



Повышение живучести железнодорожного колеса за счет применения поверхностно-упрочняющих технологий



Бунькова Тамара Геннадьевна — Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия.*

Тамара БУНЬКОВА

В статье представлены поверхностно-упрочняющие технологии применительно к цельнокатаным колёсам подвижного состава. Полученные результаты теоретического исследования процесса упрочнения металла колеса позволяют разработать научно обоснованные технологические и технические решения по предупреждению образования и развития дефектов на поверхности катания, а также их устранению в ремонтном производстве.

Цель настоящей работы заключается в установлении оптимального метода поверхностного упрочнения поверхности железнодорожного колеса с дефектами.

В настоящее время всё острее ощущается вопрос повышения живучести элементов, ответственных узлов и деталей подвижного состава. В связи с ограниченной экономической целесообразностью и ограни-

ченной доступностью имеющихся производственных технологий возникает необходимость создания нового материала, модифицированного нанокластерами и упрочнённого поверхностно-активными веществами.

Нанокластеры обладают высокими показателями пластичности и твёрдости. Для определения значения твёрдости наноматериалов используется метод измерения твёрдости по Виккерсу, при котором твёрдость определяется размером отпечатка после снятия нагрузки с алмазной пирамидки.

У наноструктур наблюдается сверхпластичность. Для никеля и сплава никеля с алюминием $NiAl_3$ низкотемпературная сверхпластичность отмечается в интервале температур 450–470°C, что в три раза меньше их температуры плавления [1].

Ключевые слова: железная дорога, железнодорожное колесо, дефекты, химический анализ, механические свойства, поверхностное упрочнение, живучесть, наноинженерия.

*Информация об авторе:

Бунькова Тамара Геннадьевна – старший преподаватель кафедры вагонов и вагонного хозяйства, инженер кафедры технологий транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, bunkovatg@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 18.01.2021, принята к публикации 26.02.2021.

For the English text of the article please see p. 54.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных способов получения функциональных материалов в нанотехнологии являются порошковые материалы. Методы получения на поверхности материалов металлических, модифицированных слоёв широко известны в различных областях машиностроения. Большинство из этих методов рассматриваются как методы нанотехнологий, которые позволяют создать наноструктурные слои на поверхности материала, деталей и их узлов. Также данный метод предполагает создание модифицированных нанокompозитных материалов в виде нано- и микроизделий.

Поверхностно-упрочняющие методы:

- технологии, основанные на физических процессах;
- технологии, основанные на химических процессах.

Самые распространённые технологии поверхностно-упрочняющей обработки:

- PVD технологии;
- CVD технологии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

PVD технология — технология упрочняющих покрытий, основанная на физическом осаждении из паровой фазы [2].

PVD технология основывается на технологическом процессе физических явлений, в результате которого материал переходит из твёрдого состояния в жидкую фазу в результате испарения под воздействием тепловой энергии или же в результате распыления за счёт кинетической энергии столкновения частиц материала, после пучок полученной газовой фазы при помощи электромагнитного поля транспортируется к упрочняющейся поверхности, нагретой не более 500°C, в результате этого ионизированный материал сталкивается и равномерно конденсируется на упрочняющейся поверхности.

Основные типы PVD покрытий и их свойства:

- нитрид титана TiN является универсальным покрытием для низкоуглеродистых сталей, увеличивает срок службы детали или узла, выполняя роль механической, термической и химической защиты между поверхностями трения;
- карбонитрид титана TiCN повышает производительность деталей и узлов, обес-

печивает по сравнению с нитридом титана более высокие механические свойства обработанной поверхности;

- алюминий-титан-нитрид AlTiN является покрытием с уникальной нанокompозитной структурой, повышает твёрдость, термостойкость и сопротивление ударным нагрузкам. Отличные результаты испытаний однозначно указывают на увеличение службы срока детали или узла;

- алюминий-хром-нитрид AlCrN имеет уникальную нанокристаллическую решётку, которая заметно повышает твёрдость и жаропрочность. Лучше всего применять там, где требуется равномерный износ, сопротивление сколам благодаря высокой термостойкости и большой производительности в тяжёлых условиях эксплуатации.

Преимущества:

- нанесение тугоплавкого материала при относительно низкой температуре, более щадящий режим воздействия на металл упрочняемой детали;
- небольшая толщина слоя при равных эксплуатационных характеристиках.

Недостатки:

- процесс физического осаждения производится в вакууме и является несравнимо более дорогим, т.к. предполагает использование дорогой аппаратуры, требующей высококвалифицированного персонала [3].

Суть метода покрытия CVD заключается в создании тонкой плёнки TiC на поверхности упрочняемой детали, что позволяет, не изменяя внутреннюю структуру сплава, повысить твёрдость и скорость обработки. Эта идея получила развитие путём применения нитрида титана и оксида алюминия.

В основе метода лежит процесс, в результате которого в камере, в которой поддерживается температура до 1200°C, материал покрытия подаётся в паровом агрегатном состоянии и под действием высоких температур взаимодействует с упрочняемой поверхностью.

Основные свойства покрытий:

- карбид титана TiC повышает износостойкость, предотвращает появление отколов;
- нитрид титана предотвращает формирование заусенцев и налипание на обрабатываемую поверхность, повышая качество технологического процесса;





Таблица 1

Механические свойства стали обода колеса (выполнено автором)

Марка стали колеса	Временное сопротивле- ние, Н/мм ² (кгс/мм ²)	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Твёрдость, НВ
		Не менее		
1	882—1078 (90—110)	12	21	248
2	911—1107 (93—113)	8	14	255

Таблица 2

Химический состав стали дефектного
колеса по отколу (выполнено автором)

C	Mn	Si	P	S
0,52	0,85	0,25	0,035	0,04

Таблица 3

Химическое содержание металла в зоне
наvara (выполнено автором)

C	Mn	Si	Cr	P	S
0,53	0,85	0,23	0,06	0,035	0,04

• оксид алюминия Al_2O_3 значительно увеличивает стойкость к высоким температурам, препятствует критическому нагреву, является хорошим термоизолятором.

Преимущества:

- относительная простота и дешевизна процесса;
- создание покрытий конкретной толщины;
- возможность создания сложных, многослойных покрытий с уникальными свойствами и различным количеством комбинаций этих слоёв.

Недостатки:

- сильный нагрев обрабатываемой поверхности в процессе нанесения покрытия для получения адгезии, под влиянием сильного нагрева прочность основного материала снижается;
- химикаты, используемые для процесса покрытия детали, и побочные продукты являются токсичными, огнеопасными и разъедающими веществами;
- высокая стоимость материала.

Для того чтобы оценить целесообразность рассмотренной технологии, необходимо чётко понимать, какие именно мы преследуем цели, когда используем понятия производительность и живучесть. В первую очередь это нейтрализация дефектов, в число которых входят:

- отколы в зоне обода колеса;
- выщербины на поверхности катания;
- навар на поверхности катания;
- ползуны;
- излом обода колеса.

При этом механические свойства стали обода железнодорожного колеса после

операций упрочняющей обработки должны соответствовать нормативным значениям (табл. 1) [4–8].

Причиной отколов в зоне обода колеса служит в основном отделение металла обода нижележащих слоёв, что указывает на наличие сдвигающих напряжений, которые превышают предел прочности металла.

Произведённый химический анализ дефектного колеса (табл. 2) показывает, что его состав соответствовал требованиям колёсной стали по ГОСТ 10791-2011¹.

Выщербина на поверхности катания появляется вследствие отслаивания или выкрашивания металла, что происходит из-за больших контактных напряжений между рельсом и поверхностью катания.

Навар на поверхности катания появляется вследствие механического, а также большого термического воздействия на поверхность катания во время торможения подвижного состава.

Произведённый химический анализ лепестков наволакиваемого металла показывает пониженное содержание углерода и марганца в сравнении с исходным содержанием указанных элементов в колёсной стали. Можно предположить, что при высоком нагреве металла в процессе торможения происходит выгорание указанных элементов. Данные химического анализа приведены в табл. 3.

Ползуны появляются вследствие заклинивания (юза) колёсной пары на поверх-

¹ ГОСТ 10791-2011. Колёса цельнокатаные. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2011. — 32 с.

Механические свойства дефектного обода (выполнено автором)

Марка стали колеса	Временное сопротивление, кг/мм ²	Предел текучести, кг/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кГМ/см ²
1	105,0	93,0	10,0	18,2	1,75
2	110,6	95,0	11,6	19,0	1,5



Рис. 1. Основные зоны распределения твердости по сечению и на поверхности катания обода (выполнено автором).

ности катания, механическая причина юза заключается в разрушительном трении.

Излом обода колеса может происходить из-за производственного дефекта, либо из-за постепенного усталостного разрушения металла колеса, механические свойства материала обода представлены в табл. 4.

Цель настоящей работы заключается в установлении оптимального метода поверхностного упрочнения поверхности железнодорожного колеса с дефектами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Были проведены замеры твердости материала колеса по зонам сечения а, б, в (рис. 1)². В результате были получены кривые зависимости твердости по глубине металла в зонах сечения до поверхностного упрочнения (рис. 2–4) и после, по которым очевидна целесообразность применения поверхностно-упрочняющих методов обработки.

Повышение хрупкости в процессе эксплуатации объясняется присутствием большого количества неметаллических включений, понижающих плотность металла поверхностных слоёв при длительном торможении.

² ГОСТ 9036-88. Колёса цельнокатанные. Конструкция и размеры. — М.: Издательство стандартов, 1989. — 16 с.

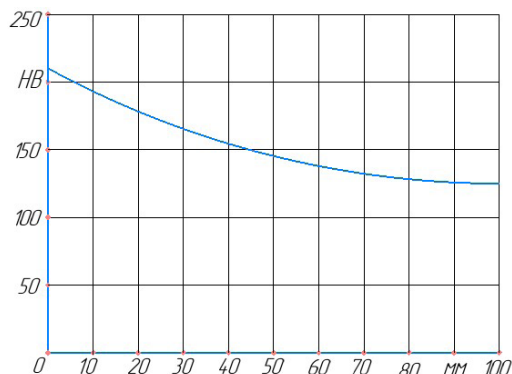


Рис. 2. Кривая зависимости твердости по глубине металла в зоне сечения а (выполнено автором).

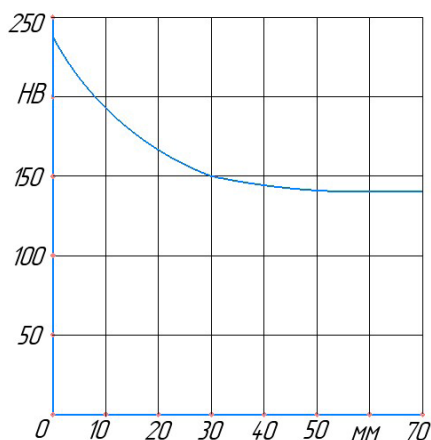


Рис. 3. Кривая зависимости твердости по глубине металла в зоне сечения б (выполнено автором).

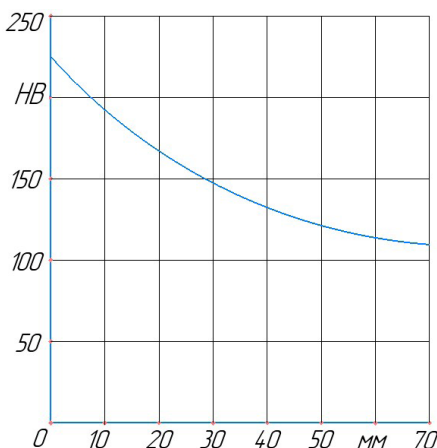


Рис. 4. Кривая зависимости твердости по глубине металла в зоне сечения в (выполнено автором).



Контроль твёрдости колеса (выполнено автором)

№ образца	Твёрдость образцов HB, кгс/мм ²	Место измерения твёрдости
1	331–375	В зоне осевой линии круга катания колеса, работающего при нормальных условиях эксплуатации
2	331–331	У края круга катания того же колеса
3	130–197	В зоне свариваемости металла того же образца
4	128–140	В зоне поверхности катания, имеющей наслоение металла
5	130–143	Твёрдости лепестков нава

Таблица 6

Значения показателей твёрдости (выполнено автором)

№ образца	Твёрдость образцов HB, кгс/мм ²	Место измерения твёрдости
1	345–375	В зоне осевой линии круга катания колеса, работающего при нормальных условиях эксплуатации
2	341–370	У края круга катания того же колеса
3	355–370	В зоне поверхности катания

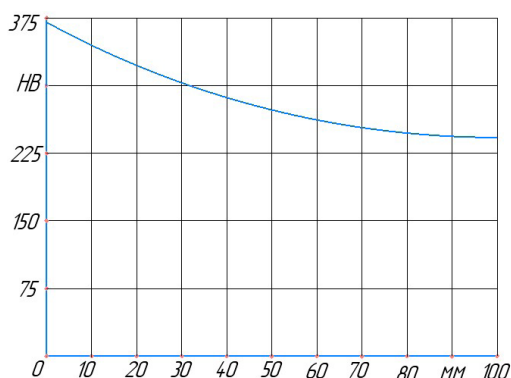


Рис. 5. Кривая зависимости твёрдости по глубине металла после поверхностного упрочнения в зоне сечения а (выполнено автором).

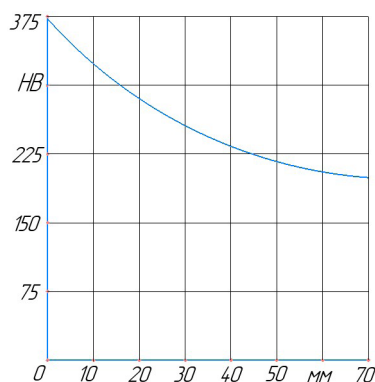


Рис. 7. Кривая зависимости твёрдости по глубине металла после поверхностного упрочнения в зоне сечения в (выполнено автором).

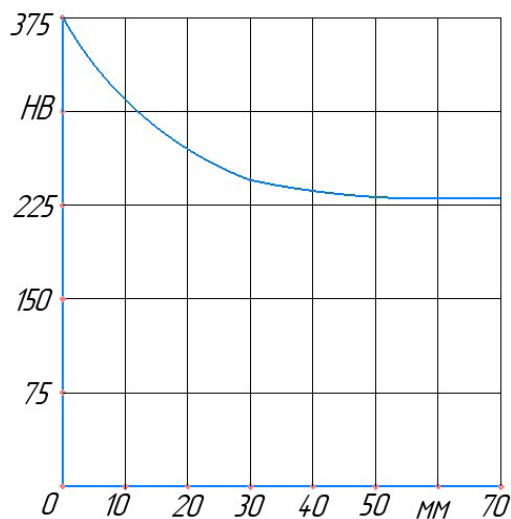


Рис. 6. Кривая зависимости твёрдости по глубине металла после поверхностного упрочнения в зоне сечения б (выполнено автором).

В результате замера твёрдости на различных участках дефектного колеса были получены данные значения (табл. 5)^{3,4}.

Рассмотрев основные дефекты колёсной пары, приходим к выводу, что поверхностное упрочнение методами PVD и CVD позволяет решить проблемы повышения живучести колеса путём повышения износостойкости [9–15]:

- карбид титана TiC повысит износостойкость металла и значительно снизит вероятность появления отколов;

³ ГОСТ 10791-2004. Колёса цельнокатанные. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2004. — 24 с. [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200037631>. Доступ 12.01.2021.

⁴ ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твёрдости по Бринеллю. — М.: Стандартинформ, 2007. — 40 с. [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/gost-9012-59>. Доступ 12.01.2021.

- нитрид титана TiN создаст защитный слой, повышающий механическую износостойчивость колеса и сопротивляющийся контактным напряжениям, что приведёт к уменьшению вероятности образования выщербин на поверхности колеса;

- оксид алюминия Al_2O_3 существенно повышает термоустойчивость металла, что позволит уменьшить вероятность образования наваров на поверхности катания в момент торможения подвижного состава;

- алюминий-титан-нитрид AlTiN создаст уникальную композитную структуру, повышающую твёрдость металла, термоустойчивость и сопротивление ударным нагрузкам, что позволит избежать излома обода колеса;

- алюминий-хром-нитрид AlCrN способствует повышению твёрдости, что приведёт к наиболее равномерному износу и уменьшению количества ползунов в процессе эксплуатации колёсной пары.

Значения твёрдости в различных частях колеса после применения упрочняющих технологий приведены в табл. 6.

Кривые зависимости твёрдости по глубине металла после поверхностного упрочнения в зонах сечения представлены на рис. 5–7.

ВЫВОДЫ

Таким образом, используемые методы PVD и CVD поверхностно-упрочняющих технологий позволяют предупредить или устранить большинство известных дефектов цельнокатаного колеса, упрочнить поверхность катания и обод колеса, тем самым повысив живучесть колеса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев С. Н., Грибков А. А., Алёшин С. В. Технологии nanoобработки. — Старый Оскол: ТНТ, 2008. — 242 с. [Электронный ресурс]: <http://msi.ulstu.ru/files/%D0%93%D1%80%D0%B8%D0%B3%D0%BE%D1%80%D1%8C%D0%B5%D0%B2%20%D0%A1.%D0%9D.%20%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B8%20%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%BA%D0%B8.pdf>. Доступ 12.01.2021.
2. Жабров В. А., Марголин В. И., Павельев В. С. Введение в нанотехнологию (Общие сведения, понятия и определения). — Самара: СГАУ, 2007. — 172 с. [Электронный ресурс]: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Uchebnye-posobiya/Vvedenie-v-nanotehnologiu-obshiesvedeniya-ponyatiya-i-opredeleniya-Elektronnyi-resurs-ucheb-posobie-54393/1/%d0%96%d0%b0%d0%b1%d1%80%d0%b5%d0%b5%d0%b2%20%d0%92.%d0%90.%20%d0%92%d0%b2%d0%b5%d0%b4%d0%b5%d0%bd%d0%b8%d0%b5%20%d0%b2%20>

%d0%bd%d0%b0%d0%bd%d0%be%d1%82%d0%b5%d1%85%d0%bd%d0%be%d0%bb%d0%be%d0%b3%d0%b8%d1%8e.pdf. Доступ 12.01.2021.

3. Кирчанов В. С. Наноматериалы и нанотехнологии. — Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политех. ун-та, 2016. — 193 с. [Электронный ресурс]: https://pstu.ru/files/2/file/kafedra/fpmm/of/Nanomateriali_i_nanotehnologii_bak.pdf. Доступ 12.01.2021.

4. Tsikunov, A. E. Study of defects in the rims of railway wheels. Minsk, Flame, 1966, 48 p.

5. Asplund, M., Palo, M., Famurewa, S. [et al]. A study of railway wheel profil parameters used as indicators of an increased risk of wheel defects, Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. Rail Rapid Transit, 2016, Vol. 230 (2), pp. 323–334.

6. Алехин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоёв материалов. — М.: Наука, 1983. — 280 с.

7. Алехин В. П. Физические закономерности микропластической деформации поверхностных слоёв материалов и получения нанокристаллического состояния / Машиностроительные технологии 04: Сб. пленарных докладов IV международного конгресса (Варна, Болгария, сентябрь 2004 г.). С. 12–19.

8. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов. — М.: Металлургиздат, 1960. — 265 с.

9. Нагорнов Ю. С. 101 вопрос о нанотехнологиях. — Тольятти: ТГУ, 2012. — 110 с. [Электронный ресурс]: http://window.edu.ru/resource/126/80126/files/nagornov_nano_101.pdf. Доступ 12.01.2021.

10. Новиков Л. С., Воронина Е. Н. Перспективы применения наноматериалов в космической технике. — М.: Университетская книга, 2008. — 188 с. [Электронный ресурс]: http://eb.arsu.kz:81/pdf/foreign/%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2_%D0%92%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BD%D0%B0_perspektivy_primeneniya_nanomateria.pdf. Доступ 12.01.2021.

11. Кирчанов В. С. Физические основы нанотехнологий фотоники и оптоинформатики. — Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политех. ун-та, 2020. — 268 с. [Электронный ресурс]: https://pstu.ru/files/2/file/kafedra/fpmm/of/Fizicheskie_osnovi_nanotehnologiyi_fotoniki_i_optoinformatiki_mag.pdf. Доступ 12.01.2021.

12. Алехин В. П., Алехин О. В. Нанотехнология поверхностной упрочняющей и финишной обработки деталей из конструкционных и инструментальных сталей // Машиностроение и инженерное образование. — 2007. — № 4. — С. 2–13. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12051704>. Доступ 12.01.2021.

13. Liu, Sen Hui; Li, Cheng-Xin; Li, Lu; Huang, Jia-Hua; Xu, Pan; Hu, Ying-Zhen; Yang, Guan-Jun; Li, Chang-Jiu. Development of long laminar plasma jet on thermal spraying process: microstructures of zirconia coatings. Surface and Coatings Technology, 2018, Vol. 337, pp. 241–249. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.01.003.

14. Xiang, Yong; Yu, Deping; Liu, Fangyuan; Lv, Cheng; Yao, Jin. Determining the heat flux distribution of laminar plasma jet impinging upon a flat surface: an indirect method using surface transformation hardening. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, Vol. 118, pp. 879–889. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.050.

15. Алехин В. П., Алехин О. В. Физические закономерности микропластической деформации поверхностных слоёв материалов // Деформация и разрушение материалов. — 2005. — № 9. — С. 24–31. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12000469>. Доступ 12.01.2021.

