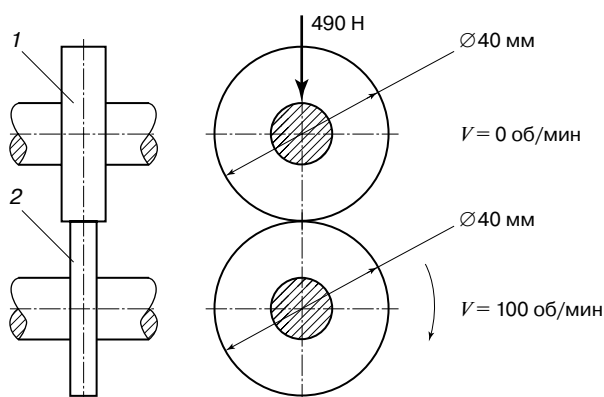


Рис. 5. Схема испытания на износостойкость [6]:
1 — бандажный ролик; 2 — рельсовый ролик
Fig. 5. Diagram of wear-resistance test [6]:
1 — bandage roller; 2 — rail roller

в результате исследования структуры модифицированных слоев было установлено, что при введении армирующих частиц дисперсность первичной дендритной структуры стальной матрицы повышается с ростом объемной доли армирующих частиц [9]. Влияние их содержания на среднюю микротвердость стали показано на рис. 4.

Видно, что микротвердость металла матрицы и зоны термического влияния (ЗТВ) соответствует мартенситу в сталях данного химического состава. Некоторое снижение твердости с увеличением объемной доли частиц, вероятно, связано с локальными изменениями химического состава и напряженно-деформированного состояния металла матрицы, так как отмеченное в работе [9] повышение дисперсности структуры должно привести к обратному эффекту. Диффузия вольфрама из нагретых частиц в матрицу [5, 9, 10] может вызывать формирование в ней вторичных карбидов, что приводит к локальному снижению содержания углерода в мартенситах и, соответственно, снижению твердости стали. Таким образом, повышению износостойкости должны одновременно способствовать как введение армирующих частиц, так и закалка поверхностного слоя стали.

Результаты испытаний на износостойкость. Испытания образцов на износ проводили согласно схеме, представленной на рис. 5. Было испытано 6 роликов из бандажной стали, схема эксперимента, при котором эти образцы были неподвижны, подразумевала возможность получения 3 лунок износа на каждом из них за счет поворота образца-ролика относительно его оси на 120°. Соответственно, при этом было использовано 18 роликов, вырезанных из верхней части рельса, выступавших в роли контртел и вращавшихся с проскальзыванием 100 % без подачи смазки.

В работе исследовали несколько различных вариантов упрочнения поверхности: лазерную закалку с оплавлением без введения частиц (ролик P2), с введением армирующих частиц с разным их содержанием в поверхностных слоях, достигаемым изменением подачи порошка WC и модифицированием (P3, P4, P5) ролика с последующей термообработкой (ролик P6). Массовые расходы WC, толщина и состав композитных слоев в образцах-роliках представлены в табл. 3.

Ролик P1 проходил испытания без предварительного упрочнения, то есть в состоянии поставки для бандажа железнодорожного колеса локомотива. Ролик P6 был обработан аналогично ролику P4, но после модифицирования был подвергнут высокому отпуску в печи при температуре 585 °С в течение 1,5 ч с охлаждением на воздухе. Это позволило устранить закалочные структуры, что было необходимо для установления отдельно степеней влияния введения частиц и формирования мартенсита на износостойкость.

В работе [6] были приведены результаты испытания роликов P1, P2, P3, которые показали существенный рост износостойкости при введении частиц WC по сравнению с неупрочненным металлом бандажа и упрочненным лазерной закалкой. В настоящей работе исследовали влияние содержания армирующих частиц на изменение этого показателя. Результаты соответствующих испытаний приведены на рис. 6.

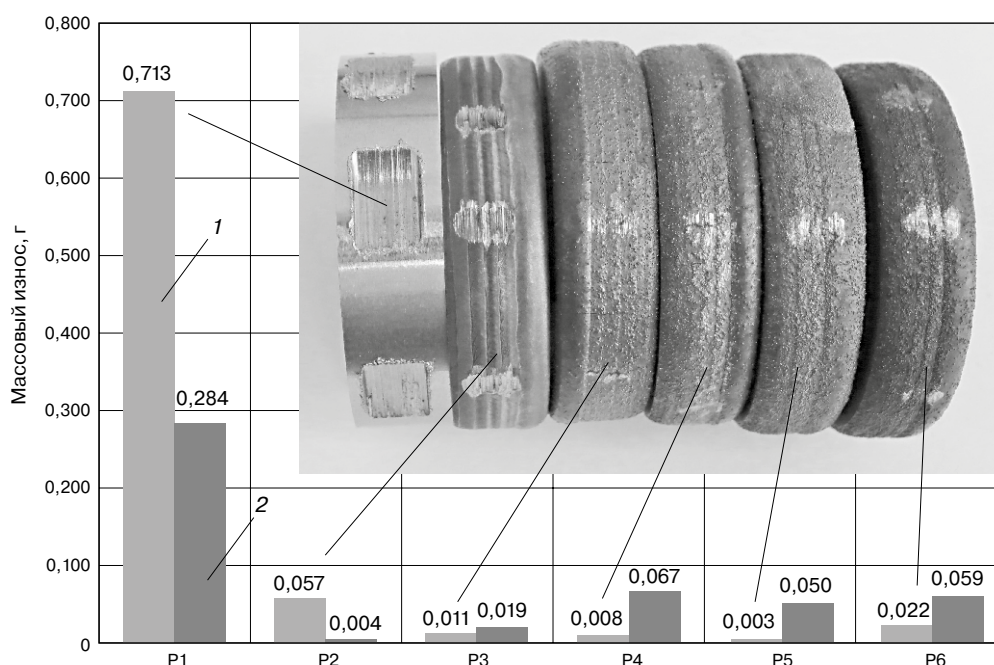


Рис. 6. Внешний вид роликов после испытаний и результаты определения массового износа упрочненных роликов, способы обработки которых приведены в табл. 3: 1 — массовый износ бандажных роликов; 2 — массовый износ ответных рельсовых роликов
 Fig. 6. Appearance of the rollers after tests and results of determination of mass wear of reinforced rollers, which methods of treatment are presented in table 3: 1 — mass wear of bandage rollers; 2 — mass wear of the counterpart rail rollers

Таблица 3
 Толщина слоев и доля армирующих частиц в роликах, обработанных аналогично испытанным роликам

Table 3
 Thickness of layers and fraction of reinforcing particles in the rollers, processed in a similar way to the tested rollers

Номер ролика	Массовый расход порошка WC, г/мин	Минимальная толщина упрочненного слоя, мкм	Объемная доля частиц WC, %
P1	В исходном состоянии		
P2	0	974	0
P3	18,30	819	9,33
P4, P6*	23,18	859	12,17
P5	28,61	718	12,84

Примечание: *образец-ролик подвергнут высокому отпуску после лазерной модификации. WC — монокристалл вольфрама.

Массовый износ модифицированных роликов, содержащих армирующие частицы, в десятки раз ниже, чем роликов, испытанных в исходном состоянии (см. рис. 5). При этом последующий отпуск, как видно из результатов испытания ролика P6, приводит к более чем двукратному увеличению износа. Тем не менее при лазерной обработке без введения частиц износ выше, чем в случае отпуска модифицированного образца, примерно в 2 раза, что говорит о более значимой роли армирующих частиц по сравнению с закалкой металла матрицы. Наименьший износ ответного рельсового ролика наблюдается при его

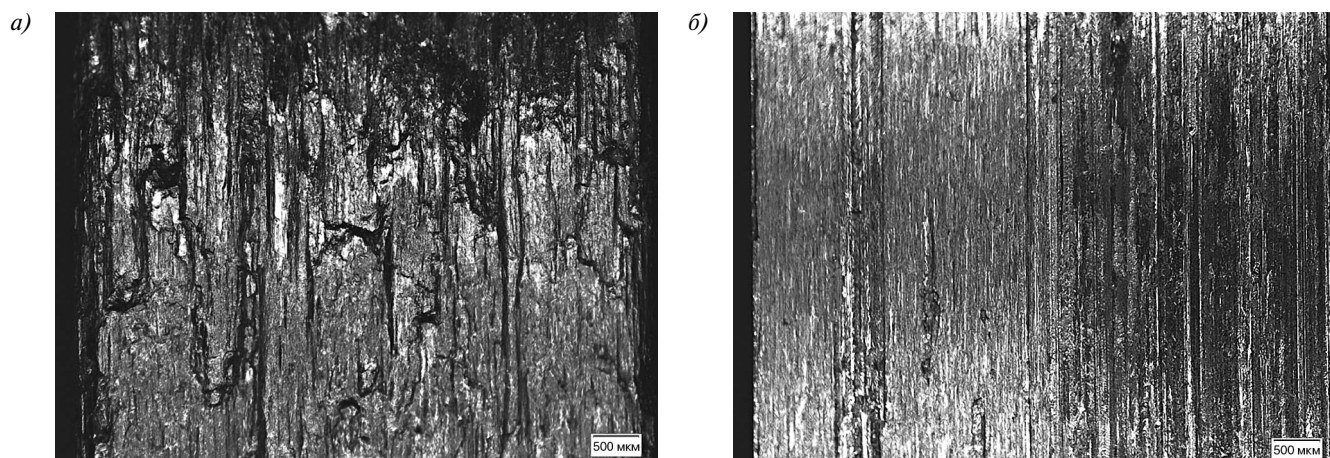


Рис. 7. Поверхность рельсовых роликов после испытаний на износ, работавших в паре:
 а — с неупрочненным бандажным роликом (500 мкм); б — с модифицированным бандажным роликом (500 мкм)
 Fig. 7. Surface of the rail rollers after a wear resistance test, operating in couple:
 а — with a non-reinforced bandage roller (500 μm); б — with a modified bandage roller (500 μm)

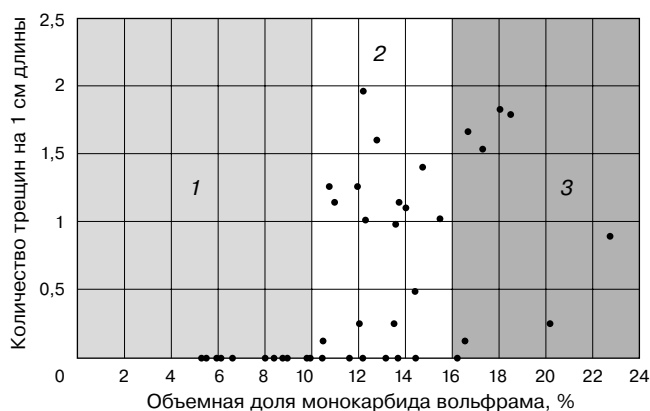


Рис. 8. Зависимость количества трещин на 1 см длины модифицированной дорожки от содержания в ней армирующих частиц монокрида вольфрама: область 1 — трещин не наблюдается; область 2 — образование трещин возможно; область 3 — образование трещин неизбежно
 Fig. 8. Dependence of the number of cracks per 1 cm length of the modified path, in relation to the content of tungsten monocarbide reinforcing particles: area 1 — cracks are not observed; area 2 — formation of cracks is possible; area 3 — crack formation is inevitable

работе в паре с бандажным после лазерной обработки без введения порошка WC, что, очевидно, связано с меньшей шероховатостью последнего (см. рис. 5).

Существенно меньший износ контртел при работе в паре с упрочненными роликами, вероятно, обусловлен уменьшением роли адгезионных процессов [11]. На рис. 7 показаны снимки поверхности рельсовых роликов, работавших в паре с неупрочненным (а) и модифицированным (б) бандажными роликами. С увеличением количества твердых частиц, в том числе на поверхности упрочненных бандажных роликов, повышается абразивный износ, который тем не менее оказывается меньше адгезионного.

Анализ результатов испытаний позволяет сделать вывод, что с ростом объемной доли WC в поверхностном слое бандажной стали повышается его износостойкость. Однако одновременно повышается риск образования в бандаже поперечных трещин. На рис. 8 показано количество трещин, обнаруженных на 1 см длины поверхности упрочненных дорожек, выполненных на образцах в виде пластин при различных параметрах режимов обработки и отличающихся по содержанию армирующих частиц.

Поскольку образование трещин в бандажах при обработке недопустимо, следует ограничить в них объемную долю армирующих частиц на уровне не более 10 %. Эксперименты показывают, что этого достаточно, чтобы обеспечить износостойкость, более чем в 5 раз превышающую этот показатель при лазерной закалке с оплавлением, при этом относительно невысокая доля WC одновременно способствует снижению износа рельса. Кроме того, расход дорогостоящего армирующего порошка в этом случае меньше (см. табл. 3).

Снижения износа бандажей при модификации поверхности частицами WC в 5 раз по сравнению с закаленными бандажами достаточно для существенного повышения эффективности их эксплуатации за счет совмещения ремонта колес с плановым обслуживанием локомотива. По совокупности свойств рациональная доля WC при модифицировании поверхности бандажей должна составлять от 8 до 10 %.

Выводы. 1. При лазерном модифицировании бандажной стали с введением частиц WC в зоне обработки с оплавлением поверхности и в зоне термического влияния образуется мартенситная структура.

2. Средняя микротвердость упрочненной стали снижается с ростом объемной доли армирующих

частиц, что, вероятно, связано с изменением химического состава и напряженно-деформированного состояния металла.

3. Введение армирующих частиц приводит к снижению массового износа в десятки раз, при этом износ ответного рельсового ролика также снижается.

4. Лазерная обработка без введения частиц многократно повышает износостойкость, при этом износ ответного ролика минимален.

5. В повышении износостойкости слоев с армирующими частицами последние оказывают более существенное влияние по сравнению с закалкой металла матрицы.

6. С учетом недопущения трещинообразования рациональная доля армирующих частиц должна составлять от 8 до 10% по объему.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-20-03230.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А. М., Маслов В. Э., Глибина Л. А. Плазменное упрочнение гребней локомотивных и вагонных колес // Вестник ВНИИЖТ. 2005. № 1. С. 31–33.
2. Laser surfacing of nickel-based composite wear-resisting coatings reinforced with tungsten carbide / A. G. Grigoryants, A. Ya. Stavertiy, K. O. Bazaleeva, T. Yu. Yudina, N. A. Smirnova, R. S. Tretyakov, A. I. Misyurov // Welding International. 2017. Vol. 31. Issue 1. P. 52–57.
3. Microstructures and wear resistance of large WC particles reinforced surface metal matrix composites produced by plasma melt injection / A. Liu, M. Guo, M. Zhao, Ch. Wang // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. Issue 18. P. 7978–7982.
4. Liu A., Guo M., Hu H. Improved wear resistance of low carbon steel with plasma melt injection of WC particles // Journal of Materials Engineering and Performance. 2010. Vol. 19. Issue 6. P. 848–851.
5. Wear resistance of WCp/Duplex Stainless Steel metal matrix composite layers prepared by laser melt injection / A. M. Do Nascimento, V. Ocelik, M. C. Ierardi, J. Th. De Hosson // Surface and Coatings Technology. 2008. Vol. 202. Issue 19. P. 4758–4765.
6. Упрочнение поверхности колес железнодорожных локомотивов путем создания композитного слоя методом лазерно-порошковой обработки / А. Г. Григорьянц [и др.] // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2018. № 4. С. 40–50.

7. Effects of WC particle size on the wear resistance of laser surface alloyed medium carbon steel / F. Li, M. Kuang, W. Ma, X. Chen, M. Liu // Applied Surface Science. 2012. Vol. 258. Issue 7. P. 3214–3220.

8. Influence of large particle size — up to 1.2 mm — and morphology on wear resistance in NiCrBSi/WC laser clad composite coatings / D. Deschuyteneer, F. Petit, M. Gonon, F. Cambier // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 311. P. 365–373.

9. The features of surface composite layer formation by laser-powder treatment of steel with tungsten carbide particles / A. Perestoronin, A. Grigoryants, R. Tretyakov, A. Misiurov, R. Asytin // Journal of physics conference series. 2018. Vol. 1109. Article numb. 012028.

10. Toward prediction of microstructural evolution during laser surface alloying / S. S. Babu, S. A. David, R. P. Martukanitz, K. D. Parks // Metallurgical and Material Transactions A. 2002. Vol. 33. Issue 4. P. 1189–1200.

11. Марков Д. П. Трибологические аспекты повышения износостойкости и контактно-усталостной выносливости колес подвижного состава: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04. М.: ВНИИЖТ, 1996. 386 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ГРИГОРЬЯНЦ Александр Григорьевич,
д-р техн. наук, профессор кафедры МТ-12,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

ШИГАНОВ Игорь Николаевич,
д-р техн. наук, профессор кафедры МТ-12,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

ТРЕТЬЯКОВ Роман Сергеевич,
канд. техн. наук, заместитель директора
ООО «Московский центр лазерных технологий»

МИСЮРОВ Александр Иванович,
доцент кафедры МТ-12, МГТУ им. Н. Э. Баумана

АСЮТИН Роман Дмитриевич,
аспирант кафедры МТ-12, МГТУ им. Н. Э. Баумана

ДРЕНИН Алексей Анатольевич,
аспирант кафедры МТ-12, МГТУ им. Н. Э. Баумана

ПЕРЕСТОРОНИН Александр Владимирович,
инженер, НОЦ ЦАТ, МГТУ им. Н. Э. Баумана

Статья поступила в редакцию 23.06.2019 г., принята к публикации 05.09.2019 г.

Increasing the wear resistance of steel bandage by surface laser modification with tungsten carbide particles

**A. G. GRIGORYANTS¹, I. N. SHIGANOV¹, R. S. TRETYAKOV², A. I. MISYUROV¹, R. D. ASYUTIN¹,
A. A. DRENIN¹, A. V. PERESTORONIN¹**

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 1095005, Russia

² LLC "Moscow Center of Laser Technologies", Moscow, 125190, Russia

Abstract. Currently, the wheel flange limiting wear is the main reason of the railroad wheels truing. In order to enhance the wear resistance of the wheels to the required level, composition of their surface shall be changed, which is proposed to do by the method of laser surface modification introducing spherical particles of tungsten monocarbide with diameter from 50 to 150 μm. It was found out that introduction of the said particles into steel, which composition corresponds to grade 2

as per GOST 398–2010, results in reduction of microhardness of matrix metal formed on the composite layer surface as long as the content of tungsten monocarbide particles is increased. This phenomenon shall be probably connected with the change of chemical composition and stress-strain state of metal. Examination of wear resistance using roller samples demonstrated that growth of the volumetric fraction of reinforcing particles significantly increases the wear resistance. Laser heat processing

of the surface without introducing the particles results in the wear resistance increase too. Wear and tear of the counter rollers cut from the rail operated in pair with the reinforced rollers cut from the tread band is less than in the pair with untreated rollers. Introduction of reinforcing particles is much more important than matrix hardening for increasing the wear resistance. It is demonstrated that cross-crack defects can be formed in modified layers, which quantity depends on the volumetric fraction of reinforcing particles. When content of tungsten monocarbide is less than 10%, cracks are not observed. According to the totality of properties, the best content of reinforcing particles shall amount from 8 to 10% of the volume.

Acknowledgment. Research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 17-20-03230.

Keywords: railroad wheel; wear resistance; tungsten carbide; laser processing

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-5-290-296>

REFERENCES

1. Lykov A. M., Maslov V. E., Glibina L. A. *Plazmennoye uprochneniye grebney lokomotivnykh i vagonnykh koles* [Plasma strengthening of the locomotive and car wheels flanges]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2005, Issue 1, pp. 31–33.
2. Grigoryants A. G., Stavertiy A. Ya., Bazaleeva K. O., Yudin T. Yu., Smirnova N. A., Tretyakov R. S., Misyurov A. I. *Laser surfacing of nickel-based composite wear-resisting coatings reinforced with tungsten carbide*. Welding International, 2017, Vol. 31, Issue 1, pp. 52–57.
3. Liu A., Guo M., Zhao M., Wang Ch. *Microstructures and wear resistance of large WC particles reinforced surface metal matrix composites produced by plasma melt injection*. Surface and Coatings Technology, 2007, Vol. 201, Issue 18, pp. 7978–7982.
4. Liu A., Guo M., Hu H. *Improved wear resistance of low carbon steel with plasma melt injection of WC particles*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, Vol. 19, Issue 6, pp. 848–851.
5. Do Nascimento A. M., Ocelik V., Ierardi M. C., De Hosson J. Th. *Wear resistance of WCp/Duplex Stainless Steel metal matrix composite layers prepared by laser melt injection*. Surface and Coatings Technology. 2008, Vol. 202, Issue 19, pp. 4758–4765.
6. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Tretyakov R. S., Bryunchukov G. I., Asyutin R. D., Perestoronin A. V. *Uprochneniye poverkhnosti koles zheleznodorozhnykh lokomotivov putem sozdaniya kompozitnogo sloya metodom lazerno-poroshkovoy obrabotki* [Strengthening the surface of the wheels of railway locomotives by creating a composite layer by the laser-powder treatment method]. Bulletin of the Scientific and Technical Council of the JSC "Russian Railways", 2018, Issue 4, pp. 40–50.

■ E-mail: a.v.perestoronin@bmstu.ru (A. V. Perestoronin)

7. Li F., Kuang M., Ma W., Chen X., Liu M. *Effects of WC particle size on the wear resistance of laser surface alloyed medium carbon steel*. Applied Surface Science, 2012, Vol. 258, Issue 7, pp. 3214–3220.

8. Deschuyteneer D., Petit F., Gonon M., Cambier F. *Influence of large particle size — up to 1.2 mm — and morphology on wear resistance in NiCrBSi/WC laser clad composite coatings*. Surface and Coatings Technology, 2017, Vol. 311, pp. 365–373.

9. Perestoronin A., Grigoryants A., Tretyakov R., Misiurov A., Asyutin R. *The features of surface composite layer formation by laser-powder treatment of steel with tungsten carbide particles*. Journal of Physics Conference Series, 2018, Vol. 1109, Article numb. 012028.

10. Babu S. S., David S. A., Martukanitz R. P., Parks K. D. *Toward prediction of microstructural evolution during laser surface alloying*. Metallurgical and Material Transactions A, 2002, Vol. 33, Issue 4, pp. 1189–1200.

11. Markov D. P. *Tribologicheskiye aspekty povysheniya iznosostoykosti i kontaktno-ustalostnoy vynoslivosti koles podvizhnogo sostava*. Dokt. tekhn. nauk. diss. [Tribological aspects of enhancement of the wear-resistance and impressive strength of the rolling stock wheels. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, VNIIZhT, 1996, 386 p.

ABOUT THE AUTHORS

Aleksander G. GRIGOR'YANTS,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of MT-12,
Bauman Moscow State Technical University

Igor' N. SHIGANOV,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of MT-12,
Bauman Moscow State Technical University

Roman S. TRET'YAKOV,
Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director,
LLC "Moscow Center of Laser Technologies"

Aleksander I. MISYUROV,
Associate Professor, Department of MT-12,
Bauman Moscow State Technical University

Roman D. ASYUTIN,
Postgraduate Student, Department of MT-12,
Bauman Moscow State Technical University

Aleksey A. DRENIN,
Postgraduate Student, Department of MT-12,
Bauman Moscow State Technical University

Aleksander V. PERESTORONIN,
Engineer, Center for Adaptive Technologies,
Bauman Moscow State Technical University

Received 23.06.2019

Accepted 05.09.2019

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта / под ред. А. Б. Косарева, Г. В. Григориани. М.: РАС, 2019. Ч. 2. 300 с.

Рассмотрены важные экономические факторы, влияющие на развитие железнодорожного транспорта, проблемы, связанные с подвижным составом, процессами управления перевозками, совершенствованием локомотивной тяги и токосъема электро-

подвижного состава, а также вопросы пути, путевого хозяйства, металло- и материаловедения.

Сборник рассчитан на научных и инженерно-технических работников железнодорожного транспорта.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20,

e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.