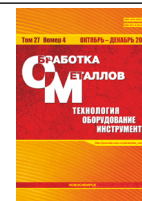




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov







Исследование абразивной износостойкости порошковых проволок при наплавке на высокомарганцовистую сталь Гадфильда



Юлия Карлина^{1, а, *}, Владимир Конюхов^{2, 3, б}, Татьяна Опарина^{2, с}

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, 26, г. Москва, 129337, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Россия

³ Череповецкий государственный университет, пр. Луначарского, 5, г. Череповец, 162600, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0001-6519-561X>,  jul.karlina@gmail.com; ^б  <https://orcid.org/0000-0001-9137-9404>,  konyukhov_vyu@mail.ru;

^с  <https://orcid.org/0000-0002-9062-6554>,  martusina2@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.762; 621.793.71

История статьи:

Поступила: 14 сентября 2025

Рецензирование: 03 октября 2025

Принята к печати: 28 октября 2025

Доступно онлайн: 15 декабря 2025

Ключевые слова:

Плазменное борирование

Аморфный бор

Бориды железа

Покрывание

АННОТАЦИЯ

Введение. Аустенитная высокомарганцовистая сталь обычно используется в различных компонентах железнодорожной и горнодобывающей промышленности (например, для плит дробилок), где требуется высокая ударная абразивная стойкость и стойкость к износу скольжения, поскольку эта сталь демонстрирует уникальное сочетание высокой вязкости и высокой способности к упрочнению. Поэтому важно знать поведение износостойких материалов, таких как аустенитная высокомарганцовистая сталь, при ударном истирании и износе скольжения. Однако эта сталь имеет ограничение, заключающееся в том, что она развивает свою высокую способность к упрочнению только при высоких ударных нагрузках и условиях высокого напряжения. В качестве альтернативы используются различные способы упрочнения, наплавки или замена низкоуглеродистыми высоколегированными сталями и высокохромистыми чугунами. **Цель настоящей работы:** провести оценку абразивной износостойкости порошковых проволок при наплавке на высокомарганцовистую сталь Гадфильда. **Методы и материалы исследований.** В работе рассмотрены наплавочные проволоки, где основными легирующими элементами являются хром, ванадий и вольфрам. Химический состав наплавленных образцов был определен с помощью портативного рентгенофлуоресцентного анализатора металлов и сплавов BRUKER S1 TITAN. Твердомер Duramin-40 AC3 (STRUERS APS, Ballerup, Дания) использовался для измерения твердости по Роквеллу. Сталь 110Г13Л показала исходную объемную твердость HRC = 23 ± 3. Образцы для микроструктурного исследования отбирали из литых и наплавленных образцов. Микроструктуры исследовали методом оптической микроскопии после травления в 2,5%-м растворе азотной кислоты, промывки в метаноле и выдержки в 15%-м растворе HCl. Испытания на ударный абразивный износ проводились на машине для испытания на ударный абразивный износ DUCOM TR-56-M3 (Индия). **Результаты и обсуждение.** В результате анализа поперечного сечения образца стали 110Г13Л после испытаний на абразивное изнашивание было обнаружено распространение трещин под поверхностью детали без видимой связи с поверхностью, это говорит о том, что трещины зарождались как на поверхности, так и под поверхностью. Микроструктура наплавленных слоев, богатая мелкодисперсными карбидами бора, диспергированными в мартенситной матрице, в сочетании с пластинчатой фазой боридов молибдена, позволяет предположить, что материал, нанесенный на сталь Гадфильда, может обладать более высокой твердостью и износостойкостью, чем подложка. Проведенные промышленные испытания наплавленных бил показали, что доминирующими механизмами износа являются микропорезы, точечная коррозия и микроразрывы (сколы и микровмятины). По результатам исследований наплавочных материалов можно сделать вывод о том, что проволоки с содержанием хрома в диапазоне 3–6 % обладают характеристиками для применений, требующих высокой абразивной износостойкости, в горнодобывающей промышленности.

Для цитирования: Карлина Ю.И., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А. Исследование абразивной износостойкости порошковых проволок при наплавке на высокомарганцовистую сталь Гадфильда // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 287–308. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-287-308.

Введение

Угольные мельницы входят в состав тепловых электростанций и служат для подготовки к сжиганию твердого топлива в виде торфа, lignита, каменного угля и антрацита. Угольные мельницы состоят из бил, закрепленных по периметру диска или насаженных на вал, они перемалывают материал в пыль, которая затем вдувается воздухом в камеру сгорания котла.

*Адрес для переписки

Карлина Юлия Игоревна, к.т.н., научный сотрудник
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет,
Ярославское шоссе, 26,
129337, г. Москва, Россия
Тел.: +7 914 879-85-05, e-mail: jul.karlina@gmail.com

Било угольных мельниц изготавливают из износостойкого чугуна или стали Гадфильда [1–3]. В условиях горнодобывающей промышленности материалы из стали Гадфильда часто подвергаются как сильным ударам, так и истиранию, что является весомым стимулом для более глубокого понимания износа, деформации и деформационного упрочнения различных высокомарганцовистых сталей в условиях высоких напряжений.

Деформации и износ, возникающие в дробилках и мельницах для горных пород, можно разделить на две основные категории [4–15]:

1) деформация стальной поверхности под действием высоких напряжений и высокой скорости деформации, подобная ударной деформации, возникающая при ударе породы о поверхность и ее дроблении;

2) абразивное истирание под действием высоких напряжений, вызванное скольжением крупных и дробленых камней по поверхности.

Материалы должны выдерживать повторяющиеся циклы высоких нагрузок, вызывающих царапины, вмятины, удары и минеральное дробление без преждевременного выхода из строя или критического сокращения срока службы. Высокопрочные стали могут обеспечить более длительный срок службы благодаря своей долговечности, чем большинство низкоуглеродистых сталей или конструкций с покрытием в этих условиях. Для этого применяют различные технологии модифицирования, термической обработки и поверхностной наплавки.

Аустенитная высокомарганцовистая сталь Гадфильда (1,2 % углерода и 12 % марганца) занимает особое место среди износостойких высокоуглеродистых марганцевых сплавов [1–7]. Благодаря высокой вязкости и износостойкости сталь Гадфильда широко используется в различных промышленных приложениях (детали камнедробильных механизмов, железнодорожных стрелочных переездов, зубья ковшей экскаваторов, гусеничные траки и др.) [5–10].

В литературе сообщалось [1, 2, 7–18], что аустенитная марганцовистая сталь Гадфильда в литом состоянии содержит карбиды (Fe, Mn) $3C$. Известно, что промышленной практикой является растворение карбидов материала перед использованием, так что карбиды (Fe, Mn) $3C$ переходят в раствор, давая полностью однофазную аустенитную структуру. Традиционная

технология термообработки литых заготовок стали 110Г13Л, задействованная в большинстве металлургических компаний, состоит из отжига стали на твердый раствор при температуре 1050 °С в течение нескольких часов, а затем закаливания в воде.

Из анализа литературы [1, 2, 5–17] видно, что при практическом применении деталей машин и механизмов, изготовленных из высокомарганцовистой стали, существует проблема низкой износостойкости из-за недостаточной способности к упрочнению в «мягких» условиях эксплуатации (небольшие ударные нагрузки или их полное отсутствие) [11, 12]. Учитывая этот недостаток, многие исследователи полагали, что изменение процентного содержания Mn и благоприятная термическая обработка могут улучшить свойства упрочнения в процессе эксплуатации. В работах [13–16] описана сталь со средним содержанием марганца (8–12 масс. %), показавшая низкие значения абразивной износостойкости. Механические свойства и износостойкость могут быть улучшены добавлением легирующих элементов Ti, Cr, Mo и V в сталь для достижения эффектов упрочнения раствором и дисперсионным осаждением [17–22]. Легирование, термическая обработка, упрочнение и износостойкость стали со средним содержанием марганца были систематически изучены в работах [23–27]. Результаты работ показали, что деформационно-индуцированное мартенситное превращение среднемарганцовистой стали имело эффект самоупрочнения при средних или низких приложенных нагрузках, и среднемарганцовистая сталь обладала лучшей износостойкостью, чем высокомарганцовистые, бейнитные и мартенситные стали [23–27].

Было исследовано [23–25] влияние старения на механические свойства и износостойкость стали со средним содержанием марганца, армированной частицами Ti (C, N). Кроме того, было проанализировано влияние морфологии, распределения и количества выделений на микроструктуру и механические свойства, описана взаимосвязь между механическими свойствами и механизмами износа, а также объяснено влияние механизмов упрочнения на деформационное упрочнение.

Легирование стали может существенно влиять на механизмы деформации, способствуя

скольжению, двойникованию или фазовым превращениям аустенита в α' - и (или) ε -мартенсит в зависимости от энергии дефекта упаковки (ЭДУ) сплава [1, 2]. Однако, как считают авторы [6–12], в условиях высоких скоростей деформации, т. е. при скоростях деформации в диапазоне $103 \dots 105 \text{ с}^{-1}$, механические свойства и износостойкость сталей с высоким содержанием марганца могут существенно изменяться в процессе эксплуатации, что следует учитывать при проектировании деталей и узлов, используемых, например, в горнодобывающей технике. Добавление карбидообразующих элементов, вероятно, повышает абразивную стойкость высокомарганцовистых сталей, но может также снизить их вязкость из-за выделения зернограницных карбидов. Поэтому целесообразно, по мнению авторов многих работ, продолжить изучение механических свойств и износостойкости высокомарганцовистых сталей для лучшего понимания их эксплуатационных характеристик и дальнейшей разработки [10–24].

В частности, в работах [10–12] показано, что только поверхностный слой глубиной $0,2 \dots 0,8 \text{ мм}$ подвергается воздействию агрессивных сред в деталях, эксплуатируемых в условиях износа. В таких случаях, по мнению авторов, нанесение дополнительного упрочняющего покрытия на поверхность деталей из стали 110Г13Л для повышения износостойкости может быть эффективным.

В последние годы для повышения эксплуатационных характеристик всё чаще используются технологии наплавки и аддитивного производства (АП), при которых на поверхность металлических деталей наносится гетерогенный материал. Известны наплавочные композиции Fe-C-Mo-V-B, разработанные специально для быстро изнашиваемых деталей машин и механизмов различного оборудования измельчения руды и рекомендованные производителями благодаря своим превосходным характеристикам по сравнению с композициями Ni-WC и более низкой стоимости в случаях, когда требования к коррозионной стойкости не предъявляются [15–28].

По мнению многих исследователей, высокая износостойкость композиции Fe-C-Mo-V-B обусловлена высокой объемной долей карбидов и боридов в мартенситной матрице, а прочность

и трещиностойкость – тонкой пластинчатой структурой боридов молибдена и сферической морфологией карбидов ванадия [20–29].

Известны составы порошковых проволок для наплавки на основе системы Fe-Cr как отечественных, так и зарубежных производителей, в которые дополнительно введены элементы W, Nb, B, Si и другие для увеличения абразивной стойкости деталей машин и механизмов горного оборудования [10–20]. Систематических работ по анализу износостойкости этих порошковых проволок применительно к горнодобывающему оборудованию практически нет в открытом доступе.

В то же время известно, что износостойкость в условиях абразивного и ударно-абразивного износа зависит от микроструктуры и массовой доли карбидных фаз. Более грубая микроструктура и меньшая массовая доля карбида приводят к большей потере веса [18]. Однако контроль размеров и распределения карбидов стал важной проблемой для наплавочных сплавов Fe-Cr-C из-за хрупкости крупных первичных карбидов хрома. В наплавочной композиции системы Fe-Cr-C в наплавленном слое часто образуются первичные карбиды, что ухудшает непрерывность между самими карбидами и матрицей [19]. Таким образом, износостойкость сплава для наплавки должна зависеть от многих факторов, таких как тип, форма и распределение твёрдых фаз, а также вязкость и деформационное упрочнение матрицы [9]. По этой причине необходимо исследовать соответствие между карбидом и матрицей, чтобы можно было определить связь между микроструктурой и износом на основе их распределения и морфологии.

Бориды и карбиды являются распространенными твердыми фазами в сплавах для наплавки [20]. Давно известно, что бориды, которые образуются с переходными металлами, обладают высоким потенциалом для экстремальных применений из-за их высокой твердости и превосходной износостойкости, трения и коррозионной стойкости [21]. В некоторых научных работах было установлено, что бор способствует развитию первичных твердых фаз, таких как борид или карбид, и увеличивает объемную долю этих износостойких твердых фаз [20–27]. Исследования различных авторов показали, что бор напрямую влияет не только на образование

карбидов, но и на объемную твердость, а также на износостойкость сплавов [22]. Порошковые проволоки с высоким содержанием борида широко используются для наплавки или твердосплавных покрытий в некоторых промышленных применениях методами напыления или сварки [24].

В настоящее время развивается новое направление «ремануфактуринг» – процесс преобразования отслуживших свой срок и использованных компонентов в пригодные для повторного применения [27–35]. Ремануфактуринг приобретает всё большую значимость как один из важнейших элементов достижения ресурсоэффективности в промышленности и построения экономики замкнутого цикла. Аддитивное производство стало технологией, позволяющей автоматизированно ремонтировать и восстанавливать изношенные изделия, особенно дорогостоящие детали, до состояния новых для следующего жизненного цикла.

В настоящей работе рассмотрены варианты наплавки стали 110Г13Л различными наплавочными проволоками, рекомендуемые производителями этих материалов для повышения абразивной износостойкости. Наплавочные материалы, исследуемые в работе, в основе состоят из композиции Fe-Cr-C, в которую дополнительно введены элементы W, Nb, B, Mo, V, Si для снижения чрезмерного износа била из стали Гадфильда угольной мельницы. В исследовании анализируется химический состав наплавочных композиций, проводятся макро- и микроскопическое исследования структуры, тесты на твердость и износостойкость.

Цель работы: провести оценку абразивной износостойкости порошковых проволок различных производителей при упрочняющей наплавке на высокомарганцовистую сталь Гадфильда применительно к реальной эксплуатации на угольных мельницах для помола угля. Для достижения данной цели в процессе исследования решались следующие **задачи**:

- определение степени перемешивания наплавленного и основного металла;
- проведение металлографических исследований микроструктуры наплавленных образцов;
- проведение исследований по оценке распределения твердости по глубине наплавки образцов;

– проведение исследований экспериментальных образцов порошковых проволок различных производителей на абразивный износ и промышленные испытания наплавленного изделия из стали Гадфильда.

Материалы и методы исследования

Сведения об изделии: било из стали 110Г13Л, изготовленное для мельницы молотковой тангенциальной (рис. 1). Химический состав определялся спектрометрическим методом с использованием спектрометра модели ARL 3460 и представлен в табл. 1.



Рис. 1. Исходная деталь – било для наплавки

Fig. 1. Original beater component for surfacing

Основные легирующие химические элементы в наплавленном слое металла образцов были определены с помощью портативного рентгенофлуоресцентного анализатора металлов и сплавов BRUKER S1 TITAN.

Твердомер Duramin-40 AC3 (STRUERS APS, Ballerup, Дания) использовался для измерения твердости по Роквеллу – для измерения микротвердости при нагрузках от 0,025 до 0,1 кг. Сталь 110Г13Л показала исходную объемную твердость $HRc = 23 \pm 2$.

Образцы для микроструктурного исследования отбирали из литых и наплавленных образцов. Образцы вырезали на проволоочно-вы-

Таблица 1

Table 1

Химический состав била из стали 110Г13Л по ГОСТ 977–88
Chemical composition of the 1.1% C-13% Mn steel beater according to GOST 977–88

C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P
—			не более / no more				
0,90...1,50	0,30...1,00	11,50...15,00	1,00	1,00	0,30	0,05	0,120
1,12 (фактический)	0,98	12,34	0,6	0,1	0,2	0,055	0,134

резном станке, чтобы предотвратить наклёп или фазовое превращение под воздействием тепла при механической обработке. После этого их подвергали металлографическим методам обработки: монтажу, рихтовке, шлифованию и полированию. Микроструктуры исследовали методом оптической микроскопии с использованием микроскопа с видеокамерой Neophot-21 (Carl Zeiss, Йена, Германия).

Испытания на ударный абразивный износ проводились на машине для испытания на ударный абразивный износ DUCOM TR-56-M3 (Индия).

Технической документацией, регламентирующей ремонт била из стали 110Г13Л, предписаны следующие условия восстановления изношенной поверхности: использовать электроды для наплавки марки Т-590, Т-620. Количество слоев 1-2, не более. В качестве подслоя использовать электроды УОНИ 13/45.

В исследовании было рассмотрено несколько вариантов наплавочных проволок диаметром 1,2...1,6 мм, представленных на российском рынке:

- 1) ACM 57-ОА, страна происхождения РФ;
- 2) TD-600, страна происхождения Италия, производитель ITALFIL;
- 3) TD-RC3, страна происхождения Италия, производитель ITALFIL;
- 4) CARBO AF D600, страна происхождения Германия, производитель CarboWeld;
- 5) K-600HT, KISWEL, страна происхождения Корея;
- 6) K-700HT, KISWEL, страна происхождения Корея;
- 7) OK Tubrodur 58 O/GM, ESAB, производства Польши.

В качестве буферного слоя при наплавке использовалась сварочная проволока Св-08Х18Н10Т (страна происхождения РФ), которая предварительно наплавлялась на поверхность стали 110Г13Л.

Химический состав вышеприведенных марок наплавочных проволок представлен в табл. 2. Ниже приведем данные по режимам наплавки образцов (рис. 2 и табл. 3).

Образец № 1 с наплавкой проволокой ACM 57-ОА диаметром 1,6 мм. Согласно табл. 2, в составе проволоки содержание углерода 0,80 %, хрома до 18 %, бора до 2 %, что увеличивает склонность наплавленного металла к образованию трещин. С целью минимизации процесса трещинообразования применяли предварительный подогрев до температуры 180 °С, в дальнейшем регулировали межслоевую температуру в диапазоне 250...270 °С. Контроль температуры осуществляли бесконтактным принометром ADA TemPro 900 A00225. Погрешность измерения ± 15 °С.

Образец № 2 с наплавкой проволокой TD-RC3 диаметром 1,6 мм. Образец № 3 с наплавкой проволокой TD-600 диаметром 1,6 мм. Образец № 4 с наплавкой электродами Т-590 диаметром 4,0 мм.

Образец № 5 с наплавкой проволокой CARBO AF D600 диаметром 1,6 мм. С целью минимизации процесса трещинообразования применяли предварительный подогрев до температуры 180 °С, в дальнейшем регулировали межслоевую температуру в диапазоне 250...270 °С. Контроль температуры осуществляли бесконтактным принометром ADA TemPro 900 A00225. Погрешность измерения ± 15 °С.

Химический состав исследуемых марок наплавочных проволок
Chemical composition of the investigated surfacing wire grades

Химический элемент	Марка проволоки / Wire grade						
	ACM 57-OA	TD-600	TD-RC3	CARBO AF D600	K-700HT	K-600HT	OK Tubrodur 58 O/GM ESAB
C	0,8	0,15	0,37	0,5	0,3	0,25	0,42
Si	1	3	0,4	2,7	2,4	2,18	0,31
Mn	2	0,1	1,1	0,5	0,5	0,36	1,22
Cr	18	9,3	7	9,5	7	6,5	4,89
B	2,6	—	—	—	—	—	—
P	—	< 0,025	< 0,03	—	—	—	—
S	—	< 0,020	< 0,020	—	—	—	—
Cu	—	< 0,25	< 0,25	—	—	—	—
Ni	—	< 0,15	< 0,20	—	—	—	—
V	—	< 0,030	—	—	—	—	—
Al	—	< 0,030	—	—	—	—	0,6
Mo	—	—	2,2	—	—	0,5	1,14
Ti	—	—	0,3	—	—	—	—
W	—	—	—	—	0,7	—	—



Рис. 2. Образцы наплавки проволокой

Fig. 2. Wire surfacing samples

Образец № 6 с наплавкой проволокой K-600HT диаметром 1,6 мм. Образец № 7 с наплавкой проволокой K-700HT диаметром 1,6 мм.

Наплавку осуществляли на оборудовании для MIG/MAG сварки LORCH P5500: сварочный полуавтомат промышленного типа P 5500 Speed XT – компактный аппарат с водяным охлаждением, с подачей проволоки и панелью управления в источнике питания, сварочная горелка SB 550W, охлаждение жидкостное, 550A (CO₂) / 500A (ArCO₂), ПВ100 %, проволока 1,2...1,6 мм, рукоятка – Ergo, евро-разъем.

Результаты исследований

Перед осуществлением наплавки на опытные партии бил был проведён входной контроль изделия после литья:

- изделия пронумерованы и зафиксированы фотографиями (рис. 3–5);
- выполнена зачистка механическим инструментом с трех сторон;
- проведено взвешивание.

В ходе визуального и капиллярного контроля полученных изделий в количестве

Режимы наплавки образцов
Surfacing parameters

Наплавочный материал / Surfacing material	Сила тока, А / Current, A	Напряжение, В / Voltage, V	Скорость подачи проволоки, мм/с / Wire feed speed mm/sec
ACM 57-OA	258	29,5	9,1
TD-RC3	258	23,2	9,6
TD-600	258	27,0	5,5
CARBO AF D600	260	28,5	5,6
K-700HT	260	28,0	5,6
K-600HT	260	28,0	5,6



Рис. 3. Визуальный контроль поверхности бил после зачистки от металлургических шлаков

Fig. 3. Visual inspection of the beater surface after removal of metallurgical slag



Рис. 4. Капиллярный метод контроля

Fig. 4. Penetrant testing

семи штук выявили следующие повреждения (табл. 4).

Проведена операция фрезерования рабочей поверхности бил на глубину 10 мм. Были выявлены протяженные сквозные дефекты на двух билах – № 1, 3. В дальнейшем были выбраны



Рис. 5. Протяженные сквозные дефекты бил № 1, 3 (см. рис. 3)

Fig. 5. Extended through-thickness defects on the beater, numbered 1, 3 (see Fig. 3)

Дефекты визуального и капиллярного контроля
Defects identified by visual and liquid penetrant testing

Номер изделия / Product number	Выявленные дефекты / Identified defects
1	Поры и усадочная раковина в рабочей части изделия / Pores and a shrinkage cavity in the working section of the component
2	Поры и микротрещины на поверхности / Pores and micro-cracks on the surface
3	Поры и трещины, выходящие на поверхность. После снятия слоя 7 мм толщиной была обнаружена усадочная раковина в рабочей части изделия / Pores and cracks extending to the surface. After sectioning 7 mm deep, a shrinkage void was observed in the functional area of the part
4	Поры и микротрещины, выходящие на поверхность / Pores and cracks extending to the surface
5	Поры, выходящие на поверхность / Pores extending to the surface
6	Поры, выходящие на поверхность / Pores extending to the surface
7	Поры, выходящие на поверхность / Pores extending to the surface

новые образцы бил под наплавку, которые успешно прошли визуальный и капиллярный контроль.

Предварительно нами на образцах-свидетелях были проведены исследования для определения микроструктур в наплавленном слое, измерения твердости и испытаний на износостойкость.

Металлографические исследования

На рис. 6 представлена микроструктура литой стали 110Г13, на которой четко видны неметаллические включения и карбиды по границам зерен. Исследование по площади шлифа показало, что наблюдается полностью аустенитная микроструктура с наличием высокой плотности

деформационного скольжения и двойниковых полос внутри зерен, что предполагает интенсивную микроструктуру деформации. Кроме того, в трех сечениях отмечено наличие трещин, распространяющихся по некоторым границам аустенитных зерен. С другой стороны, другие границы зерен остаются целыми.

После наплавки микроструктура в наплавленных слоях показана на рис. 7, 8. Структура наплавленного слоя содержит карбиды бора (рис. 8, а, б) и хрома (рис. 8, в, г).

Химический состав наплавленных слоев, определенный рентгенофлуоресцентным спектрометром Bruker S1 TITAN представлен в табл. 5–10. Видно, что основными легирующими элементами являются хром, молибден, марганец

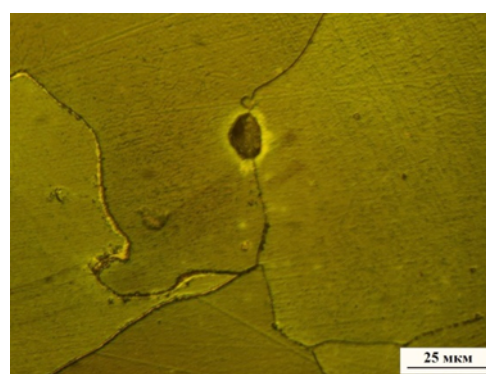
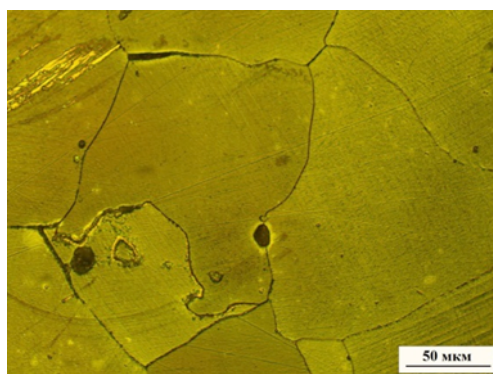


Рис. 6. Карбиды по границам аустенитных зерен и неметаллические включения

Fig. 6. Carbides at austenite grain boundaries and non-metallic inclusions

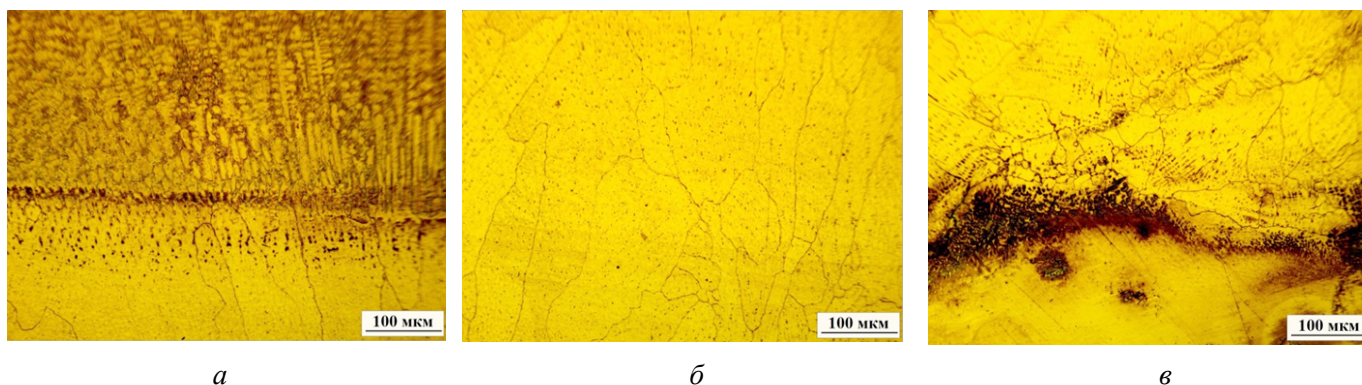


Рис. 7. Микроструктура слоя наплавки с буферным слоем:

a – наплавленный слой на границе с буферным слоем; *б* – буферный слой; *в* – переходный слой между буферным и сталью 110Г13Л

Fig. 7. Microstructure of the surfaced layer with a buffer layer:

a – surfaced layer at the boundary with the buffer layer; *б* – buffer layer; *в* – transition layer between the buffer layer and 1.1% C 13% Mn steel

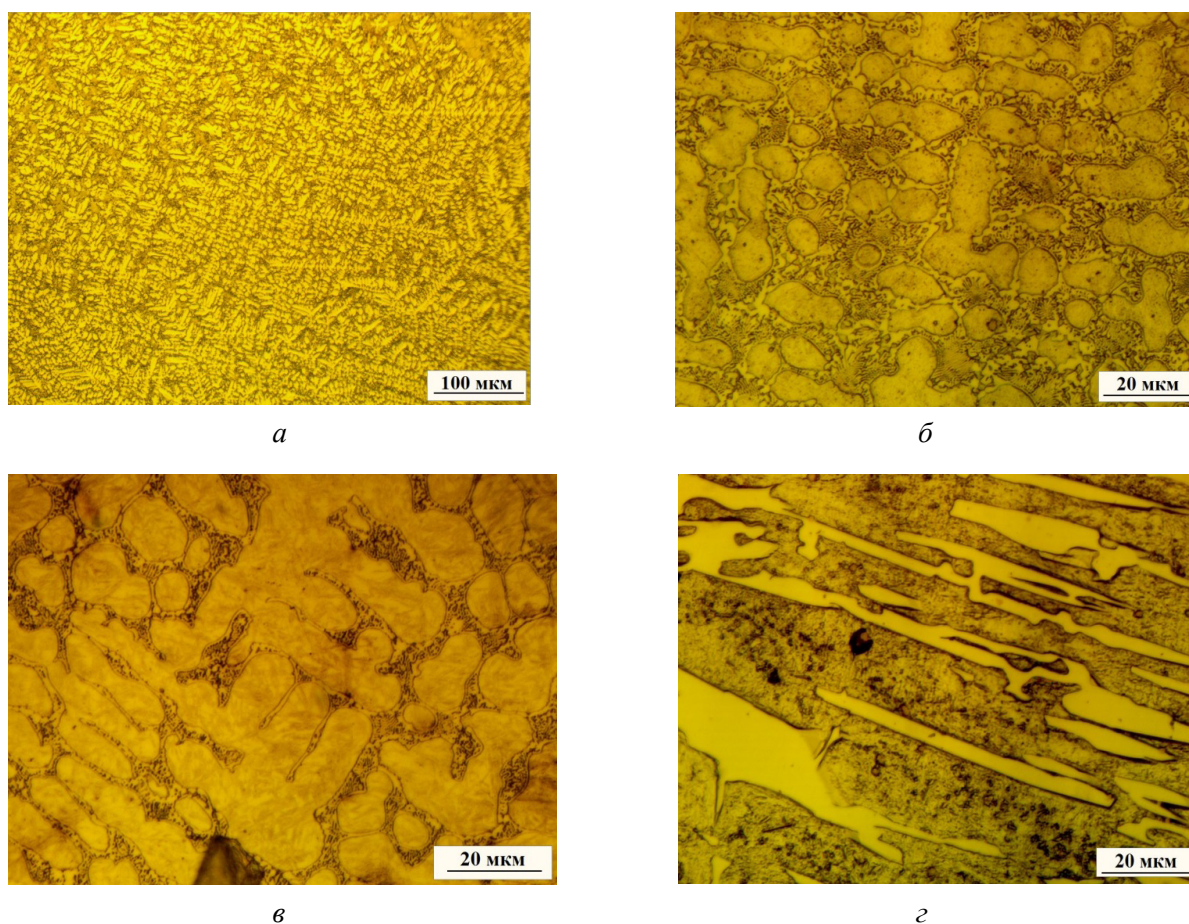


Рис. 8. Микроструктура наплавленных слоев:

a – наплавленного слоя проволокой ACM 57-OA; *б* – наплавленного слоя проволокой CARBO AF D600; *в* – наплавленного слоя проволокой TD-RC3; *з* – наплавленного слоя проволокой TD-600

Fig. 8. Microstructure of surfaced layers:

a – surfaced layer with ASM 57-OA wire; *б* – surfaced layer with CARBO AF D600 wire; *в* – surfaced layer with TD-RC3 wire; *з* – surfaced layer with TD-600 wire

Таблица 5

Table 5

Химический состав наплавленного слоя T-590, %
Chemical composition of the layer surfaced with T-590 wire, %

Mn	Cr	Si	Cu	Ni	Mo
6,23	4,29	2,0	0,07	0,06	0,02

Таблица 6

Table 6

Химический состав наплавленного слоя проволокой ACM 57-OA
Chemical composition of the layer surfaced with ASM 57-OA wire

Mn	Cr	Si	Ni	B	Cu
6,00	8,32	0,43	0,07	0,16	0,05

Таблица 7

Table 7

Химический состав наплавленного слоя проволокой TD-RC3
Chemical composition of the layer surfaced with TD-RC3 wire

Cr	Mn	Mo	Si	Cu	S	Ni
5,32	2,94	1,61	0,51	0,36	0,24	0,22

Таблица 8

Table 8

Химический состав наплавленного слоя проволокой TD-600
Chemical composition of the layer surfaced with TD-600 wire

Cr	Mn	Si	Cu	Ni	Mo
7,18	2,93	2,36	0,29	0,12	0,02

Таблица 9

Table 9

Химический состав наплавленного слоя проволокой CARBO AF D600
Chemical composition of the layer surfaced with CARBO AF D600 wire

Cr	Mn	Si	Cu	Ni
8,18	0,53	0,36	0,29	0,12

Таблица 10

Table 10

Химический состав наплавленного слоя проволокой K-700HT
Chemical composition of the layer surfaced with K-700NT wire

Mn	Cr	Si	Cu	Ni
4,23	6,29	2,0	0,07	0,06

и ванадий. Заявленный производителями титан в проволоке CARBO AF D600 и вольфрам в K-700HT в наплавленном металле не обнаружен.

Все проволоки демонстрируют основной легирующий элемент хром и отличаются друг от друга только его количеством в наплавленном металле (табл. 5–10). В то же время производитель проволоки ACM 57-OA заявил в сертификате на проволоку содержание хрома 18 %, а фактически в наплавленном металле содержание хрома в 2,2 раза меньше (табл. 6).

Результаты измерения макротвердости на поверхности наплавленных образцов представлены в табл. 11. Было сделано по три измерения в разных местах наплавленной поверхности. Видно, что твердость распределена равномерно по поверхности наплавленного металла.

На рис. 9 в графической форме представлены результаты исследований распределения значений микротвердости наплавленных образцов по глубине наплавки.

Результаты испытания на абразивную стойкость представлены на рис. 10. Изначально можно убедиться, что все наплавочные материалы,

используемые для упрочняющей наплавки, имели меньшую потерю массы во время испытания по сравнению с образцами из стали Гадфильда. По потере массы наименьшие значения имеют проволоки № 7 – K-600NT и № 8 – K-700NT (рис. 10).

Далее партия бил в количестве 12 шт. (рис. 11), наплавленных проволокой K-700NT, были смонтированы на мельницу MMT-1A. На остальные ряды были смонтированы обычные била из стали 110Г13Л (не наплавленные) в количестве 114 шт. (рис. 12). После 466 часов испытаний был проведен осмотр бил (рис. 13). После осмотра испытания были продолжены до полного износа поверхности бил.

Обсуждение результатов

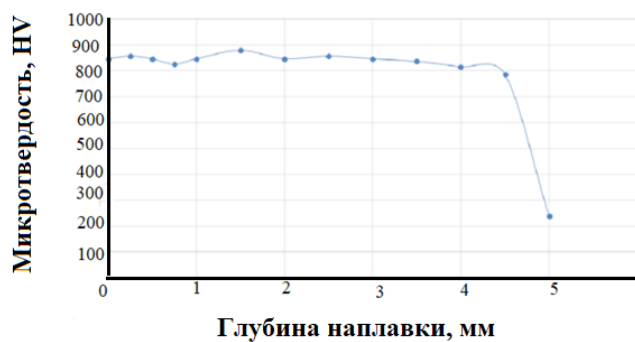
Проведенные исследования показали, что основа наплавленной микроструктуры – мартенсит и карбиды, такие как M3C, M7C3 и M23C6. В микроструктуре наплавленной проволокой ACM 57-OA (рис. 8, а) видны бориды. Высокое содержание углерода в проволоках ACM 57-OA, TD-RC3, CARBO AF D600

Таблица 11

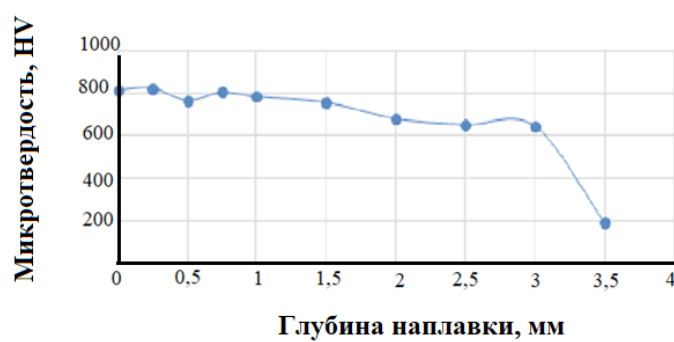
Table 11

Твердость слоя наплавки образцов по Роквеллу, HRC
Rockwell hardness of the surfaced layer of samples, HRC

Наименование образца / Sample name	Твердость 1 / Hardness 1	Твердость 2 / Hardness 2	Твердость 3 / Hardness 3	Среднее значение / Average value
ACM 57-OA	48,5	50	51	49,83
TD-RC3	45,5	46,0	48	46,5
TD-600	50	51	51	50,66
CARBO AF D600	55	54	58	56,5
K-600HT	58	55	59	57,5
K-700HT	61	61,5	61	61
T-590	40	42	44	42



а



б

Рис. 9. Профили микротвердости по глубине наплавки:

а – проволока K-700HT; б – проволока TD-600

Fig. 9. Microhardness profiles across the surfaced depth:

а – K-700NT wire; б – TD-600 wire

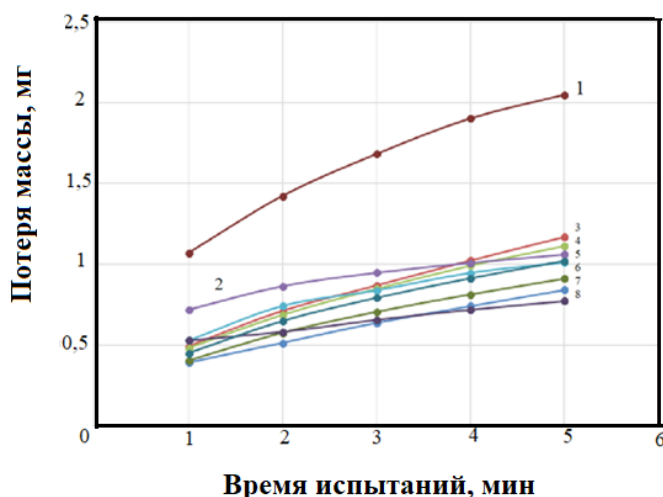


Рис. 10. Результаты испытаний по потере массы наплавочных проволок на абразивный износ:

1 – сталь Гадфильда; 2 – ACM 57-OA; 3 – T-590; 4 – TD-RC3; 5 – CARBO AF D600; 6 – TD-600; 7 – K-600HT; 8 – K-700HT

Fig. 10. Abrasive wear test results (mass loss of surfacing wires):

1 – Hadfield steel; 2 – ASM 57-OA; 3 – T-590; 4 – TD-RC3; 5 – CARBO AF D600; 6 – TD-600; 7 – K-600HT; 8 – K-700NT



Рис. 11. Наплавленные била для монтажа на мельницу

Fig. 11. Surfaced beaters for mill mounting

и K-600HT вызывает формирование мартенсита в качестве основы матрицы с включениями карбидов хрома (рис. 8, з). Мартенситная микроструктура часто выбирается из-за ее превосходной износостойкости к абразивному износу и удовлетворительной ударопрочности.

Анализируя средние значения измерений твердости и микротвердости, выполненных вдоль поперечного сечения наплавленных валиков, можно заметить, что значения твердости были близки к 720...900 HV, за исключением образца проволоки TD-RC3 с твердостью около



Рис. 12. Размещение бил на мельнице

Fig. 12. Placement of beaters in the mill

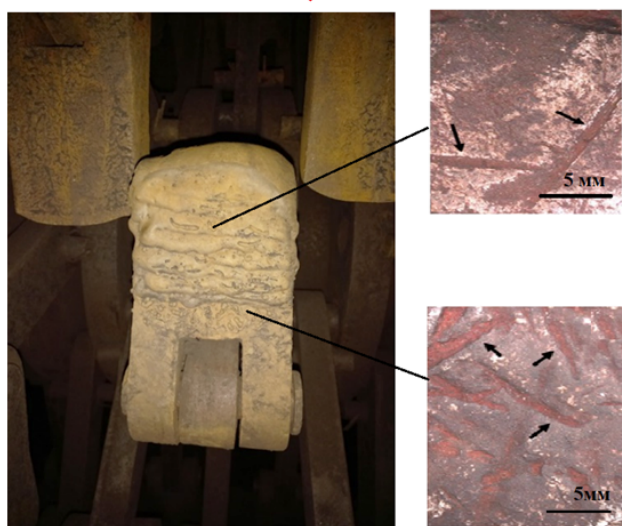


Рис. 13. Осмотр наплавленных бил после 466 часов испытаний

Fig. 13. Inspection of welded beaters after 466 hours of testing

46,5 HRc. Эти значения значительно выше, чем у подложки Гадфильда, которая имела измеренную твердость 258 HV. Профиль микротвердости измеряли по глубине покрытия в образцах

рис. 9. Глубина наплавленных слоев 3...4 мм. Твердость средней области покрытия была измерена со средним значением 750 HV, в то время как твердость верхней части покрытий была измерена с самыми высокими значениями. На рис. 9 показана пиковая микротвердость 900 HV для двух образцов. Более высокая твердость покрытия объясняется образованием большого количества первичных карбидов M_7C_3 и может быть связана с наличием мартенситной фазы. В случае наплавки (рис. 10, б) твердость снижается, что связано с относительно более низкой концентрацией таких элементов, как Cr и C, в наплавленном металле. Таким образом, можно предположить, что тип, размер зерна, форма и распределение карбидов, а также структура матрицы оказывают сильное влияние на твердость наплавленного слоя.

Необходимо отметить, что, независимо от используемых для наплавки наплавочных материалов, тепловые режимы не повлияли на микроструктуру до такой степени, чтобы изменить твердость наплавленных валиков. Кроме того, значение твердости для наплавленных валиков примерно в два раза больше, чем для подложки из стали 110Г13Л, что может указывать на большую стойкость к износу по сравнению с подложкой. Увеличение твердости по отношению к подложке можно объяснить количеством карбидов, распределенных в фазе матрицы [12, 36, 37]. Соотношение объемов карбидов и матрицы играет важную роль в износостойкости. Покрытие с большей объемной долей карбидов обладает

большей износостойкостью, что также коррелирует с большей твёрдостью [20–24, 38–40].

В ходе проведенных нами исследований стандартных бил из стали 110Г13Л и наплавленных различными проволоками (разного химического состава и с высокими значениями твердости) требуются некоторые пояснения к полученным результатам. Известно, что твердость как матрицы, так и карбидной фазы определяет твердость наплавленного слоя в целом. Твердость легированных сталей обычно может служить мерой абразивной износостойкости [24, 41, 42]. Износостойкость обычно увеличивается с увеличением твердости [25]. Авторы [26] сообщили, что износостойкость покрытий «Ni3Al – карбиды M7C3» значительно улучшилась из-за наличия твердых фаз в пластичной матрице.

В нашем случае карбиды располагаются в твердой (мартенситной) матрице. Согласно результатам наших исследований твердости наплавленного слоя и испытаний на абразивный износ, существует связь между твердостью и износостойкостью, поскольку наплавленные образцы с твёрдостью от 500 и 1000 HV оказали на 30–50 % больше сопротивления воздействию абразива, чем образцы из стали 110Г13Л (рис. 10). Поскольку потеря массы во всех наплавленных образцах невелика, важно также учитывать чувствительность теста. Таким образом, можно сказать, что все образцы имеют схожие результаты, как это наблюдалось в других исследованиях [19–24, 43–45]. Карбиды, расположенные над поверхностью матрицы, могут временно защитить ее от дальнейшего износа. Эта защита происходит потому, что выступающие карбиды предотвращают прямой контакт между поверхностью образца и абразивом. Выступающие карбиды могут служить точками закрепления для продуктов износа, способствуя их уплотнению и спеканию и образуя стабильное защитное трибопокрытие [19, 20].

Из анализа поперечного сечения образца стали 110Г13Л после промышленных испытаний на абразивное изнашивание частицами угля было обнаружено распространение трещин под поверхностью детали без видимой связи с поверхностью. Авторы [20] провели система-

тический анализ важности карбидных включений для оценки ударной вязкости трех типов сталей – марганцевой стали (марка В3), стали с высоким содержанием углерода (марка В4) и хромосодержащей стали (марка С), сообщая, что степень охрупчивания в аустенитных марганцевых сталях зависит от степени покрытия границ зерен охрупчивающими фазами. Тонкие карбиды были определены и классифицированы авторами как имеющие толщину менее 0,2 мкм. Толстые карбиды были назначены толщиной около 0,5...1,5 мкм, будучи более опасными для больших толщин наплавки [20].

В настоящем исследовании много трещин было обнаружено в областях с карбидами размером более 0,2 мкм, многие другие распространялись там, где величина карбидных включений была менее 0,2 мкм. Это говорит о том, что в условиях удара и истирания, в которых работает компонент била из стали 110Г13Л, недостаточно иметь карбидные включения размером менее 0,2 мкм, поэтому необходимо предотвращать или устранять выделения карбидов на границе зерен. Этот факт будет стимулировать дальнейшие наши исследования в области термообработки для достижения требований по удару и истиранию компонентов бил угольных мельниц для размола угля.

На рис. 13 показана изношенная поверхность сегмента дробилки в верхней части с использованием стереомикроскопа. Хорошо видны следы деформации при макроскопическом исследовании. Эти следы деформации напоминают следы износа из-за значительных ударов частиц о поверхность. Авторы [22] классифицировали износ, вызванный повторяющимся ударом частиц твердого тела, как ударно-износный. Однако синергетический эффект между ударом и истиранием, называемый в литературе ударно-истирающим, был описан несколькими авторами [12–20]. Явления повреждения изношенных бил при работе на угольных мельницах от комбинированного действия привели нас к выводу, что механизмы ударного повреждения, синергетически взаимодействующие с механизмами истирания, создают результирующие скорости износа, превышающие сумму отдельных компонентов, что согласуется с результа-

тами работ [16–23]. Важно подчеркнуть, что наблюдаемые следы износа (см. рис. 12) превышают измеренный размер зерна материала, это позволяет предположить, что процесс удаления материала происходит в миллиметровом масштабе. Соответственно, учитывая природу данного явления, связанного с измельчением абразивных фрагментов угля и скоростями соударения между двумя металлическими телами, термин «ударно-абразивное воздействие» лучше описывает механизм, рассматриваемый в данном исследовании.

Для сравнения износостойкости наплавочных материалов с различными микроструктурами, в том числе некоторых материалов в различных деформированных состояниях, скорость износа может быть представлена как износ на распыленную энергию при ударах [23]. Следует отметить, что во время удара энергия будет идти и на другие процессы, помимо износа (например, трение). Энергии, в работе [23] рассеиваемые во время удара, рассчитывались индивидуально по высокоскоростным изображениям каждого испытания. Представление скоростей износа на основе рассеиваемой энергии и массы эрозионных частиц, по мнению авторов, может дать более точную оценку результатов испытаний на износ.

В заключение отметим, что промышленные испытания наплавленных бил показали существенное увеличение срока службы бил по сравнению с не наплавленными билами. Оценка абразивной износостойкости исследуемых наплавочных проволок от различных производителей показывает близкие результаты. Все исследованные наплавочные проволоки обладают характеристиками, которые позволяют применять их для упрочняющих покрытий на деталях из стали 110Г13Л в горнодобывающих материалах или других компонентах, требующих высокой износостойкости.

Выводы

1. В наплавленных слоях для всех исследуемых наплавочных проволок в поперечном сечении видно, что разбавление между наплавленным слоем и подложкой незначительно. Более

высокие тепловложения от сварочной дуги, как правило, приводят к образованию более высоких и широких валиков, тогда как более низкие значения тепловложения обычно приводят к отслоению валика. Было отмечено наличие трещин в некоторых образцах, которые останавливались в буферном слое.

2. Микроструктурный анализ показал, что структура, обнаруженная в наплавленном слое, состоит из карбидных включений хрома, железа и бора, расположенных в мартенситной матрице. В процессе наплавки зёрна, расположенные ближе к области, более мелкие, чем зёрна на поверхности, – в данном случае из-за увеличения скорости охлаждения, что подавляет рост зерна.

3. Диапазон значений микротвердости 550...900 HV зафиксирован для всех исследуемых наплавочных проволок, что 2–3 раза выше значений микротвердости стали 110Г13Л (около 250 HV). Высокая твердость обеспечена высоким содержанием карбидов хрома в наплавленном металле.

4. Результаты испытания на абразивную износостойкость показали, что все исследованные образцы имели процентное содержание хрома в наплавленном металле в диапазоне от 4,3 до 8,4 % и показали практически одинаковую износостойкость. Испытания наплавленных бил в условиях реального технологического процесса измельчения угля на тепловой электростанции показали увеличение срока службы на 40–50 % по сравнению с билами из стали 110Г13Л.

Список литературы

1. Tweedale G., Paton W.D.M. Sir Robert Abbott Hadfield F.R.S (1858–1940) and the discovery of manganese steel // Notes and Records of the Royal Society of London. – 1985. – Vol. 40 (1). – P. 63–74.
2. Gauzzi F., Rossi M., Verdini B. Cold-working induced martensitic transformation in 12 percent Mn austenitic steel (Hadfield steel) // Metallurgia Italiana. – 1971. – Vol. 63 (11). – P. 555.
3. Dastur Y.N., Leslie W.C. Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel // Metallurgical transactions A. – 1981. – Vol. 12 (5). – P. 749–759. – DOI: 10.1007/BF02648339.

4. *Bhattacharyya S.* A friction and wear study of Hadfield manganese steel // *Wear*. – 1966. – Vol. 9 (6). – P. 451–461. – DOI: 10.1016/0043-1648(66)90136-0.
5. The deformation, strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed Hadfield steel in abrasive and impact conditions / M. Lindroos, M. Apostol, V. Heino, K. Valtonen, A. Laukkanen, K. Holmberg, V.T. Kuokkala // *Tribology Letters*. – 2015. – Vol. 57 (3). – P. 24. – DOI: 10.1007/s11249-015-0477-6.
6. *Тен Э.Б., Базлова Т.А., Лихолобов Е.Ю.* Влияние внепечной обработки на структуру и механические свойства стали 110Г13Л // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2015. – № 3. – С. 26–28.
7. *Болобов В.И., Бочков В.С., Цинянь С.* Износостойкость стали Гадфильда при больших удельных нагрузках // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2012. – № 10. – С. 12–14.
8. Исследование механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания высокомарганцевой стали / В.М. Колокольников, К.Н. Вдовин, В.П. Чернов, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко, В.К. Дубровин // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – 2017. – № 2. – С. 54–62. – DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-2-54-62.
9. Разработка износостойких деталей из высокомарганцевой модифицированной стали 110Г13Л / Ш.М. Чоршанбиев, К.А. Каримов, Ш.Р. Адилова, Н.Д. Тураходжаев, А. Еркинджонов, М.М. Мирмухамедов, Дж.Х. Шарипов, З.Р. Обидов, Х. Комолов // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. – 2024. – Т. 17 (2). – С. 175–185. – На англ. яз. – EDN ITXLPА.
10. *Болобов В.И., Чупин С.А.* Влияние вида упрочняющей обработки на износостойкость материалов горного оборудования // *Записки Горного института*. – 2015. – Т. 216. – С. 44–48.
11. Износостойкость стали 110Г13Л в различных абразивных средах / В.И. Болобов, А.П. Баталов, В.С. Бочков, С.А. Чупин // *Записки Горного института*. – 2014. – Т. 209. – С. 17–22.
12. Comparative metallographic analysis of the structure of St3 steel after being exposed to different ways of work-hardening / A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, M.V. Grechneva, V.V. Kondrat'ev, A.I. Karlina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 411 (1). – P. 012012. – DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012012.
13. Features of investigation of steels with a metastable austenitic structure / V.G. Teplukhin, A.I. Popov, V.N. Kudryavtsev, D.S. Fomin, M.M. Radkevich // *Advances in Mechanical Engineering: Selected contributions from the conference "Modern engineering: Science and education"*, Saint Petersburg, Russia, June 2022. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. – P. 164–171. – DOI: 10.1007/978-3-031-30027-1_18.
14. Formation of a dissipative structure of metastable austenite for raising the wear resistance of carbon steels / M.A. Filippov, V.P. Shveikin, V.A. Sharapova, S.M. Nikiforova, M.S. Khadyev // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2023. – Vol. 64 (9). – P. 509–515. – DOI: 10.1007/s11041-023-00854-w.
15. Surface wear in Hadfield steel castings DOPED with nitrided vanadium / K. Vdovin, A. Pesin, N. Feoktistov, D. Gorlenko // *Metals*. – 2018. – Vol. 8 (10). – P. 845. – DOI: 10.3390/met8100845.
16. Description of the complex of technical means of an automated control system for the technological process of thermal vortex enrichment / V.V. Kondrat'ev, V.O. Gorovoy, A.D. Kolosov, R.V. Kononenko, V.Y. Konyukhov // *Journal of Physics Conference Series*. – 2020. – Vol. 1661 (1). – P. 012101. – DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012101.
17. Operational factors of new flux cored wires of the Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo system for surfacing of protective plates of shearer cutting drums / N. Kozyrev, A. Usoltsev, R. Kryukov, A. Gusev, I. Osetkovskiy // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 377. – P. 012022. – DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012022.
18. Эксплуатационные показатели новых порошковых проволок системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo / Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Р.Е. Крюков, А.И. Гусев, И.В. Осетковский // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2019. – Т. 75, № 7. – С. 860–869. – EDN HQDATQ.
19. Наплавка порошковыми проволоками систем C–Si–Mn–Mo–V–B и C–Si–Mn–Cr–Mo–V деталей горнорудного оборудования / А.И. Гусев, Н.В. Кибко, М.В. Попова, Н.А. Козырев, И.В. Осетковский // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. – 2017. – Т. 60, № 4. – С. 318–323. – DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-318-323.
20. *Шляхова Г.В., Данилов В.И.* Исследование влияния электродуговой наплавки на структуру и свойства покрытий // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. – 2024. – Т. 67, № 4. – С. 433–439. – DOI: 10.17073/0368-0797-2024-4-433-439.
21. *Metlitskii V.A.* Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron // *Welding International*. – 2008. – Vol. 22 (11). – P. 796–800. – DOI: 10.1080/09507110802593646.
22. Pulsed TIG cladding of a highly carbon-, chromium-, molybdenum-, niobium-, tungsten- and vanadium-alloyed flux-cored wire electrode on duplex stainless steel X2CrNiMoN 22-5-3 / D. Mutaşcu, O. Karancsi, I. Mite-



lea, C.M. Crăciunescu, D. Buzdugan, I.D. Uțu // *Materials*. – 2023. – Vol. 16 (13). – P. 4557. – DOI: 10.3390/ma16134557.

23. Exploring the trends in flux-cored arc welding: scientometric analysis approach / A. Świerczyńska, B. Varbai, C. Pandey, D. Fydrych // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2024. – Vol. 130 (1). – P. 87–110. – DOI: 10.1007/s00170-023-12682-6.

24. *Golyakevich A.A., Orlov L.N., Maksimov S.Yu.* Peculiarities of welding process using metal cored wire of TMV5-MK grade // *The Paton Welding Journal*. – 2019. – Vol. 6. – P. 50–53. – DOI: 10.15407/tpwj2019.06.10.

25. *Sabzi M., Obeydavi A., Mousavi Anijdan S.H.* The effect of joint shape geometry on the microstructural evolution, fracture toughness, and corrosion behavior of the welded joints of a Hadfield steel // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – 2019. – Vol. 26 (12). – P. 1053–1063. – DOI: 10.1080/15376494.2018.1430268.

26. *Eremin E.N., Losev A.S.* A flux-core wire for hardfacing sealing surfaces of stop valves // *Welding International*. – 2016. – Vol. 30 (3). – P. 216–219. – DOI: 10.1080/09507116.2015.1044268.

27. *Kanishka K., Acherjee B.* A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2023. – Vol. 89. – P. 220–283. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.034.

28. *Lee C.M., Woo W.S., Roh Y.H.* Remanufacturing: Trends and issues // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. – 2017. – Vol. 4 (1). – P. 113–125. – DOI: 10.1007/s40684-017-0015-0.

29. Application of plasma surface quenching to reduce rail side wear / M.V. Konstantinova, A.E. Balanovskiy, V.E. Gozbenko, S.K. Kargapol'tsev, A.I. Karlina, M.G. Shtayger, E.A. Guseva, B.O. Kuznetsov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 560 (1). – P. 012146. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012146.

30. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails / K. Yelemessov, D. Baskanbayeva, N.V. Martyushev, V.Y. Skeebe, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina // *Metals*. – 2023. – Vol. 13 (6). – P. 1043. – DOI: 10.3390/met13061043.

31. Investigation of macro and micro structures of compounds of high-strength rails implemented by contact butt welding using burning-off / M.G. Shtayger, A.E. Balanovskiy, S.K. Kargapol'tsev, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina, Yu.I. Karlina, A.S. Govorkov, B.O. Kuznetsov // *IOP Conference Series: Materials*

Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560 (1). – P. 012190. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012190.

32. Surface hardening of structural steel by cathode spot of welding arc / A.E. Balanovskiy, M.G. Shtayger, A.I. Karlina, S.K. Kargapol'tsev, V.E. Gozbenko, Yu.I. Karlina, A.S. Govorkov, B.O. Kuznetsov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 560 (1). – P. 012138. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.

33. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 126 (1). – P. 012016. – DOI: 10.1088/1757-899X/126/1/012016.

34. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage / E.A. Efremenkova, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeebe, M.V. Grechneva, A.V. Olisov, A.D. Ens // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 5. – DOI: 10.3390/app12010005.

35. *Martyushev N.V., Skeebe V.Yu.* The method of quantitative automatic metallographic analysis // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 803 (1). – P. 012094. – DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.

36. *Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V.* Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – Vol. 194 (2). – P. 022037. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.

37. Defining efficient modes range for plasma spraying coatings / E.A. Zverev, V.Yu. Skeebe, P.Yu. Skeebe, I.V. Khlebova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. – Vol. 87 (8). – P. 082061. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082061.

38. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions / R.A. Mamadaliev, P.V. Bakhmatov, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeebe, A.I. Karlina // *Metallurgist*. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1255–1264. – DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.

39. Plasma-arc surface modification of metals in a liquid medium / A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, V.V. Kondrat'ev, V. Van Huy, A.I. Karlina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 411 (1). – P. 012013. – DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012013.

40. *Karlina A.I., Karlina Y.I., Gladkikh V.A.* Studying the microstructure, phase composition, and wear resistance of alloyed layers after laser surface

melting of low-carbon steel 20 // Metallurgist. – 2024. – Vol. 68 (5). – P. 757–766. – DOI: 10.1007/s11015-024-01782-7.

41. Study of wear of an alloyed layer with chromium carbide particles after plasma melting / A.I. Karlina, Y.I. Karlina, V.V. Kondratiev, R.V. Kononenko, A.D. Breki // Crystals. – 2023. – Vol. 13 (12). – P. 1696. – DOI: 10.3390/cryst13121696.

42. Complex metallographic researches of 110G13L steel after heat treatment / A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, V.V. Kondrat'ev, S.A. Nebogin,

A.I. Karlina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411 (1). – P. 012014. – DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012014.

43. An investigation into the behavior of cathode and anode spots in a welding discharge / A.I. Karlina, A.E. Balanovskiy, V.V. Kondratiev, V.V. Romanova, A.G. Batukhtin, Y.I. Karlina // Applied Sciences Switzerland. – 2024. – Vol. 14 (21). – P. 9774. – DOI: 10.3390/app14219774.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov







Study of abrasive wear resistance of flux-cored wires during surfacing on high-manganese Hadfield steel



Yulia Karlina^{1, a, *}, Vladimir Konyukhov^{2, 3, b}, Tatiana Oparina^{2, c}

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

³ Cherepovets State University, 5 Lunacharsky pr., Cherepovets, 162600, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-6519-561X>,  jul.karlina@gmail.com; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-9137-9404>,  konyukhov_vyu@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-9062-6554>,  martusina2@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 September 2025

Revised: 03 October 2025

Accepted: 28 October 2025

Available online: 15 December 2025

Keywords:

Plasma boriding

Amorphous boron

Iron borides

Coating

ABSTRACT

Introduction. Austenitic high-manganese steel is commonly used in various railway and mining components, such as crusher plates, where high impact and abrasive resistance and sliding wear resistance are required, as it exhibits a unique combination of high toughness and high work-hardening ability. Therefore, it is important to understand the behavior of wear-resistant materials such as austenitic high-manganese steel under impact and sliding wear. However, this steel has a limitation: it develops its high work-hardening ability only under high impact loads and high-stress conditions. Alternatively, various hardening methods, surfacing, or replacement with low-carbon, high-alloy steels and high-chromium cast irons are used. **The purpose** of this study is to evaluate the abrasive wear resistance of flux-cored wires during surfacing on high-manganese *Hadfield* steel. **Methods and materials.** This study examines surfacing wires whose main alloying elements are chromium, vanadium, and tungsten. The chemical composition of the surfaced samples was determined using a *BRUKER SI TITAN* portable X-ray fluorescence analyzer for metals and alloys. A *Duramin-40 AC3* hardness tester (*STRUERS APS*, Ballerup, Denmark) was used to measure Rockwell hardness. *1.1% C-13% Mn* steel demonstrated an initial bulk hardness of $HRC = 23 \pm 3$. Specimens for microstructural study were selected from cast and surfaced samples. The microstructures were examined by optical microscopy after etching in 2.5% nitric acid solutions, rinsing in methanol, and immersion in 15% *HCl* solution. Impact abrasive wear tests were conducted on a *DUCOM (TR-56-M3)* impact abrasive wear testing machine (made in India). **Results and discussion.** An analysis of a cross-section of a *1.1% C-13% Mn* steel specimen after abrasive wear testing revealed crack propagation beneath the surface of the part, with no visible connection to the surface, indicating that cracks initiated both at and below the surface. The microstructure of the surfaced layers, rich in finely dispersed boron carbides dispersed in the martensitic matrix, combined with a lamellar molybdenum boride phase, suggests that the material surfaced on *Hadfield* steel may possess higher hardness and wear resistance than the base material. Industrial tests of surfaced beaters revealed that the dominant wear mechanisms are micro-cutting, pitting, and micro-fracture (chipping and micro-indentation). Based on the results of the studies of surfacing materials, it can be concluded that wires with chromium content in the range of 3–6% have the characteristics for applications requiring high abrasive wear resistance in the mining industry.

For citation: Karlina Yu.I., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A. Study of abrasive wear resistance of flux-cored wires during surfacing on high-manganese Hadfield steel. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 287–308. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-287-308. (In Russian).

References

1. Tweedale G., Paton W.D.M. Sir Robert Abbott Hadfield F.R.S (1858–1940) and the discovery of manganese steel. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 1985, vol. 40 (1), pp. 63–74.
2. Gauzzi F., Rossi M., Verdini B. Cold-working induced martensitic transformation in 12 percent Mn austenitic steel (Hadfield steel). *Metallurgia Italiana*, 1971, vol. 63 (11), p. 555.

* Corresponding author

Karlina Yulia I., Ph.D. (Engineering), Research Associate
 National Research Moscow State Construction University,
 26 Yaroslavskoe shosse,
 129337, Moscow, Russian Federation
 Tel.: +7 914 879-85-05, e-mail: jul.karlina@gmail.com

3. Dastur Y.N., Leslie W.C. Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel. *Metallurgical Transactions A*, 1981, vol. 12 (5), pp. 749–759. DOI: 10.1007/BF02648339.
4. Bhattacharyya S. A friction and wear study of Hadfield manganese steel. *Wear*, 1966, vol. 9 (6), pp. 451–461. DOI: 10.1016/0043-1648(66)90136-0.
5. Lindroos M., Apostol M., Heino V., Valtonen K., Laukkanen A., Holmberg K., Kuokkala V.T. The deformation, strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed Hadfield steel in abrasive and impact conditions. *Tribology Letters*, 2015, vol. 57 (3), p. 24. DOI: 10.1007/s11249-015-0477-6.
6. Ten E.B., Bazlova T.A., Likhobolov E.Yu. Vliyanie vnepechnoi obrabotki na strukturu i mekhanicheskie svoystva stali 110G13L [Effect of out-of-furnace treatment on the structure and mechanical properties of steel 110G13L]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2015, no. 3, pp. 26–28. (In Russian).
7. Bolobov V.I., Bochkov V.S., Qinyan X. Iznosostoykost' stali Gadfil'da pri bol'shikh udel'nykh nagruzkakh [The influence of high specific loads to wear resistance of Hadfield steel]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*, 2012, no. 10, pp. 12–14.
8. Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Chernov V.P., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A., Dubrovin V.K. Issledovanie mekhanizmov abrazivnogo i udarno-abrazivnogo iznashivaniya vysokomargantsevoi stali [Study of abrasive and impact and abrasive wear mechanisms of high manganese steel]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2017, no. 2, pp. 54–62. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-2-54-62.
9. Chorshanbiev Sh.M., Karimov K.A., Adilova Sh.R., Turakhodjaev N.J., Erkinjonov A., Mirmuhamedov M.M., Sharipov J.H., Obidov Z.R., Komolov Kh. Development of wear-resistant parts of high-manganese modified 110G13L brand steel. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2024, vol. 17 (2), pp. 175–185.
10. Bolobov V.I., Chupin S.A. Vliyanie vida uprochnyayushchei obrabotki na iznosostoykost' materialov gornogo oborudovaniya [Influence of the type of hardening treatment on the wear resistance of mining equipment materials]. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of the Mining institute*, 2015, vol. 216, pp. 44–48.
11. Bolobov V.I., Batalov A.P., Bochkov V.S., Chupin S.A. Iznosostoykost' stali 110G13L v razlichnykh abrazivnykh sredakh [Wear resistance of 110G13L steel in various abrasive environments]. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of the Mining institute*, 2014, vol. 209, pp. 17–22.
12. Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Grechneva M.V., Kondrat'ev V.V., Karlina A.I. Comparative metallographic analysis of the structure of St3 steel after being exposed to different ways of work-hardening. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411 (1), p. 012012. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012012.
13. Teplukhin V.G., Popov A.I., Kudryavtsev V.N., Fomin D.S., Radkevich M.M. Features of investigation of steels with a metastable austenitic structure. *Advances in Mechanical Engineering: Selected contributions from the conference "Modern engineering: Science and education"*, Saint Petersburg, Russia, June 2022. Cham, Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 164–171. DOI: 10.1007/978-3-031-30027-1_18.
14. Filippov M.A., Shveikin V.P., Sharapova V.A., Nikiforova S.M., Khadyev M.S. Formation of a dissipative structure of metastable austenite for raising the wear resistance of carbon steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 2023, vol. 64 (9), pp. 509–515. DOI: 10.1007/s11041-023-00854-w.
15. Vdovin K., Pesin A., Feoktistov N., Gorlenko D. Surface wear in Hadfield steel castings DOPED with nitrided vanadium. *Metals*, 2018, vol. 8 (10), p. 845. DOI: 10.3390/met8100845.
16. Kondrat'ev V.V., Gorovoy V.O., Kolosov A.D., Kononenko R.V., Konyukhov V.Y. Description of the complex of technical means of an automated control system for the technological process of thermal vortex enrichment. *Journal of Physics Conference Series*, 2020, vol. 1661 (1), p. 012101. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012101.
17. Kozyrev N., Usoltsev A., Kryukov R., Gusev A., Osetkovskiy I. Operational factors of new flux cored wires of the Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo system for surfacing of protective plates of shearer cutting drums. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 377, p. 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012022.
18. Kozyrev N., Usoltsev A., Kryukov R., Gusev A., Osetkovskii I. Ekspluatatsionnye pokazateli novykh poroshkovykh provolok sistemy Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo [Operation indices of the new cored wire of Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo system]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2019, vol. 75, no. 7, pp. 860–869.
19. Gusev A.I., Kibko N.V., Popova M.V., Kozyrev N.A., Osetkovskii I.V. Naplavka poroshkovymi provolokami sistem C–Si–Mn–Mo–V–V i C–Si–Mn–Cr–Mo–V detalei gornorudnogo oborudovaniya [Surfacing of details of mining equipment by powder wires of C–Si–Mn–Mo–V–B and C–Si–Mn–Cr–Mo–V systems]. *Izvestiya vysshikh*



uchebnykh zavedenii. *Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 4, pp. 318–323. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-318-323.

20. Shlyakhova G.V., Danilov V.I. Issledovanie vliyaniya elektrodugovoi naplavki na strukturu i svoistva pokrytii [Effect of electric arc surfacing on the structure and properties of coatings]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2024, vol. 67, no. 4, pp. 433–439. DOI: 10.17073/0368-0797-2024-4-433-439.

21. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron. *Welding International*, 2008, vol. 22 (11), pp. 796–800. DOI: 10.1080/09507110802593646.

22. Mutaşcu D., Karancı O., Mitelea I., Crăciunescu C.M., Buzdugan D., Uțu I.D. Pulsed TIG cladding of a highly carbon-, chromium-, molybdenum-, niobium-, tungsten- and vanadium-alloyed flux-cored wire electrode on duplex stainless steel X2CrNiMoN 22-5-3. *Materials*, 2023, vol. 16 (13), p. 4557. DOI: 10.3390/ma16134557.

23. Świerczyńska A., Varbai V., Pandey Ch., Fydrych D. Exploring the trends in flux-cored arc welding: scientometric analysis approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 130 (1), pp. 87–110. DOI: 10.1007/s00170-023-12682-6.

24. Golyakevich A.A., Orlov L.N., Maksimov S.Yu. Peculiarities of welding process using metal cored wire of TMV5-MK grade. *The Paton Welding Journal*, 2019, vol. 6, pp. 50–53. DOI: 10.15407/tpwj2019.06.10.

25. Sabzi M., Obeydavi A., Mousavi Anijdan S.H. The effect of joint shape geometry on the microstructural evolution, fracture toughness, and corrosion behavior of the welded joints of a Hadfield steel. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2018, vol. 26 (12), pp. 1053–1063. DOI: 10.1080/15376494.2018.1430268.

26. Eremin E.N., Losev A.S. A flux-core wire for hardfacing sealing surfaces of stop valves. *Welding International*, 2016, vol. 30 (3), pp. 216–219. DOI: 10.1080/09507116.2015.1044268.

27. Kanishka K., Acherjee B. A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 89, pp. 220–283. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.034.

28. Lee C.M., Woo W.S., Roh Y.H. Remanufacturing: Trends and issues. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2017, vol. 4 (1), pp. 113–125. DOI: 10.1007/s40684-017-0015-0.

29. Konstantinova M.V., Balanovskiy A.E., Gozbenko V.E., Kargapol'tsev S.K., Karlina A.I., Shtayger M.G., Guseva E.A., Kuznetsov B.O. Application of plasma surface quenching to reduce rail side wear. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560 (1), p. 012146. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012146.

30. Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyshev N.V., Skeebe V.Y., Gozbenko V.E., Karlina A.I. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails. *Metals*, 2023, vol. 13 (6), p. 1043. DOI: 10.3390/met13061043.

31. Shtayger M.G., Balanovskiy A.E., Kargapol'tsev S.K., Gozbenko V.E., Karlina A.I., Karlina Yu.I., Govorkov A.S., Kuznetsov B.O. Investigation of macro and micro structures of compounds of high-strength rails implemented by contact butt welding using burning-off. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560 (1), p. 012190. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012190.

32. Balanovskiy A.E., Shtayger M.G., Karlina A.I., Kargapol'tsev S.K., Gozbenko V.E., Karlina Yu.I., Govorkov A.S., Kuznetsov B.O. Surface hardening of structural steel by cathode spot of welding arc. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560 (1), p. 012138. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.

33. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyskhin A.V., Parts K.A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126 (1), p. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/126/1/012016.

34. Efremenkov E.A., Martyshev N.V., Skeebe V.Yu., Grechneva M.V., Olisov A.V., Ens A.D. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12 (1), p. 5. DOI: 10.3390/app12010005.

35. Martyshev N.V., Skeebe V.Yu. The method of quantitative automatic metallographic analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803 (1), p. 012094. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.

36. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194 (2), p. 022037. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.

37. Zverev E.A., Skeebe V.Yu., Skeebe P.Y., Khlebova I.V. Defining efficient modes range for plasma spraying coatings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87 (8), p. 082061. DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082061.

38. Mamadaliev R.A., Bakhmatov P.V., Martyushev N.V., Skeebe V.Yu., Karlina A.I. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1255–1264. DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.
39. Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Kondrat'ev V.V., Huy V. Van, Karlina A.I. Plasma-arc surface modification of metals in a liquid medium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411 (1), p. 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012013.
40. Karlina A.I., Karlina Y.I., Gladkikh V.A. Studying the microstructure, phase composition, and wear resistance of alloyed layers after laser surface melting of low-carbon steel 20. *Metallurgist*, 2024, vol. 68 (5), pp. 757–766. DOI: 10.1007/s11015-024-01782-7.
41. Karlina A.I., Karlina Y.I., Kondratiev V.V., Kononenko R.V., Breki A.D. Study of wear of an alloyed layer with chromium carbide particles after plasma melting. *Crystals*, 2023, vol. 13 (12), p. 1696. DOI: 10.3390/cryst13121696.
42. Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Kondrat'ev V.V., Nebogin S.A., Karlina A.I. Complex metallographic researches of 110G13L steel after heat treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411 (1), p. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012014.
43. Karlina A.I., Balanovskiy A.E., Kondratiev V.V., Romanova V.V., Batukhtin A.G., Karlina Y.I. An investigation into the behavior of cathode and anode spots in a welding discharge. *Applied Sciences Switzerland*, 2024, vol. 14 (21), p. 9774. DOI: 10.3390/app14219774.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).