

## ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПЛАВКОЙ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС\*

**В.Д. Позняков, А.А. Гайворонский, А.В. Клапатюк, А.С. Шишкевич, В.А. Ящук**

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Выполнены исследования и разработана порошковая проволока марки ПП-АН180МН/98 для восстановления наплавкой износа перспективных железнодорожных колес повышенной прочности. Определен комплекс физико-механических свойств наплавленного металла. Установлено, что при применении проволоки ПП-АН180МН/98 для наплавки колес повышенной прочности, независимо от температуры предварительного подогрева и количества слоев наплавки, твердость наплавленного металла является оптимальной (0,94...1,0 твердости рельса). При этом на всех участках соединения (в наплавленном металле, зоне сплавления и на участке перегрева металла ЗТВ) формируется сравнительно однородная бейнитно-мартенситная структура. Наплавленный металл отличается высоким уровнем сопротивляемости хрупкому разрушению и износу при трении-скольжении в контакте с рельсовой сталью. Полученные результаты исследований позволяют заключить, что при применении порошковой проволоки ПП-АН180МН/98 для наплавки восстановленные колеса будут иметь высокую надежность и будет обеспечена безопасность движения транспорта в условиях растущих эксплуатационных нагрузок. Библиогр. 17, табл. 5, рис. 4.

*Ключевые слова:* электродуговая наплавка, железнодорожное колесо, порошковая проволока, структура, механические свойства, хрупкое разрушение, износ

Для изготовления колес грузовых вагонов в Украине сегодня используется высокопрочная колесная сталь марки 2, содержание углерода в которой составляет 0,55...0,65 %. Данная сталь обеспечивает достаточно высокие показатели механических свойств металла колеса — предел прочности  $\sigma_b = 930...1130$  МПа, твердость обода колеса  $HV \geq 2500$  МПа [1, 2]. Колеса, изготовленные из такой стали, при относительно небольшой стоимости имеют достаточно высокую надежность при эксплуатации. Уровень нагрузки на ось колесной пары грузовых вагонов при эксплуатации на железнодорожных путях Украины и стран СНГ составляет до 23,5 т.

В процессе эксплуатации колеса изнашиваются по профилю качения. Из-за особенностей работы пары трения-качения «колесо-рельс» более интенсивно изнашивается рабочая поверхность гребня колеса, а на поверхности катания колес часто образуются дефекты типа «выщерблины». Износ гребня происходит в результате механического трения, а при образовании «выщерблин» реализуется термомеханический характер возникновения дефекта вследствие формирования закалочных структур в приповерхностном слое металла колеса [3–5].

Традиционно при восстановлении изношенных гребней колес применяют технологии наплавки,

что экономически выгодно. Восстановление износа гребня наплавкой позволяет уменьшить отходы металла обода при механической обточке по профилю катания колеса, а также снизить износ гребня за счет наплавки металла с заданными свойствами на его поверхность [6, 7]. Колеса с «выщерблинами» сегодня наплавкой не восстанавливают, и их подвергают обточке до полного устранения дефектов.

В настоящее время для наплавки гребней железнодорожных колес рекомендовано применение проволок сплошного сечения типа Св-08ХМ, Св-08ХМФ и Св-10ХН2ГСМФТЮ, а также порошковую проволоку марки ПП-АН180МН/90 (система легирования 10ХНМГСФТ). Наплавка проволоками сплошного сечения выполняется под слоем флюса, а порошковой проволокой — как под флюсом, так и в среде защитных газов. Металл, наплавленный с применением данных сварочных материалов, отвечает уровню прочности и твердости железнодорожных колес, изготовленных из колесной стали марки 2, а также отличается повышенной износостойкостью.

Современные тенденции развития отечественного магистрального железнодорожного транспорта направлены на увеличение нагрузки на ось до 27,5 т и скорости движения грузовых поездов до 150 км/ч, что требует применения колес более высокой прочности, металл которых бы имел достаточно высокий уровень трещиностойкости и износостойкости. В связи с этим сегодня в Украине, на основании колесной стали марки 2,

\* По материалам доклада, представленного на Международной конференции «Материалы для сварки, наплавки, нанесения покрытий и 3D-технологий», 04–05 июня 2019 г., г. Киев.

© В.Д. Позняков, А.А. Гайворонский, А.В. Клапатюк, А.С. Шишкевич, В.А. Ящук, 2019

**Таблица 1.** Химический состав наплавленного металла опытных порошковых проволок, мас. %

Проволока ПП-АН180МН/90	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	V	S	P
I	0,07	0,42	0,8	0,8	0,5	0,018	0,08	0,01	0,025
II	0,14	0,62	1,3	1,1	0,7	0,028	0,10	0,02	0,025
III (ПП-АН180МН/98)	0,12	0,48	1,15	0,96	0,7	0,022	0,10	0,02	0,03
IV	0,067	0,45	1,02	0,32	0,4	0,016	0,10	0,01	0,01

разрабатываются новые колесные стали, повышение физико-механических свойств которых решается путем их микролегирования карбо- и нитридообразующими элементами [8–10].

Очевидно, что рекомендованные сварочные материалы не могут быть использованы для восстановления наплавкой разрабатываемых колес повышенной прочности. Поэтому целью настоящей работы было создание нового сварочного материала, с применением которого наплавленный металл соответствовал бы комплексу свойств металла колес повышенной прочности. Это позволит существенно увеличить ресурс эксплуатации новых колес и обеспечить безопасность движения на железнодорожном транспорте при повышении эксплуатационных нагрузок.

**Методы исследований.** При разработке нового сварочного материала применялись методы физических испытаний для оценки прочностных, пластических свойств и ударной вязкости наплавленного металла согласно ГОСТ 1497 и ГОСТ 9454. Износостойкость определяли в соответствии с принятыми методами испытаний на износ при «трении–скольжении» контактируемых поверхностей металлических изделий [11, 12]. Сопrotивляемость наплавленного металла хрупкому разрушению оценивали при трехточечном изгибе с использованием критериев механики разрушения [13, 14]. При исследованиях структурных изменений в металле применяли традиционные методы оптической микроскопии.

В качестве объекта исследований использовали металл, наплавленный проволокой ПП-АН-180МН/90 и новым разрабатываемым сварочным материалом. В некоторых экспериментах для сравнения использовались проволоки марок Св-08ХМ и Св-10ХН2ГСМФТЮ.

**Разработка сварочного материала.** Для разработки нового сварочного материала за основу была взята порошковая проволока марки ПП-АН-180МН/90 (10ХНМГСФТ). В качестве шлаковой системы новой порошковой проволоки была выбрана система  $\text{CaO-MgO-CaF}_2\text{-SiO}_2$ , которая традиционно используется в ряде проволок типа ПП-АН180МН. Опытные составы наплавленного металла при разработке новой проволоки показаны в табл. 1.

Одним из основных показателей механических характеристик наплавленного металла, который определяет его эксплуатационные свойства, является твердость. Для определения показателей твердости наплавленного металла на первом этапе разработки проволоки выполняли сравнительные одно-, двух- и трехслойные наплавки в среде защитных газов на погонной энергии  $8,5 \dots 10 \text{ кДж/см}^2$  на образцы колесной стали марки 2 (0,58 % C) размером  $200 \times 100 \times 20 \text{ мм}$ . Температура предварительного подогрева составляла  $150^\circ\text{C}$ , как и при наплавке гребней железнодорожных колес. Твердость определяли на поверхности наплавки с применением твердомера марки ТК в единицах HRC с последующим переводом в единицы HB. Результаты замеров твердости приведены в табл. 2.

Как видно, твердость 1-го, 2-го и 3-го слоев наплавленного металла, выполненного опытной порошковой проволокой II, превышает твердость рельсовой стали ( $HB \geq 3200 \text{ МПа}$ ). Оптимизированные легирующая и шлаковая системы опытной порошковой проволоки III обеспечивают стабильные показатели твердости 2-го и 3-го слоев наплавленного металла (на уровне  $3000 \dots 3200 \text{ МПа}$ ). С легирующей системы порошковой проволоки удален молибден без снижения механических и технологических характеристик. Опытный образец порошковой проволоки ПП-АН180МН/90 (III) был взят за основу и получил рабочую марку ПП-АН180МН/98.

Структура наплавленного металла при использовании проволоки ПП-АН180МН/90 и ПП-АН-180МН/98 характеризуется как бейнитно-мар-

**Таблица 2.** Твердость наплавленного металла в зависимости от химического состава и количества слоев наплавки ( $T_{\text{пл}} = 150^\circ\text{C}$ )

Проволока ПП-АН180МН/90	Количество слоев наплавки	HB, МПа
I	1	2500...2700
	2	2300...2500
	3	2000...2300
II	1	3200...3700
	2	3500...3600
	3	3400...3500
III (ПП-АН180МН/98)	1	3200...3500
	2	3000...3200
	3	2800...3100
IV	1	2400...2700
	2	2200...2400
	3	2000...2200

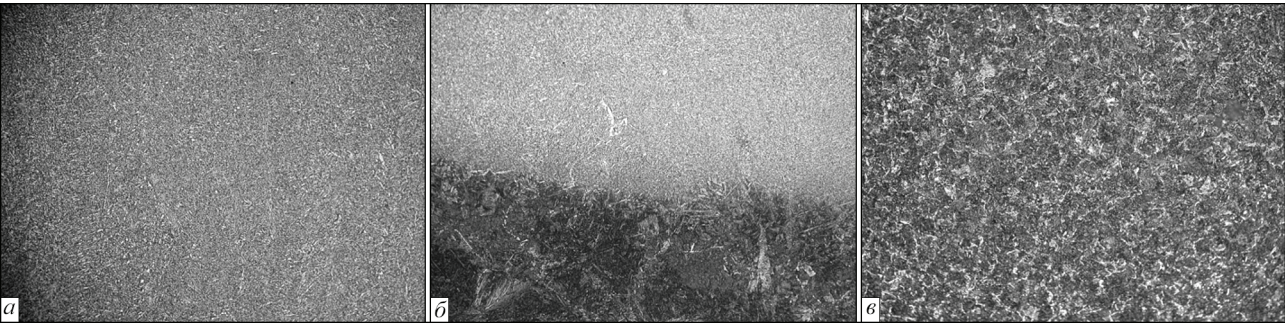


Рис. 1. Микроструктура (×200) однослойной наплавки проволокой ПП-АН180МН/98, выполненной на погонной энергии 8,9 кДж/см при  $T_{\text{пл}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ : а — наплавленный металл; б — зона сплавления; в — участок перегрева металла ЗТВ

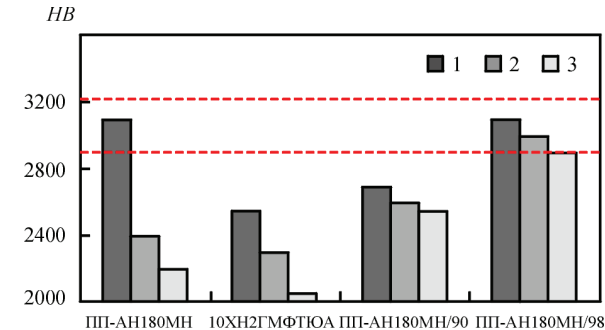


Рис. 2. Твердость наплавленного металла при  $T_{\text{пл}} = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 1 — 1-й слой; 2 — 2-й слой; 3 — 3-й слой

тенситная. При наплавке без предварительного подогрева проволокой ПП-АН180МН/90 соотношение структурных составляющих бейнита и мартенсита составляет 55/45, при предварительном подогреве 100 °С — 70/30. При наплавке в аналогичных условиях проволокой ПП-АН180МН/98 соотношение бейнита и мартенсита соответственно 50/50 и 65/35. Микротвердость структурной составляющей бейнита в зависимости от температуры предварительного подогрева изменяется в диапазоне от 2820 до 3090 МПа, мартенсита — от 3290 до 3660 МПа. В зоне сплавления и на участке крупного зерна в ЗТВ доля бейнита повышается до 75 %. Характерные структуры металла соединений при наплавке проволокой ПП-АН-180МН/98 показаны на рис. 1.

Таблица 3. Твердость металла при наплавке проволокой ПП-АН180МН/98 ( $T_{\text{пл}} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Способ наплавки	Погонная энергия наплавки, кДж/см	Количество слоев наплавки, шт.	НВ, МПа
В среде CO <sub>2</sub>	8,5...10	1	3200...3500
		2	3100...3150
		3	3000...3200
Под слоем флюса АН-60	9...11	1	3200...3500
		2	3000...3200
		3	2800...3100

Таблица 4. Механические свойства металла при наплавке проволокой ПП-АН180МН/98 ( $T_{\text{пл}} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , способ наплавки — в среде CO<sub>2</sub>)

$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>			НВ, МПа
				20	−40	−60	
800	890	10,7	54,3	96,0	76,8	66,5	3000...3200

На втором этапе оценили уровень твердости наплавленного металла при наплавке колесной стали марки 2 с предварительным подогревом 250 °С. Такая температура металла характерна для обода колеса после 5-го прохода при непрерывном процессе наплавки гребня. Результаты исследований приведены на рис. 2. На рисунке для сравнения приведены также данные значений твердости металла, наплавленного другими материалами. Штрихпунктирной линией отмечен уровень твердости колес повышенной прочности. Как видно, порошковая проволока ПП-АН180МН/98 обеспечивает стабильно высокие результаты по твердости наплавленного металла даже при такой температуре.

Порошковая проволока ПП-АН180МН/98 относится к проволокам с малошлаковой основой (шлакообразующих компонентов менее 6 %), что позволяет исключить негативное влияние сепарации компонентов шихты при производстве проволоки на ее сварочно-технологические свойства и обеспечить стабильность свойств наплавленного металла. Соотношение компонентов, составляющих шлаковую основу, обеспечивает высокие параметры сварочно-технологических свойств в части отделимости шлаковой корки, растекаемости наплавленного металла, формирования поверхности валиков и плавных переходов между валиками и основным металлом. Шлаковая основа проволоки обеспечивает высокую устойчивость против пор при малых затратах защитного газа (8...10 л/мин.) и низкий уровень диффузного водорода в наплавленном металле (0,3...0,5 см<sup>3</sup>/100 г), что позволяет говорить о высокой сопротивляемости наплавленного металла образованию холодных трещин.

Легирующая основа сварной проволоки включает такие компоненты как хром, никель, марганец и титан, обеспечивающие достаточно высокую твердость наплавленного металла (табл. 3) при необходимом уровне механических характеристик. Механические свойства наплавленного металла, выполненного проволокой ПП-АН-180МН/98, представлены в табл. 4.



Таблица 5. Сопротивляемость наплавленного металла хрупкому разрушению

Сварочный материал	$T_{\text{сп}}, ^\circ\text{C}$	Структура наплавленного металла	$K_{1c}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	
			20 $^\circ\text{C}$	-40 $^\circ\text{C}$
Св-08ХМ	-	Бейнитная	97,9	88,5
	100	Бейнитно-перлитная	86,4	69,8
ПП-АН180МН/90	-	Бейнитно-мартенситная 55/45	105,6	92,2
	100	Бейнитно-мартенситная 70/30	110,3	97,7
ПП-АН180МН/98	-	Бейнитно-мартенситная 50/50	104,2	90,6
	100	Бейнитно-мартенситная 65/35	109,8	96,2

Таким образом, оптимизированная легирующая система порошковой проволоки ПП-АН-180МН/98 обеспечивает более высокие и стабильные показатели твердости наплавленного металла (на уровне 3000...3200 МПа), чем при наплавке другими материалами. Эти показатели являются оптимальными как при однослойной, так и при многослойной наплавке железнодорожных колес. Как показали дальнейшие исследования, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН-180МН/98 металл имеет также повышенную сопротивляемость и хрупкому разрушению.

**Сопротивляемость наплавленного металла хрупкому разрушению.** Известно, что сопротивляемость наплавленного металла против образования трещин под действием внешнего нагружения зависит от его структурного состояния, которое определяется его химическим составом и скоростью охлаждения. Наличие диффузного водорода в наплавленном металле также существенно влияет на образование и развитие трещин. Количество диффузионного водорода в наплавленном металле определяется способом и режимами сварки, а степень его диффузии — химическим составом и температурой металла.

Образцы наплавленного металла для испытаний вырезали из многослойных соединений, которые выполняли в разделку стыкового соединения с зазором в корне 10 мм. Наплавки выполняли под слоем флюса АН-60. Применяли следующие сварочные материалы: проволока сплошного сечения Св-08ХМ диаметром 3 мм и порошковые проволоки ПП-АН180МН/90 и ПП-АН180МН/98 диаметром 2 мм. Погонная энергия наплавки была в пределах 9...11 кДж/см. Наплавку выполняли без и с предварительным подогревом металла до температуры  $T_{\text{сп}} = 100 ^\circ\text{C}$ . Содержание диффузионного водорода в наплавленном металле, который определяли методом «карандашной пробы», при наплавке проволокой Св-08ХМ составляло 3,5...3,8 мл/100 г, проволоками ПП-АН180МН/90 и ПП-АН180МН/98 — 2,2...2,4 мл/100 г.

Предварительно в образцах выращивали трещину усталости глубиной 3,0 мм. В последующем образцы испытывали при трехточечном изгибе.

Критерием оценки сопротивляемости хрупкому разрушению наплавленного металла был критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{1c}$  при разрушении образцов, который подсчитывали согласно стандартных методов механики разрушения [15]. Результаты испытаний наплавленного металла хрупкому разрушению обобщены в табл. 5.

Установлено, что без предварительного подогрева сопротивляемость хрупкому разрушению наплавленного металла при применении порошковых проволок ПП-АН180МН/90 и ПП-АН180МН/98 примерно на 10 % выше, чем при наплавке проволокой Св-08ХМ. При предварительном подогреве до температуры 100  $^\circ\text{C}$  эта разница увеличивается. Повышение критического коэффициента интенсивности напряжений составляет уже 22 % при температуре испытаний 20  $^\circ\text{C}$  и 40 % при -40  $^\circ\text{C}$ . При этом разрушение наплавленного металла, независимо от способа наплавки и температуры предварительного подогрева, при развитии магистральной трещины происходит хрупко.

Следует также отметить, что сопротивляемость металла, наплавленного проволокой Св-08ХМ, хрупкому разрушению, при предварительном подогреве снижается на 12 % при температуре испытаний 20  $^\circ\text{C}$  и на 21 % при -40  $^\circ\text{C}$ . При наплавке порошковыми проволоками, наоборот, при применении предварительного подогрева до температуры 100  $^\circ\text{C}$  сопротивляемость хрупкому разрушению металла шва возрастает примерно на 4 %.

Установленные изменения в сопротивляемости наплавленного металла хрупкому разрушению в зависимости от системы легирования сварочного материала и температуры предварительного подогрева можно объяснить совместным действием двух факторов. Во-первых, содержание диффузионного водорода в наплавленном порошковыми проволоками металле почти в 1,5 раза ниже, чем при наплавке проволокой Св-08ХМ (2,3 против 3,65 мл/100 г). Во-вторых, это структурный фактор. Закаленный металл, который имеет смешанную бейнитно-мартенситную структуру, имеет более высокую сопротивляемость хрупкому раз-

рушению, чем металл с только бейнитной структурой, или со структурой, в которой есть доля перлитной составляющей [14, 16].

#### Износостойкость наплавленного металла.

Износостойкость является одним из главных показателей эксплуатационной прочности восстановленных наплавкой железнодорожных колес. Износостойкость наплавленного металла оценивали при «трении-скольжении» модельных образцов. Испытания выполняли согласно принятым методам исследований [12, 17]. В соответствии с методом образец наплавленного металла размером  $25 \times 15 \times 3$  мм прижимали к контртелу из рельсовой стали марки М-76, которое вращалось с постоянной скоростью (рис. 3). Усилие прижима образца составляло 81,3 Н, скорость вращения контртела 30 об/мин, время испытания 30 мин.

В результате контакта образца наплавленного металла и контртела с рельсовой стали происходил износ металлов — на образце образовалась лунка постоянной глубины, а на поверхности контртела образовывалась кольцевидная дорожка. Величину износа контртела по массе (г, мг) определяли путем взвешивания до и после нагрузки на аналитических весах (точность 0,0005 г), а износ образца определяли по объему лунки ( $V$ , мм<sup>3</sup>).

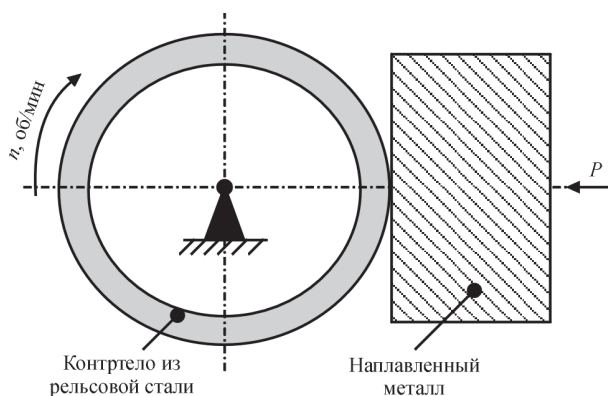


Рис. 3. Условная схема при испытании образцов наплавленного металла при «трении-скольжении»

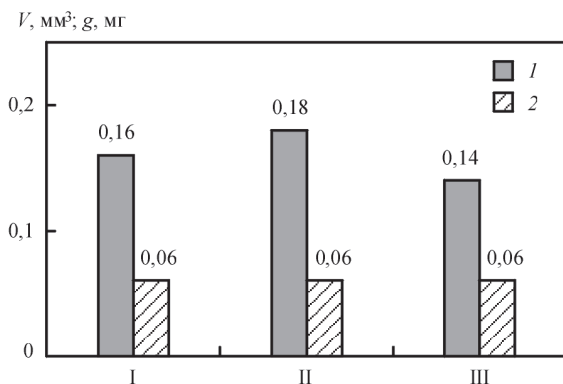


Рис. 4. Износ металла, наплавленного проволоками ПП-АН-180МН/90 (I, II) и ПП-АН180МН/98 (III) при  $T_{\text{пл}} = 150$  °C: I, III — наплавка под слоем флюса; II — в среде CO<sub>2</sub> (1 —  $V$ , колесная сталь; 2 —  $q$ , рельсовая сталь)

Обобщенные результаты испытаний наплавленного металла различных систем легирования приведены на рис. 4.

Как видно из приведенных данных, при наплавке в среде защитного газа проволокой ПП-АН180МН/90, в отличие от наплавки под слоем флюса, износостойкость наплавленного металла снижается примерно на 11 % (поз. 1 и 2). Это связано с особенностями протекания металлургических процессов при различных способах наплавки. При наплавке в среде углекислого газа частичное выгорание титана из металла происходит более интенсивно. При наплавке проволокой ПП-АН180МН/98 под слоем флюса (поз. 3) износостойкость наплавленного металла повышается примерно на 12,5 %.

#### Выводы

1. На базе порошковой проволоки ПП-АН-180МН/90, за счет оптимизации системы легирования (10ГСХНФТ) и малошлаковой основы ( $\text{CaF}_2\text{--CaCO}_3\text{--MgO--SiO}_2$ ), которая не подвержена сепарации, разработана новая порошковая проволока ПП-АН180МН/98 (12ГСХ1НФТ).

2. При применении проволоки ПП-АН-180МН/98 для наплавки колес повышенной прочности, независимо от температуры предварительного подогрева и количества слоев наплавки, твердость наплавленного металла является оптимальной и составляет  $HV = 3000 \dots 3200$  МПа (твердость рельса  $HV \geq 3200$  МПа). При этом на всех участках соединения (в наплавленном металле, зоне сплавления и на участке перегрева металла ЗТВ) формируется сравнительно однородная бейнитно-мартенситная структура.

3. Металл, наплавленный проволокой ПП-АН-180МН/98, имеет высокую сопротивляемость износу при «трении-скольжении» при контакте с рельсом. Износостойкость наплавленного металла, выполненного проволокой ПП-АН180МН/98, на 12,5 % выше, чем при наплавке проволокой ПП-АН180МН/90. При этом износ рельса не увеличивается.

4. Наплавленный металл отличается высоким уровнем сопротивляемости хрупкому разрушению, что позволяет рекомендовать проволоку ПП-АН180МН/98 к применению для наплавки колес повышенной прочности. Восстановленные колеса при этом будут иметь высокую надежность и будет обеспечена безопасность движения транспорта в условиях растущих эксплуатационных нагрузок.

#### Список литературы

1. Узлов И.Г. (2003) Прогрессивные процессы производства и качество железнодорожных колес. *Сталь*, 5, 69–72.

2. Железнодорожные колеса и бандажи K LW (Интерпайп НТЗ Украина). [www.interpipe.biz](http://www.interpipe.biz).
3. Вакуленко І.О., Анофрієв В.Г., Грищенко М.А., Перков О.М. (2009) Дефекти залізничних коліс. Дніпропетровськ, Маковецький.
4. Бабаченко А.И., Кононенко А.А., Деметієва Ж.А. и др. (2010) Исследование причин образования дефектов на поверхности катания высокопрочных колес в процессе эксплуатации. *Залізничний транспорт України*, **5**, 35–38.
5. Осташ О.П., Андрейко І.М., Кулик В.В., Прокопєць В.І. (2011) Контактно-втомна пошкоджувальність поверхні кочення залізничних коліс типу КП-2 та КП-Т. *Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*, **39**, сс. 118–122.
6. (1998) Ресурсосберегающие технологии восстановления железнодорожной техники сваркой, наплавкой и напылением. *Труды ВНИИЖТ*. Лозинский В.Н. (ред.). Москва, Интеллект.
7. Гайворонский А.А., Позняков В.Д., Маркашова Л.И. и др. (2012) Влияние состава наплавленного металла на структуру и механические свойства железнодорожных колес. *Автоматическая сварка*, **8**, 18–24.
8. Узлов И.Г., Бабаченко А.И., Деметієва Ж.А. (2005) Влияние микролегирования стали на вязкость разрушения железнодорожных колес. *Металлургия и горнорудная промышленность*, **5**, 46–47.
9. Бабаченко А.И., Литвиненко П.Л., Кныш А. В. и др. (2011) Совершенствование химического состава стали для железнодорожных колес, обеспечивающего повышение их стойкости к образованию дефектов на поверхности катания. *Фундамент. и прикл. проблемы черной металлургии. Сб. научн. тр. ИЧМ НАН Украины*, **23**, сс. 226–233.
10. Иванов Б.С., Филипов Г.А., Демин К.Ю. и др. (2007) Модифицирование колесной стали азотом. *Сталь*, **9**, 22–25.
11. Рыбакова Л.М., Куksenova Л.И. (1982) *Структура и износостойкость металла*. Москва, Машиностроение.
12. Артемов И.И., Савицкий В.Л., Сорокин С.А. (2004) *Моделирование изнашивания и прогнозирование ресурса трибосистем*. Пенза, Пензенский гос. ун-т.
13. (1972) *Новые методы оценки сопротивляемости металлов хрупкому разрушению*. Роботнов Ю.Н. (ред.). Москва, Мир.
14. Панасюк В.В. (1991) *Механика квазихрупкого разрушения материалов*. Киев, Наукова думка.
15. ГОСТ 25.506 *Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении*.
16. Єфіменко М.Г., Радзівілова Н.О. (2003) *Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань*. Харків, НТУ «ХПІ».
17. Рябцев И.И., Черняк Я.П., Осин В.В. (2004) Блочно-модульная установка для испытаний наплавленного металла, *Сварщик*, **1**, С.18–20.

## References

1. Uzlov, I.G. (2003) Advanced processes of production and quality of railway wheels. *Stal*, **5**, 69-72 [in Russian].
2. *Railway wheels and tires K LW. Interpipe NTZ Ukraine*, [www.interpipe.biz](http://www.interpipe.biz) [in Russian].
3. Vakulenko, I.O., Anofriev, V.G., Gryshchenko, M.A., Perkov, O.M. (2007) *Defects of railway wheels*. Dnipropetrovsk, Makovetsky [in Ukrainian].
4. Babachenko, A.I., Kononenko, A.A., Dementieva, Zh.A. et al. (2010) Examination of causes of defect formation on roll surface of high-strength wheels during operating process. *Zaliznychny Transport Ukrainy*, **5**, 35-38 [in Russian].
5. Ostash, O.P., Andrejko, I.M., Kulyk, V.V., Prokopets, V.I. (2011) Contact-fatigue damage of roll surface of railway wheels of KP-2 and KP-T type. *Visnyk DNUZT*, **39**, 118-122 [in Ukrainian].
6. (1998) *Resource-saving technologies of repair of railway engineering using welding, surfacing and spattering*. *Trudy VNIIZhT*. Ed. by V.N. Lozinsky. Moscow, Intellect [in Russian].
7. Gajvoronsky, A.A., Poznyakov, V.D., Markashova, L.I. et al. (2012) Influence of deposited metal composition on structure and mechanical properties of reconditioned railway wheels. *The Paton Welding J.*, **8**, 16-22.
8. Uzlov, I.G., Babachenko, A.I., Dementieva, Zh.A. (2005) Influence of microalloying of steel on fracture toughness of railway wheels. *Metallurgiya i Gornorudnaya Promyshlennost*, **5**, 46-47 [in Russian].
9. Babachenko, A.I., Litvinenko, P.L., Knysh, A.V. et al. (2011) Improvement of chemical composition of steel for railway wheels providing increase of their resistance to defect formation on roll surface. In: *Fundamentals and Applied Problems of Ferrous Metallurgy: Transact. of IFM*, **23**, 226-233 [in Russian].
10. Ivanov, B.S., Filipov, G.A., Demin, K.Yu. et al. (2007) Modification of wheel steel by nitrogen. *Stal*, **9**, 22-25 [in Russian].
11. Rybakova, L.M., Kuksenova, L.I. (1982) *Structure and wear resistance of metal*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
12. Artemov, I.I., Savitsky, V.L., Sorokin, S.A. (2004) *Modeling of wear and prediction of pipe system life*. Penza, PSU [in Russian].
13. (1972) *New methods of evaluation of metal resistance to brittle fracture*. Ed. by Yu.N. Robotnov. Moscow, Mir [in Russian].
14. Panasyuk, V.V. (1991) *Mechanics of quasibrittle fracture of materials*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
15. GOST 25.506: *Methods of mechanical tests of metals. Determination of characteristics of crack resistance (fracture toughness) at static loading*.
16. Efimenko, M.G., Radzivilova, N.O. (2003) *Physical metallurgy and heat treatment of welded joints*. Kharkiv, NTU KhPI [in Ukrainian].
17. Ryabtsev, I.I., Chernyak, Ya.P., Osin, V.V. (2004) Block-module installation for tests of deposited metal. *Svarshchik*, **1**, 18-20 [in Russian].

## ПОРОШКОВИЙ ДРІТ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ НАПЛАВЛЕННЯМ ЗНОШЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛЕС

В.Д. Позняков, О.А. Гайворонський, А.В. Клапатюк, О.С. Шишкевич, В.А. Ящук

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Виконано дослідження і розроблено порошковий дріт марки ПП-АН180МН/98 для відновлення наплавленням зносу перспективних залізничних коліс підвищеної міцності. Визначено комплекс фізико-механічних властивостей наплавленого металу. Встановлено, що при застосуванні дроту ПП-АН180МН/98 для наплавлення коліс підвищеної міцності, незалежно від температури попереднього підігріву і кількості шарів наплавки, твердість наплавленого металу є оптимальною (0,94...1,0 твердості рейки). При цьому на всіх ділянках з'єднання (в наплавленому металі, зоні сплаву і на ділянці перегріву металу ЗТВ) формується порівняно однорідна бейнітно-мартенситна структура. Наплавлений метал відрізняється високим рівнем опірності крихкому руйнуванню і зносу при терті-ковзанні в контакт з рейковою сталлю. Отримані результати досліджень дозволяють зробити висновок, що при застосуванні порошкового дроту



ПП-АН180МНч/98 для наплавлення відновлені колеса будуть мати високу надійність і буде забезпечена безпека руху транспорту в умовах зростаючих експлуатаційних навантажень. Бібліогр. 17, табл. 5, рис. 4.

*Ключові слова: електродугове наплавлення, залізничне колесо, порошковий дріт, структура, механічні властивості, крихке руйнування, знос*

## FLUX-CORED WIRE FOR RESTORATION SURFACING OF WORN SURFACES OF RAILWAY WHEELS

V.D. Poznyakov, A.A. Gaivoronskiy, A.V. Klapatyuk, A.S. Shishkevich, V.A. Yashchuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Research was performed and flux-cored wire of PP-AN180MN/98 grade was developed for restoration of wear by surfacing in advanced higher-strength railway wheels. A set of physico-mechanical properties of the deposited metal was determined. It is found that at application of PP-AN180MN/98 wire for surfacing higher-strength wheels, irrespective of preheating temperature and number of deposited layers, deposited metal hardness is optimum (0.94 – 1.0 of rail hardness). Here, in all the joint regions (in the deposited metal, fusion zone and overheated region of HAZ metal) a comparatively homogeneous bainite-martensite structure forms. The deposited metal features a high level of resistance to brittle fracture and wear at sliding friction in contact with rail steel. Obtained research results lead to the conclusion that at application of flux-cored wire PP-AN180MN/98 for surfacing, the restored wheels will have a high reliability, and traffic safety will be ensured under the conditions of increasing operating loads. 17 Ref., 5 Tabl., 4 Fig.

*Keywords: electric-arc surfacing, railway wheel, flux-cored wire, structure, mechanical properties, brittle fracture, wear*

Поступила в редакцию 31.05.2019

## ЖУРНАЛИ для профессионалов



Видається з 1989 р.  
Виходить 4 рази на рік  
ISSN 0235-3474  
doi.org/10.15407/tdnk  
Передплатний індекс 74475



Видається з 1948 р.  
Виходить 12 разів на рік  
ISSN 0005-111X  
doi.org/10.15407/as  
Передплатний індекс 70031



Видається з 1985 р.  
Виходить 4 рази на рік  
ISSN 2415-8445  
doi.org/10.15407/sem  
Передплатний індекс 70693

Журналы входят до Переліку наукових фахових видань України  
+38 (044) 200-82-77

journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com