

Оригинальная статья

УДК 621.791:620.17

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-3(53)-94-103

**СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ И
МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ ПОРОШКОВОЙ
ПРОВОЛОКОЙ**

© 2025 г. А. Р. Михно, Г. И. Черепанова, Н. П. Ломиворотов, Е. М. Запольская,
И. А. Панченко, С. В. Коновалов

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс,
Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Представлены исследования микроструктуры и механических характеристик наплавленных покрытий, полученных с использованием порошковых проволок, содержащих различные легирующие элементы. Особое внимание уделено двум типам порошковых проволок: EnDOtec DO*15, которая состоит из железа, хрома, молибдена и вольфрама, и более сложной системе Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V, разработанной в Сибирском государственном индустриальном университете. Получена оптимальная структура образцов, которая позволила минимизировать присутствие неметаллических включений (силикатов и оксидов), способных негативно влиять на механических характеристиках материалов. Для оценки механических свойств образцов проводили измерения нанотвердости и модуля упругости с применением нанотвердомера НаноСкан-4D. Структура проволоки EnDOtec DO*15 обеспечивает более равномерное распределение легирующих элементов, что в свою очередь способствует повышению прочности материала. В системе Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V наблюдается повышенное количество неметаллических включений, что отрицательно влияет на ее механические свойства. Наилучшие показатели нанотвердости зафиксированы для проволоки EnDOtec, однако для системы Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V модуль упругости равен 125,84 ГПа, что указывает на ее высокую эффективность при серьезных механических нагрузках. Полученные результаты подтверждают важность выбора порошковой проволоки в зависимости от конкретных требований к долговечности и механическим свойствам наплавленных покрытий.

Ключевые слова: порошковая проволока, наплавленный слой, структура, неметаллические включения, химический состав, нанотвердость

Финансирование. Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00087-2401.

Для цитирования: Михно А.Р., Черепанова Г.И., Ломиворотов Н.П., Запольская Е.М., Панченко И.А., Коновалов С.В. Сравнительное исследование микроструктурных и механических характеристик наплавленного слоя порошковой проволокой. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;3(53):94–103. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-94-103](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-94-103)

Original article

COMPARATIVE STUDY OF MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE DEPOSITED LAYER BY POWDER WIRE

© 2025 A. R. Mikhno, G. I. Cherepanova, N. P. Lomivorotov, E. M. Zapolskaya,
I. A. Panchenko, S. V. Konovalov

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. Studies of the microstructure and mechanical characteristics of deposited coatings obtained using powder wires containing various alloying elements are presented. Special attention is paid to two types of hollow wires: EnDOtec DO*15, which consists of iron, chromium, molybdenum and tungsten, and the more complex Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V system developed at the Siberian State Industrial University. The optimal structure of the samples was obtained, which made it possible to minimize the presence of non-metallic inclusions (silicates and oxides) that can negatively affect the mechanical characteristics of the materials. To assess the mechanical properties of the samples, measurements of nanohardness and modulus of elasticity were carried out using a NanoScan-4D nanohardometer. The structure of the EnDOtec DO*15 wire ensures a more uniform distribution of alloying elements, which in turn contributes to an increase in the strength of the material. The Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V system has an increased number of nonmetallic inclusions, which negatively affects its mechanical properties. The best nanohardness values were recorded for EnDOtec wire, however, the Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V system had an elasticity modulus of 125.84 GPa, which indicates its high efficiency under severe mechanical loads. The results obtained confirm the importance of choosing a powder wire depending on the specific requirements for durability and mechanical properties of the deposited coatings.

Keywords: powder wire, deposited layer, structure, non-metallic inclusions, chemical composition, nanohardness

Funding. Research was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-00087-2401.

For citation: Mikhno A.R., Cherepanova G.I., Lomivorotov N.P., Zapolskaya E.M., Panchenko I.A., Konovalov S.V. Comparative study of microstructural and mechanical characteristics of the deposited layer with flux-cored wire. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;3(53):94–103. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-94-103](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-94-103)

Введение

Основной технологический инструмент в прокатном переделе металлургических предприятий – это прокатные валки. В ходе эксплуатации при осуществлении пластической деформации металла валки подвергаются значительным удельным давлениям и термическим воздействиям, что приводит к их интенсивному изнашиванию [1 – 3]. В связи с этим проблема проведения качественного ремонта валков становится особенно актуальной [4]. В последнее время широкое распространение получила восстановительная электродуговая наплавка прокатных валков с использованием порошковых проволок, что позволяет существенно увеличить срок службы деталей и улучшить эксплуатационные характеристики [5; 6].

Рассматриваемая технология позволяет не только восстанавливать изношенные поверхности, но и улучшать физико-механические свойства материалов, что, в свою очередь, по-

ложительно сказывается на производственных показателях металлургических предприятий. Несмотря на свои преимущества, рассматриваемая технология не лишена определенных недостатков, что обуславливает необходимость совершенствования составов шихты порошковых проволок и методов их применения для достижения более качественных результатов ремонтных операций [7 – 9]. Актуальным становится проведение теоретических и экспериментальных исследований, направленных на изучение физической природы процессов упрочнения и формирования защитных свойств поверхностных слоев валков, полученных с помощью электродуговых покрытий. На текущий момент восстановление изнашивающихся поверхностей механизмов с помощью порошковой проволоки рассматривается как перспективное направление развития технологий ремонта [10; 11].

Целью настоящей работы является определение оптимальной структуры наплавленных покрытий с минимальным содержанием неметаллических включений (силикатов и оксидов), а также оценка механических характеристик нанотвердости и модуля упругости.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе представлены два типа порошковых проволок: EnDotec DO*15 и система Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V.

Порошковая проволока EnDotec DO*15 изготовлена из сплава Fe – Cr – Mo – W. Материал, полученный в процессе наплавления, обладает высокой устойчивостью к усталости и не образует трещин под воздействием ударно-абразивных нагрузок. В качестве легирующих элементов в его составе присутствуют хром, молибден, марганец, ванадий, вольфрам и углерод.

Порошковая проволока системы Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V была разработана в Сибирском государственном индустриальном университете. Внутренний наполнитель состоит из смеси металлических порошков железа ПЖВ1, кремния КР-1, вольфрама ПВ-1, марганца МР-0, хрома ПХА-1М и ванадия ВЭЛ-1 [12]. В качестве добавки, которая замещает аморфный углерод, использовали пыль алюминиевого производства, полученную в процессе газоочистки. Внешняя оболочка была сделана из стальной ленты марки Ст3 толщиной от 0,3 до 0,5 мм. Общий диаметр готовой порошковой проволоки составляет 4,2 мм [12].

Для нанесения электродуговых покрытий был задействован сварочный трактор ASAW-1250 с использованием рассматриваемых порошковых проволок. Наплавку выполняли на стальные пластины марки 09Г2С в пять слоев для предотвращения смешивания наплавляемого металла с подложкой.

Режим наплавки для обоих типов порошковых проволок проводили при силе сварного тока 420 А, напряжении дуги 38,0 В и скорости подачи проволоки примерно 18 см/мин [13].

Для проведения исследований были изготовлены макрошлифы размерами 30 (10 мм составляет наплавленный слой и 20 мм – подложка) × 55 × 14 мм и 18 (8 мм – наплавленный слой и 10 мм – подложка) × 10 × 10 мм.

Изучение структуры и химического состава наплавленного слоя проводили в лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета с использованием сканирующего электронного микроскопа КУКУ-ЕМ6900.

Измерения нанотвердости и модуля упругости порошковых проволок систем Fe – Si – W –

Mn – Cr – C – V и EnDotec DO*15 системы Fe – Cr – Mo – W проводили с использованием нанотвердомера НаноСкан-4D методом вдавливания индентора с регистрацией силы и глубины нагружения, а затем расчетом твердости и модуля упругости в соответствии с ГОСТ 8.748 – 2011. Для первой проволоки параметры измерения включали индентор в форме трехгранной пирамиды типа Берковича, время нагружения 10 с, время разгружения 10 с, время удержания максимальной нагрузки 10 с, прикладываемую нагрузку изменяли от 5 до 1500 мН. Измерения для проволоки EnDotec DO*15 проводили по двум режимам: первый режим аналогичен первому типу проволоки, а второй режим осуществляли в переходном слое и в середине наплавленного покрытия при нагрузках 100, 150 и 200 мН.

Основные результаты и их обсуждение

В процессе исследования покрытия системы Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V была изучена микроструктура наплавленного слоя, представляющая собой дендритное строение игольчатого мартенсита с заметной сеткой на границах [14]. На рис. 1 представлена область наплавленного покрытия. Было установлено, что в наплавочном слое рассматриваемой области присутствуют следующие элементы: 2,22 % Cr; 0,92 % Mn; 5,50 % C; 6,36 % W; 0,11 % V; 84,62 % Fe.

Внутри самих зерен обнаружены неметаллические включения неправильной глобулярной формы, которые в основном располагаются вдоль межзеренных границ (рис. 1). Химический состав неметаллических включений следующий: 7,90 % Na; 10,18 % Al; 19,88 % Si; 0,96 % Cr; 0,42 % Mn; 2,49 % W; 26,46 % C и 31,72 % Fe. Содержание натрия, алюминия, кремния, хрома, марганца, вольфрама может быть обусловлено методом нанесения наплавочного слоя.

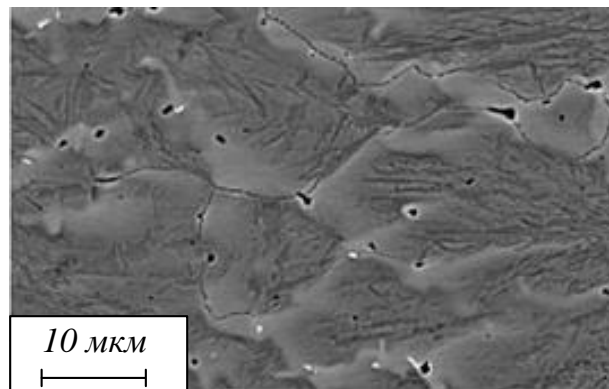


Рис. 1. Микроструктура наплавленного покрытия системы Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V

Fig. 1. Microstructure of the deposited coating systems Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V

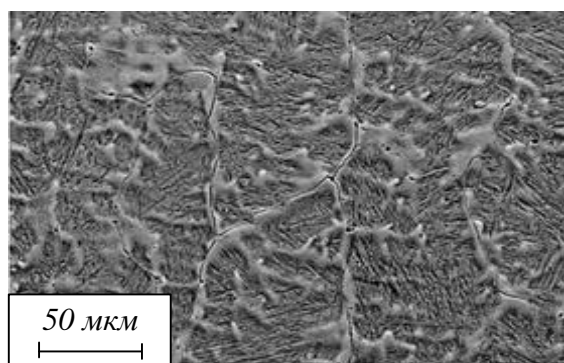


Рис. 2. Дендритная структура наплавленного материала
Fig. 2. Dendritic structure of the deposited material

В процессе исследования порошковой проволоки EnDOtec DO*15, изготовленной из сплава Fe – Cr – Mo – W, была изучена дендритная структура наплавленного материала. Такая структура свойственна металлам и сплавам, включая наплавленный слой, которые образуют валик [15].

На рис. 2 изображена область наплавленного покрытия. С помощью энергодисперсионного анализа (ЭДС) определили химический состав рассматриваемой области: 4,70 % C; 0,10 % Al; 1,15 % W и 87,42 % Fe.

Малое содержание алюминия обусловлено тем, что в шихту порошковой проволоки была добавлена пыль газоочистки производства алюминия.

На рис. 3 изображена микроструктура наплавленного покрытия, цифрами указаны участки для определения элементного состава материала (табл. 1).

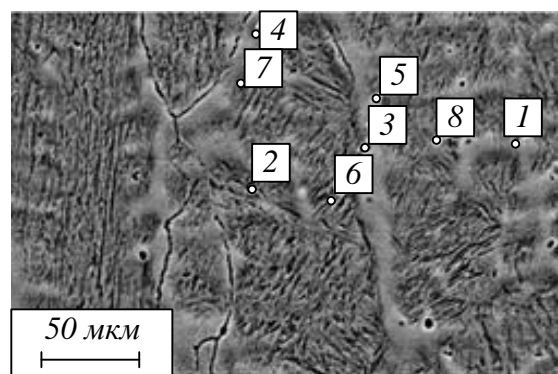


Рис. 3. Микроструктура наплавленного слоя системы Fe – Cr – Mo – W
Fig. 3. Microstructure of the deposited coating systems Fe – Cr – Mo – W

Наибольшее содержание химических элементов зафиксировано в точках 1 – 3. Это связано с химическими реакциями, протекающими в расплаве, которые способствуют удалению нежелательных примесей. В результате таких процессов могут образовываться нерастворимые в расплаве соединения (оксиды, силикаты и сульфиды) [12]. Элементы в точках 4 – 8 идентичны, но их содержание отличается.

В ходе исследования наплавленного слоя, полученного методом сварки порошковой проволокой под флюсом, были определены структурные характеристики и химический состав материала. С помощью сканирующего электронного микроскопа было получены изображения дендритной структуры поперечного шлифа покрытия после травления азотной кислотой.

Т а б л и ц а 1

Элементарный состав наплавленного слоя
Table 1. Chemical composition of the deposited layer

Элемент	Содержание, %, элемента в точках							
	1	2	3	4	5	6	7	8
C	5,01	2,99	1,71	4,59	6,94	7,14	5,42	6,76
Al	0,34	12,02	8,90	–	–	–	–	–
Si	0,52	0,78	0,32	0,63	0,64	0,60	0,46	0,49
S	7,61	0,76	–	–	–	–	–	–
V	0,49	0,20	0,40	0,51	0,44	0,37	0,36	0,33
Cr	4,33	2,65	3,37	4,38	3,87	3,31	3,72	3,33
Mn	15,02	0,85	0,76	0,94	0,82	0,81	0,88	0,69
Fe	64,68	63,99	73,70	85,40	83,98	85,88	87,34	86,60
Mo	2,00	–	0,95	1,99	1,83	1,07	0,89	0,91
O	–	11,70	8,63	–	–	–	–	–
Na	–	1,78	–	–	–	–	–	–
K	–	1,75	–	–	–	–	–	–
W	–	–	0,96	1,57	1,47	0,82	0,94	0,88

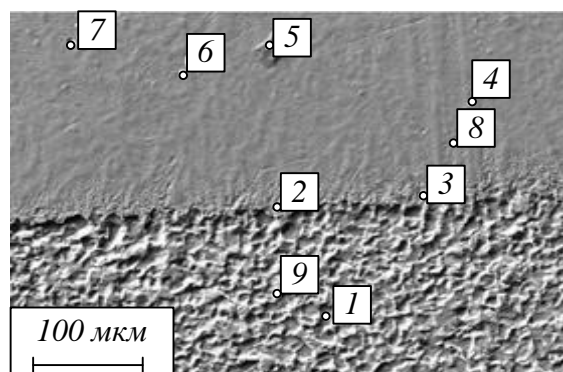


Рис. 4. Переходный слой наплавочного покрытия из проволоки EnDOtec DO*15

Fig. 4. Transition layer of surfacing coating made of EnDOtec DO*15 wire

Структура исследуемого материала состоит из трех слоев (поверхностного, переходного и основного). Наблюдается четкая граница между наплавленным материалом и стальной подложкой марки 09Г2С. Различие в структуре подложки и наплавочного слоя обусловлено использованием материалов с различными физико-механическими свойствами при изготовлении образцов [16].

Исследуя переходный слой наплавочного покрытия можно заметить, что в рассматриваемой области преобладают железо, хром, марганец и углерод. Химический состав переходного слоя следующий: 7,56 % С; 1,89 % О; 0,39 % Si; 1,86 % 0,71 % Мо и 86,03 % Fe (рис. 4). При использовании порошковой проволоки образуется зона сплавления, где происходит смешивание компонентов наплавленного слоя и подложки. Переход составляющих наплавочного материала пред-

ставляет собой сложный физико-химический процесс, зависящий от температуры, характеристик материалов и технологии наплавки. В процессе плавления присадочного материала и подложки элементы могут реагировать с расплавленным металлом, образуя различные соединения (карбиды, сульфиды или оксиды) [17 – 20].

На рис. 4 представлен переходный слой наплавочного покрытия, цифрами указаны исследуемые области для проведения химического анализа. В табл. 2 представлен элементный состав переходного слоя.

По результатам химического анализа получили, что в областях 1 и 9 (подложка) происходит переход марганца, кремния, хрома из наплавленного слоя в подложку, в которой также присутствует медь. Участок 1 обладает высоким содержанием углерода и кислорода, что указывает на присутствие неметаллических включений карбидов и оксидов. Области 2 и 3 содержат марганец и кремний в количестве схожим с подложкой, но переход хрома более выражен. В этих областях наблюдается наличие ванадия, а в участке 2 присутствует сера, указывающая на формирование сульфидов.

Области 4 – 8 содержат карбиды вольфрама, хрома и ванадия, при этом в 4 и 6 присутствует молибден, а в 7 и 8 – сера и сульфиды. Область 4 содержит алюминий, 6 – кислород и оксиды, 5 – неметаллические включения с высоким содержанием углерода и кислорода.

При измерении нанотвердости и модуля упругости порошковой проволоки системы Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V были получены следующие результаты:

Т а б л и ц а 2

Элементарный состав переходного слоя
Table 2. Chemical composition of the points under study

Элемент	Содержание, %, элемента в точках								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C	14,41	7,30	8,27	5,76	28,86	6,51	4,28	5,56	4,54
Si	0,27	0,28	0,38	0,44	0,33	0,50	0,56	0,57	0,29
Fe	76,91	88,42	73,70	86,85	62,10	84,83	88,28	87,44	93,91
Mn	0,43	0,52	0,56	0,80	0,59	0,83	0,96	0,93	0,54
Cr	0,60	1,21	1,37	3,28	2,57	3,34	3,85	3,54	0,33
V	–	0,20	0,40	0,35	0,23	0,31	0,34	0,39	–
O	6,37	1,90	3,64	–	4,57	1,69	–	–	–
W	–	–	–	1,30	0,53	1,00	1,30	1,12	–
Mo	0,44	0,37	–	0,98	–	0,98	–	–	–
S	–	0,76	–	–	0,23	–	0,43	0,45	–
Cu	0,58	–	–	–	–	–	–	–	0,38
Al	–	–	–	0,24	–	–	–	–	–

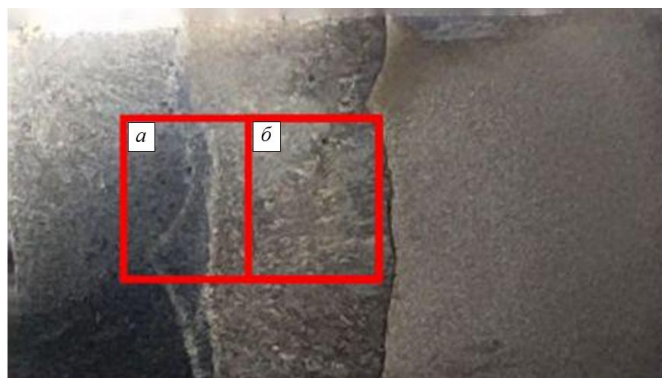


Рис. 5. Области измерения нанотвердости наплавки (а) и переходного слоя (б)
Fig. 5. Areas of measurement of nanohardness of surfacing (a) and transition layer (b)

1. Средние значения нанотвердости $3,55 \pm 0,50$ ГПа.

2. Средние значения модуля упругости $125,84 \pm 6,51$ ГПа.

Все измерения нанотвердости порошковой проволоки EnDotec DO*15, а также идентификацию выполняли в зонах, указанных на рис. 5. Результаты измерения нанотвердости представлены в табл. 3.

Для сравнения провели измерение нанотвердости при нагрузках 5 – 1500 мН (рис. 6). Были получены следующие результаты:

1. Средние значения нанотвердости $4,82 \pm 1,44$ ГПа.

2. Средние значения модуля упругости $59,62 \pm 9,19$ ГПа.

Погрешность обусловлена колебаниями в измерениях, что может быть связано с различными факторами (методы испытаний и физические свойства материала). Фактический модуль упругости может изменяться в диапазоне от 50,43 до 68,81 ГПа. При рассмотрении всех измерений в области нагрузок от 5 – 1500 мН можно сделать следующие выводы:

1. При нагрузке 5 мН нанотвердость составляет 10,67 ГПа и модуль упругости – 85,61 ГПа; высокая твердость обусловлена низкой нагрузкой.

2. При нагрузке 100 мН нанотвердость составляет 6,34 ГПа и модуль упругости 85,22 ГПа; при 150 мН – 6,53 и 69,85 ГПа; при 200 мН – 5,36 и 70,18 ГПа.

3. В интервале нагрузок от 300 до 1500 мН средняя нанотвердость составляет $4,31 \pm 0,23$ ГПа, модуль упругости $55,8 \pm 1,40$ ГПа, максимальное погружение индентора $3583,31 \pm 826,5$ нм. Твердость медленно снижалась от 4,70 до 3,85 ГПа на протяжении 19 измерений, а модуль упругости практически не менялся (от 59,03 до 53,69 ГПа). Максимальная глубина внедрения растет от 2028,54 до 4787,61 нм.

Выводы

Обе порошковые проволоки формируют дендритные структуры наплавленного слоя, но различаются по составу и количеству отдельных элементов. Структура наплавленного слоя Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V содержит неметаллические включения, в то время как EnDotec DO*15 имеет более чистый состав с меньшим количеством этих включений, что указывает на более высокое качество покрытия и его улучшенные эксплуатационные характеристики. Переходные слои обеих проволок показывают значительное смешивание компонентов, влияющее на их физико-химические свойства. Однако в случае Fe – Si – W – Mn – Cr – C – V наблюдается более выраженное содержание соединений, таких как карбиды и сульфиды, что говорит о более активных химических реакциях в процессе наплавления.

Т а б л и ц а 3

Нанотвердость в области наплавки и переходного слоя
Table 3. Nanohardness in the area of the deposit and transition layer

Зона нагрузки	Нанотвердость, ГПа			Модуль упругости, ГПа		
	при нагрузке, мН					
	100	150	200	100	150	200
Наплавка	6,42 ± 0,31	6,45 ± 0,15	5,88 ± 0,21	113,93 ± 7,38	111,63 ± 4,23	83,20 ± 1,68
Переходный слой	5,86 ± 0,39	5,50 ± 0,37	4,92 ± 0,46	102,78 ± 11,18	92,93 ± 7,13	78,13 ± 6,84

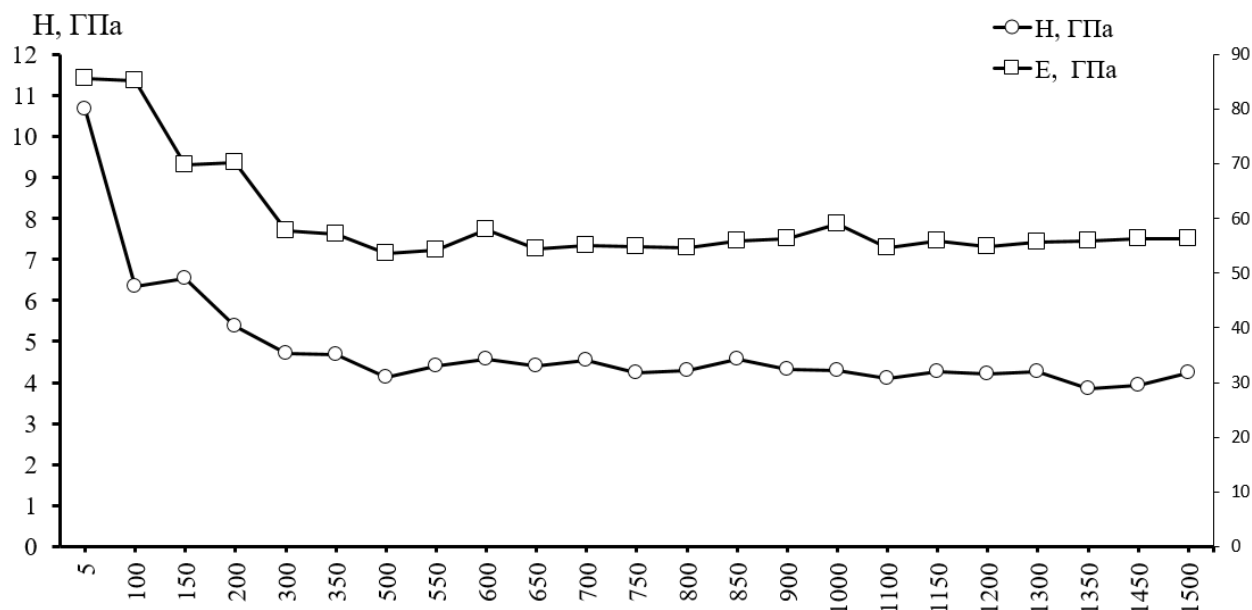


Рис. 6. График измерения нанотвердости при нагрузках от 5 – 1500 мН
Fig. 6. Graph of nanohardness measurements under loads from 5 to 1500 mN

Наибольшие ($4,82 \text{ ГПа} \pm 1,44 \text{ ГПа}$) значение средней нанотвердости были зафиксированы для проволоки EnDOtec DO*15, что свидетельствует о ее способности выдерживать механические нагрузки, более того в интервале нагрузок от 300 до 1500 мН средняя твердость составляет $4,31 \pm 0,23 \text{ ГПа}$, а модуль упругости $55,81 \pm 1,40 \text{ ГПа}$. Прослеживается тенденция к медленному снижению твердости и еще более медленному уменьшению модуля упругости по мере увеличения нагрузки. В пределах фиксированных нагрузок (100, 150 и 200 мН) средняя твердость наплавки растет по мере смещения к верхним слоям наплавленного материала, модуль упругости выше в средних слоях. Полученные данные свидетельствуют о низком влиянии роста нагрузки на твердость и модуль упругости до 1500 мН. Средняя твердость системы Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V более низкая, чем у EnDOtec DO*15, но модуль упругости в два раза выше, что свидетельствует о лучшей способности наплавочного покрытия противостоять деформациям. Это делает EnDOtec DO*15 перспективным и конкурентоспособным вариантом для использования в условиях высоких механических нагрузок в промышленном применении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lechilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium-carbon austenite. *Welding International*. 2015;29(10):819–822.
<https://doi.org/10.1080/09507116.2014.986891>
2. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron. *Welding International*. 2008;22(11):796–800.
<https://doi.org/10.1080/09507110802593646>
3. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy. *Materials Science and Technology*. 2014;30(3):316–322.
<https://doi.org/10.1179/1743284713Y.00000000359>
4. Бородин С.А., Еремин Е.Н., Лосев А.С. Порошковая проволока с карбидом бора для восстановительной наплавки прокатных валков. *Россия молодая: передовые технологии – в промышленность*. 2015;(1):11–14.
5. Li R., He D.Y., Zhou Z., Wang Z.J., Song X.Y. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings. *Surface Engineering*. 2014;30(11):784–790.
<https://doi.org/10.1179/1743294414Y.00000000331>
6. Макиенко В.М., Соколов П.В., Перваков Д.Г. Восстановление деталей и узлов подвижного состава методом электродуговой наплавки. *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. 2016;1(6):6–11.
7. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W., Chang C.T., Wang G., Li H., Wang X.M., Li R.W. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance. *Surface Engineering*. 2017;33(1):56–62.
<https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1176718>
8. Kapralov E.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Formation of nanostructure-phase conditions and properties of wear-resistant cladding on steel. *Nanoinzheneriya*. 2015;4(46):14–23.
9. Babinets A.A., Ryabtsev I.A., Panfilov A.I., Zhdanov V.A., Ryabtsev I.I. Influence of meth-

- ods of arc surfacing with flux-cored wire on penetration of base metal and formation of deposited metal. *The Paton Welding Journal*. 2016;(11):17–22.
<https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.03A.A>
10. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D., Misra R.D.K., Wang G.D. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels. *Materials Science and Technology*. 2016;32(4):320–327.
<https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1137410>
 11. Ryabtsev I.O., Babinets A.A., Lentugov I.P., Zhdanov V.O., Ryabtsev I.I., Osin V.V. Methods of Investigation of the Deposited Metal Properties and Their Application for the Development of Flux Cored Wires. *Materials Science*. 2024;59(4):467–473.
 12. Усольцев А.А., Козырев Н.А., Бащенко Л.П., Крюков Р.Е., Жуков А.В. Разработка порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V с присадками углеродфторсодержащего материала и титана. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(4):403–409.
HYPERLINK "<https://doi.org/10.17073/0368-0>
 13. Козырев Н.А., Рудаков С.Г., Крюков Р.Е. *Расчет параметров режима и размеров шва при дуговой сварке*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. -
 14. Кибко Н.В., Усольцев А.А., Михно А.Р., Сычев А.А. Исследование структуры и свойств титана наплавленного порошкового металла проволоками систем Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V и Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022;5(803):43–45.
 15. Яковлев Д.С. Анализ технологических особенностей сварки порошковой проволокой. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия*. 495.
 16. Файков С.В., Коновалов С.В., Капралов Е.В. и др. Формирование износостойких поверхностных слоев наплавкой. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015;58(10):769–774.
 17. Коновалов С.В., Панченко И.А., Гостевская А.Н. Влияние химического состава наплавочного материала на его структуру и свойства. В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество: Труды XXIV Международной научно-практической конференции*. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ. 2024:195–197.
 18. Еремин Е.Н., Лосев А.С., Бородихин С.А. и др. Порошковая проволока для наплавки коррозионно-стойкой и износостойкой стали. *Вестник машиностроения*. 2018;(7):66–68.
 19. Громов В.Е., Юрьев А.Б., Иванов Ю.Ф. и др. Электронно-микроскопическое исследование зоны контакта наплавка (быстрорежущая сталь P2M9) – подложка (сталь 30ХГСА). *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):9–16.
 20. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D., Misra R.D.K., Wang G.D. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels. *Materials Science and Technology*. 2016;32(4):320–327.
<https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1137410>

REFERENCES

1. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lehchilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium-carbon austenite. *Welding International*. 2015;29(10):819–822.
<https://doi.org/10.1080/09507116.2014.986891>
2. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron. *Welding International*. 2008;22(11):796–800.
<https://doi.org/10.1080/09507110802593646>
3. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy. *Materials Science and Technology*. 2014;30(3):316–322.
<https://doi.org/10.1179/1743284713Y0000000359>
4. Borodikhin S.A., Eremin E.N., Losev A.S. Powder wire with boron carbide for reducing surfacing of rolling rolls. *Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii v promyshlennost'*. 2015;(1):11–14. (In Russ.).
5. Li R., He D.Y., Zhou Z., Wang Z.J., Song X.Y. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings. *Surface Engineering*. 2014;30(11):784–790.
<https://doi.org/10.1179/1743294414Y0000000331>
6. Makienko V.M., Sokolov P.V., Pervakov D.G. Restoration of parts and assemblies of rolling stock by electric arc welding. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona*. 2016;1(6):6–11. (In Russ.).
7. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W., Chang C.T., Wang G., Li H., Wang X.M., Li R.W. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance. *Surface Engineering*. 2017;33(1):56–62.
<https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1176718>
8. Kapralov E.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Formation of nanostructure-phase conditions and properties of wear-resistant cladding on steel. *Nanoinzheneriya*. 2015;4(46):14–23.

9. Babinets A.A., Ryabtsev I.A., Panfilov A.I., Zhdanov V.A., Ryabtsev I.I. Influence of methods of arc surfacing with flux-cored wire on penetration of base metal and formation of deposited metal. *The Paton Welding Journal*. 2016;(11):17–22.
<https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.03A.A>
10. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D., Misra R.D.K., Wang G.D. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels. *Materials Science and Technology*. 2016;32(4):320–327.
<https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1137410>
11. Ryabtsev I.O., Babinets A.A., Lentugov I.P., Zhdanov V.O., Ryabtsev I.I., Osin V.V. Methods of Investigation of the Deposited Metal Properties and Their Application for the Development of Flux Cored Wires. *Materials Science*. 2024;59(4):467–473.
12. Usoltsev A.A., Kozyrev N.A., Bashchenko L.P., Kryukov R.E., Zhukov A.V. Development of Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V powder wire system with additives of carbon-fluorinated material and titanium. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2023;66(4):403–409. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-403-409>
13. Kozyrev N.A., Rudakov S.G., Kryukov R.E. Calculation of the parameters of the mode and dimensions of the seam during arc welding. Novokuznetsk: ITs SibGIU. 2014:27. (In Russ.).
14. Kibko N.V., Usoltsev A.A., Mikhno A.R., Sychev A.A. Investigation of the structure and properties of titanium deposited in powdered metal by wires of Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V and Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni systems. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2022;5(803):43–45. (In Russ.).
15. Yakovlev D.S. Analysis of technological features of powder wire welding. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. 2014;14(2):92–95. (In Russ.).
16. Raikov S.V., Konovalov S.V., Kapralov E.V. etc. Formation of wear-resistant surface layers by surfacing. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2015;58(10):769–774. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-10-769-774>
17. Konovalov S.V., Panchenko I.A., Gostevskaya A.N. Influence of the chemical composition of the surfacing material on its structure and properties. In: Metallurgy: technologies, innovations, quality: Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference. Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGIU. 2024:195–197. (In Russ.).
18. Eremin E.N., Losev A.S., Borodikhin S.A. etc. Powder-coated wire for welding corrosion-resistant and wear-resistant steel. *Vestnik mashinostroeniya*. 2018;(7):66–68. (In Russ.).
19. Gromov V.E., Yur'ev A.B., Ivanov Yu.F. etc. Electron microscopic examination of the surfacing contact zone (high-speed steel P2M9) – substrate (30HGSA steel). *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):9–16. (In Russ.).
[https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-9-16](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-9-16)
20. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D., Misra R.D.K., Wang G.D. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels. *Materials Science and Technology*. 2016;32(4):320–327.
<https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1137410>

Сведения об авторах

Алексей Романович Михно, директор НПЦ «Сварочные процессы и технологии», Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: mihno_ar@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7305-6692

SPIN-код: 5553-1164

Галина Игоревна Черепанова, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: glcherepanova25@mail.com

ORCID: 0009-0003-2592-6539

SPIN-код: 3610-9340

Николай Павлович Ломиворотов, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: lomivorotov_np@sibsiu.ru

ORCID: 0009-0000-7953-2920

Екатерина Михайловна Запольская, к.т.н., старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8098-5895

SPIN-код: 7302-2751

Ирина Алексеевна Панченко, к.т.н., заведующий научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: i.r.i.ss@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-1631-9644

SPIN-код: 4253-6679

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: konovalov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-4809-8660
SPIN-код: 4391-7210

Information about the authors:

Alexey R. Mikhno, Director of NPC "Welding Processes and Technologies", Siberian State Industrial University
E-mail: mihno_ar@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-7305-6692
SPIN-код: 5553-1164

Galina I. Cherepanova, Research Engineer at the Research Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University
E-mail: glcherepanova25@mail.com
ORCID: 0009-0003-2592-6539
SPIN-код: 3610-9340

Nikolay P. Lomivorotov, Research Engineer at the Research Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University
E-mail: lomivorotov_np@sibsiu.ru
ORCID: 0009-0000-7953-2920

Ekaterina M. Zapolskaya, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Research Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University
E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8098-5895
SPIN-код: 7302-2751

Irina A. Panchenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Scientific Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University
E-mail: i.r.i.ss@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-1631-9644
SPIN-код: 4253-6679

Sergey V. Konovalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., vice-rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University
E-mail: konovalov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-4809-8660
SPIN-код: 4391-7210

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 02.06.2025

После доработки 28.07.2025

Принята к публикации 11.08.2025

Received 02.06.2025

Revised 28.07.2025

Accepted 11.08.2025