



# ВЕСТНИК МАШИНОСТРОЕНИЯ

10  
2025  
Том 104

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор А. С. БОГОЛЮБОВ

Заместитель главного редактора  
Е. А. БОГОЛЮБОВА

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Албагачиев А. Ю. — д-р техн. наук, проф.  
Братухин А. Г. — д-р техн. наук, проф.  
Виринцов А. Л. — д-р техн. наук, проф.  
Гусейнов А. Г. — д-р техн. наук, проф.  
Дмитриев А. М. — д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН  
(председатель секции обработки материалов без снятия стружки)  
Драгунов Ю. Г. — д-р техн. наук, проф.  
Дрезаль А. Е. — д-р техн. наук, проф.  
Зубков Н. Н. — д-р техн. наук, проф.  
Кабаддин Ю. Г. — д-р техн. наук, проф.  
Кутин А. А. — д-р техн. наук, проф.  
Кутин В. В. — д-р техн. наук, проф.  
Левков О. А. — д-р техн. наук, проф.  
Омельченко И. Н. — д-р техн. и экон. наук, проф. (председатель  
секции организации и экономика производства)  
Павлов А. В. — д-р техн. наук, проф.  
Пупкова Д. А. — канд. техн. наук.  
Рыбин В. В. — д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН  
Савельев А. П. — канд. физ.-мат. наук, доц.  
Темасова Г. Н. — д-р техн. наук, доц.  
Трубунов Г. П. — д-р техн. наук, проф.  
Шкаруба Н. Ж. — д-р техн. наук, доц.  
Секретарская Н. В. (ответственный секретарь)

*Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий  
для публикации трудов соискателей ученых степеней*

*Журнал переводится на английский язык, переиздается и  
распространяется во всем мире фирмой "Аллертон Пресс"  
(США)*

Адрес редакции:

ИТТГ6, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2

Телефон: 8 (495) 661-38-80.

E-mail: vestmash@mashin.ru; vestmash@mail.ru

www.mashin.ru

Журнал зарегистрирован 27 марта 2020 г. за ПИ № ФС 77-78172  
в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информацион-  
ной технологии и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР)

Учредитель: Е. А. Боголюбова

Индекс: 27841 ("Пресса России")

Цена свободная

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

## СОДЕРЖАНИЕ

### КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

- Попов А. В., Нотов И. В. — Кинематика импульсного вариатора со сферическими преобразующими механизмами с двумя степенями свободы . . . . . 795
- Халтурин М. А. — Синтез кулачкового механизма с плоским вращающимся коромыслом . . . . . 799
- Адашкин А. М. — Закон Холла—Петча для быстрорежущих сталей . . . . . 803
- Кравченко И. Н., Феськов С. А., Тюрева А. А., Пупкова Д. А. — Исследование особенностей изнашивания лемехов компании Kverneland Group . . . . . 809
- Евдокимов А. П. — Разработка математической модели работы газопровода при наличии трещины . . . . . 814
- Кочетков Ю. М., Подымова О. А., Кочетков Н. Ю. — Тензорные преобразования уравнений газовой динамики в частных производных с целью получения канонического уравнения дисперсии вихря . . . . . 819
- Щерба В. Е., Тегжанов А. С. — Анализ влияния объемов газовых полостей в поршневой гибридной энергетической машине с двумя всасывающими клапанами . . . . . 821
- Афонин С. М. — Гармоническая линеаризация гистерезиса деформации пьезоактюатора для определения автоколебаний в нано- и микромехатронных системах . . . . . 828
- Власенко Д. А., Белоус В. Д. — Обоснование и исследование конструкции перфорированных сит вибрационных грохотов с использованием среды Solidworks Simulation . . . . . 833

### ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

- Сорокин А. А., Пахомова С. А. — Исследование свойств конструкционного материала в условиях криогенных температур . . . . . 837
- Архипов И. К., Абрамова В. И., Агеев О. В., Корягин С. И. — Модель упругопластического разрушения пластины с множественными одно-направленными трещинами . . . . . 840
- Нестеренко Г. А. — Формирование погрешностей при обработке дисков энергетических машин, вызванных остаточными напряжениями . . . . . 843
- Кычкин А. К., Стручкова Н. В., Стручков Н. Ф. — Исследование влияния климатических условий Севера на деструкцию поверхности полимерных композиционных материалов . . . . . 846
- Нефедьев С. П., Шаповалов А. Н., Харченко М. В., Дёма Р. Р., Амиров Р. Н., Латыпов О. Р. — Повышение абразивной стойкости ротора эксгаустера агломерационной машины восстановительной наплавкой . . . . . 851
- Аббасов В. А., Насиров М. С. — Особенности заточки дисковых фрез с учетом деформации и износа режущих зубьев при фрезеровании канавок в композитных древесных материалах . . . . . 856
- Клауч Д. Н., Куцева М. Е., Малышева Н. Б., Берлин С. Л. — Шлифование тугоплавких сплавов на основе вольфрама . . . . . 861
- Старков В. К., Вараткова Ж. В. — Композиционные шлифовальные круги с предельно высокими номерами структуры и условия их изготовления . . . . . 866
- Симон С., Юсубов Н. Д., Амири С. Ф., Амиров Ф. Г. — Твердость поверхностных слоев заготовок из хромоникелевых сплавов при гидроабразивной обработке . . . . . 873
- Еренков О. Ю. — Совершенствование конструкций жидкостно-газовых эжекторов . . . . . 877

Научная статья

УДК 621.78

DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-10-851-855

## Повышение абразивной стойкости ротора эксгаустера агломерационной машины восстановительной наплавкой\*

Сергей Павлович Нефедьев<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Алексей Николаевич Шаповалов<sup>2</sup>, канд. техн. наук, Максим Викторович Харченко<sup>3</sup>✉, канд. техн. наук, Роман Рафаэлевич Дёма<sup>4</sup>, д-р техн. наук, Руслан Низамиевич Амиров<sup>5</sup>, канд. техн. наук, Олег Рафикович Латыпов<sup>6</sup>, канд. техн. наук

<sup>1, 2</sup> Новотроицкий филиал Московского института стали и сплавов (национальный исследовательский технологический университет), Новотроицк, Россия

<sup>4</sup> Херсонский технический университет, Геническ, Россия

<sup>3, 4, 5, 6</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия, kharchenko.mv@bk.ru✉

**Аннотация.** Проанализированы условия эксплуатации роторов эксгаустеров в агломерационном производстве для прокачки воздуха через слой спекаемой шихты и способы восстановления деталей, работающих в условиях газоабразивного изнашивания. Разработаны составы износостойких покрытий, технологии испытаний на газоабразивное изнашивание материалов и восстановления ротора эксгаустера.

**Ключевые слова:** ротор эксгаустера, газоабразивное изнашивание, износостойкость, восстановление, наплавочный материал.

**Для цитирования:** Повышение абразивной стойкости ротора эксгаустера агломерационной машины восстановительной наплавкой / С. П. Нефедьев, А. Н. Шаповалов, М. В. Харченко, Р. Р. Дёма, Р. Н. Амиров, О. Р. Латыпов // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104. № 10. С. 851–855. DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-10-851-855.

Original article

## Increasing of the abrasive resistance of the rotor of the exhauster of the agglomeration machine by restorative surfacing

S. P. Nefed'ev<sup>1</sup>, A. N. Shapovalov<sup>2</sup>, M. V. Kharchenko<sup>3</sup>✉, R. R. Dema<sup>4</sup>, R. N. Amirov<sup>5</sup>, O. R. Latypov<sup>6</sup>  
<sup>1, 2</sup> Novotroitsk branch of National University of Science and Technology "MISIS", Novotroitsk, Russia  
<sup>4</sup> Kherson Technical University, Genichesk, Russia  
<sup>3, 4, 5, 6</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia, Magnitogorsk, kharchenko.mv@bk.ru✉

**Abstract.** The operating conditions of exhauster rotors in agglomeration production for air pumping through a layer of sintered charge and methods for restoration of parts operating under gas-abrasive wear conditions are considered. The compositions of wear-resistant coatings, technologies for testing of materials for gas-abrasive wear and restoration of the exhauster rotor are developed.

**Keywords:** exhauster rotor, gas-abrasive wear, wear resistance, restoration, surfacing material.

В агломерационных производствах производительность напрямую зависит от работы ротора и эффективности эксгаустера — центробежного насоса для прокачивания воздуха через слой спекаемой шихты, используемого для удаления агломерационных газов в окружающую среду с преодолением сопротивления газоотводящего тракта [1–3].

\* **Финансирование.** Грант министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FZRU-2023-0008.

Ресурс роторов агломерационной машины зависит от запыленности агломерационных газов, абразивности пыли и качества деталей эксгаустера. Ресурсы роторов составляют от 20 суток до года [1–6]. Повысить ресурс ротора можно совершенствованием системы пылеочистки и улучшением конструкции ротора, использованием более износостойких материалов при его изготовлении и восстановлении рабочих поверхностей.

Цель проводимых исследований — разработка технологии восстановления роторов эксгаустеров

агломерационного цеха АО "Уральская Сталь" с обеспечением заложенного ресурса и достижением твердости восстановленных поверхностей не менее 66 HRC.

В эксгаустерах, используемых для прокачивания запыленных агломерационных газов, наибольшему изнашиванию подвержены лопатки роторов и улитки. Интенсивность изнашивания деталей, контактирующих с запыленными агломерационными газами, во многом зависит от состава и концентрации пыли, влажности, температуры и параметров режима работы эксгаустера.

Состав и свойства агломерационной пыли определяют компоненты агломерируемой шихты. Пыль состоит, как правило, из мелких плохо комкующихся шихтовых компонентов. Для определения состава и оценки абразивных свойств агломерационной пыли, уносимой потоком отводящих газов, исследовали пробы из батарейных циклонов и улиток эксгаустеров. Химический состав пыли представлен в табл. 1.

Агломерационная пыль, улавливаемая в батарейных циклонах и оседающая в улитке эксгаустера, одинаковая по химическому составу. В составе пыли преобладают частицы колошниковой пыли и отсева окатышей, поступающих в доменный цех, которые вводят в состав агломерируемой шихты. Наличие в составе пыли металлического железа, вероятно, обусловлено изнашиванием металлических частей газового тракта и эксгаустера.

Процесс образования агломерационной пыли, обусловленный отсевом железорудных материалов, наличием шламов и частиц горячбрикетированного железа, указывает на содержание большого количества отходов металлургического производства и ее повышенную абразивность [5–7].

Для определения стойкости роторов эксгаустеров агломерационного цеха проанализировали данные за 2005–2021 гг. Состав агломерационной ших-

Таблица 1  
Химический состав агломерационной пыли, %

Элемент	Из циклона	Из улитки эксгаустера
Fe <sub>об</sub>	55,9	54,8
Fe <sub>мет</sub>	0,22	0,26
FeO	24,7	23,65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	54,53	53,96
CaO	6,3	6,6
SiO <sub>2</sub>	7,94	9,7
MgO	2,11	1,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,87	1,2
S	0,45	0,72
Пустая порода	1,88	2,61
Углерод	1,49	2,27

Таблица 2

Срок службы роторов эксгаустеров, сут.

Год	Ротор агломашины				Среднее значение по цеху
	1	2	3	4	
2005	402	482		697	527
2006	349	—	1140	—	745
2007	—	1002	—	450	726
2008	824	—	590	294	569
2009	268	622	—	372	421
2010	533	—	631	300	488
2011	—	—	249	137	304
2012	—	912	90	112	371
2013	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.
2014	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.
2015	461	213	264	389	332
2016	243	232	169	339	246
2017	Н. д.	187	151	122	153
2018	282	122	66	72	136
2019	389	207	177	190	241
2020*	317÷356	181÷315	90÷166	90÷320	289
2021*	120÷256	45÷327	75÷314	76÷284	295

Примечание: Экспертная оценка работников цеха.

ты за этот период не претерпел существенных изменений, но начиная с 2009 по 2019 г. в состав шихты вводили частицы горячбрикетированного железа, а с 2012 по 2019 г. вводили отсева окатышей Лебединского горно-обогатительного комбината. Сроки службы роторов эксгаустеров приведены в табл. 2.

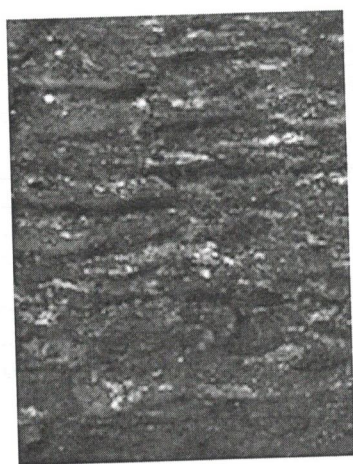
Анализ показал, что до введения в агломерационную шихту частиц брикетированного железа и отсева окатышей стойкость роторов эксгаустеров в 2008–2010 гг. составляла в среднем два года, в 2009–2011 гг. стойкость роторов снизилась до одного года, а при введении брикетированного железа и отсева окатышей за 2012–2019 гг. их стойкость снижалась до 66 сут. Это можно объяснить тем, что частицы горячбрикетированного железа обладают низкой комкуемостью и повышенной абразивностью.

Для повышения стойкости роторов эксгаустеров можно применить следующее:

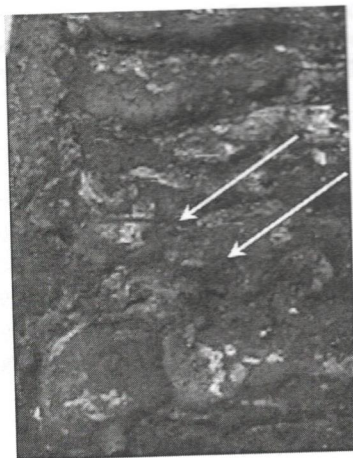
повысить эффективность окомкования агломерируемой шихты [1–3, 8–12];

снизить запыленность поступающих в эксгаустер агломерационных газов совершенствованием технологии агломерационного производства и повышением эффективности очистки газа в батарейных циклонах [1–4];

усовершенствовать конструкцию ротора [5, 6] и технологию его восстановления, включая выбор материала с учетом условий эксплуатации [13–18].



а)



б)



в)

Дефекты наплавленного металла: несплавление (а), трещины (б), коробление (в)

Вышеперечисленные мероприятия по снижению изнашивания роторов эксгаустеров позволяют продлить срок их службы, однако не устраняют такие последствия изнашивания, как снижение эксплуатационных показателей роторов. Поэтому для агломерационного производства остается актуальной разработка эффективного восстановления изношенных лопаток роторов эксгаустеров. Причем материал для восстановления деталей наплавкой и технологию восстановления необходимо подбирать с учетом условий эксплуатации конкретных эксгаустеров, т. е. состава абразива и условий изнашивания.

В настоящее время в АО "Уральская Сталь" ремонт роторов эксгаустеров выполняют двумя способами: ручной электродуговой наплавкой (РДН) и ручной полуавтоматической наплавкой с использованием сварочных проволок Св08Г2С и ASM-550А, которые используют и в единичном производстве для восстановления деталей сложной конфигурации. Данная технология позволяет наплавлять детали сложных форм в труднодоступных местах, однако имеет существенные недостатки — высокую трудоемкость и малую производительность.

При ручной наплавке в наплавленном металле возникают дефекты из-за неправильного выбора

или нарушения режима обработки, некачественной подготовки перед наплавкой, особенностей структуры металла подложки или низкой квалификации исполнителей.

Для оценки эффективности применяемой технологии восстановления лопаток эксгаустера были изучены образцы наплавленных покрытий и выявлены дефекты — несплавления, трещины и коробление (рисунок).

Несплавление является концентратором напряжений и причиной возникновения микротрещин, трещины, возникающие в результате термического воздействия, снижают ресурс детали, коробление наплавленных поверхностей становятся причиной возникновения неравномерных термических напряжений, поэтому к квалификации исполнителей восстановления деталей наплавкой предъявляются повышенные требования.

Химические составы присадочных материалов, используемые при восстановлении лопаток эксгаустера и обеспечивающие твердость наплавленного металла не менее 66 HRC и низкое коробление наплавленных поверхностей, приведены в табл. 3.

Наплавку разных покрытий выполняли на стальных образцах из стали 30ХГСА с размерами 100 × 100 × 10 мм, высота наплавленного валика со-

Таблица 3

Химические составы присадочных материалов (основной Fe), %

Материал	C	Cr	V	Mn	Si	B	Ti
T-620	3,0÷3,4	20,0÷25,0	—	1,0÷1,4	2,0÷2,5	1,0÷1,8	1,0÷1,4
EWC CW6082-OA	4,0÷5,2	29,0÷33,1	—	1,2÷1,8	0,8-1,5	—	—
PLASMOTEC 29	2,0÷3,9	24,0÷30,0	3,0÷6,0	0,4÷1,0	0,2±0,6	—	—
Castolin XHD 6710	0,49	0,6	—	0,42	0,2	—	—
ASM-570A	0,8	20	—	2,0	1	—	—

Таблица 4

Потери масс  $\Delta m$  роторов с разными покрытиями, г

Образец (покрытие)	Ротор агломашины				$\Delta m_{\text{ср}}$	$J$
	1	2	3	4		
Без покрытия (эталон)	0,1281	0,1253	0,1313	0,1278	0,1281	—
С покрытием 1 (Castolin XHD 6710)	0,0681	0,0664	0,0679	0,0676	0,0675	1,89
С покрытием 2 (п/авт. ASM-570A)	0,0627	0,0621	0,0620	0,0628	0,0624	2,05
С покрытием 3 (T-620)	0,0726	0,0735	0,0729	0,0755	0,0736	1,74
С покрытием 4 (EWC CW6082-OA)	0,0591	0,061	0,0589	0,0594	0,0596	2,15
С покрытием 5 (PLASMOTEC 29)	0,0475	0,0503	0,0478	0,0515	0,0493	2,60

Примечание:  $J$  — относительная износостойкость.

ставляла 2÷4 мм. Перед наплавкой изношенный и поврежденный слой удаляли.

Образцы с наплавленными покрытиями испытывали на износостойкость с использованием двух методов: испытание материала на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные

частицы (ГОСТ 23.208—79) и испытание материала на газоабразивное изнашивание (ГОСТ 23.201—78).

За эталонный принят образец из стали 30ХГСА, из которой изготовлены лопатки роторов эксгаустеров.

Результаты испытаний образцов по ГОСТ 23.208—79 с разными покрытиями, т. е. потери масс образцов  $\Delta m$  за испытание по каждому ротору, среднее значение потери массы  $\Delta m_{\text{ср}}$  и относительная износостойкость  $J$  представлены в табл. 4.

Результаты испытаний образцов по ГОСТ 23.201—78 с разными покрытиями, включающие массу  $m_1$  образца до испытания, массу  $m_2$  после испытания и коэффициент  $J_{\text{г.и}}$  газоабразивной износостойкости с учетом средней потери  $\Delta m_{\text{ср}}$  массы при разных углах атаки, представлены в табл. 5.

Кроме этого, измеряли твердость наплавленных покрытий (табл. 6).

Испытаниями установлено, что практически при любых углах атаки износостойкость при газоабразивном изнашивании всех покрытий почти вдвое превосходит износостойкость эталонного образца, т. е. восстановление лопаток эксгаустеров наплавкой значительно продлевает их ресурс. Это подтверждается результатами и других исследований [14, 20—22].

Образец с покрытием PLASMOTEC 29 имеет наибольшую износостойкость по сравнению с эталонным — превышает более чем в 2,6 раза. Покрытие PLASMOTEC 29 представляет собой высокоуглеродистый сплав на железной основе с системой легирования Fe—C—Cr—V, твердость образца с покрытием составила 68 HRC.

Образцы с покрытием, наплавленные проволокой EWC CW602-OA, также показали высокую износостойкость (в 2,15 раза выше эталонного). Данный наплавочный материал с системой легирования Fe—C—Cr—Mn—V позволяет получать в

Таблица 5

Значения параметров при испытании разных образцов на износостойкость газоабразивным изнашиванием, г

Образец (покрытие)	Параметр	Угол атаки				$J_{\text{г.и}}$
		10°	40°	70°	90°	
Сталь 30ХГСА без покрытия	$m_1$	0,0097	0,0528	0,0881	0,0853	1
	$m_2$	0,0114	0,0535	0,0888	0,0860	
	$\Delta m_{\text{ср}}$	0,0111	0,0531	0,0884	0,0857	
С покрытием 1 (Castolin XHD 6710)	$m_1$	0,0082	0,0321	0,0537	0,0518	1,64
	$m_2$	0,0079	0,0319	0,0532	0,0515	
	$\Delta m_{\text{ср}}$	0,0080	0,0320	0,0534	0,0516	
С покрытием 2 (п/авт. ASM-570A)	$m_1$	0,0061	0,0314	0,0496	0,0480	1,76
	$m_2$	0,0065	0,0322	0,0494	0,0470	
	$\Delta m_{\text{ср}}$	0,0063	0,0318	0,0495	0,0475	
С покрытием 3 (T-620)	$m_1$	0,0090	0,0339	0,0561	0,0538	1,55
	$m_2$	0,0088	0,0344	0,0568	0,0547	
	$\Delta m_{\text{ср}}$	0,0089	0,0342	0,0565	0,0542	
С покрытием 4 (EWC CW6082-OA)	$m_1$	0,0058	0,0292	0,0427	0,0401	2,01
	$m_2$	0,0055	0,0295	0,0429	0,0407	
	$\Delta m_{\text{ср}}$	0,0057	0,0294	0,0428	0,0404	
С покрытием 5 (PLASMOTEC 29)	$m_1$	0,0053	0,0268	0,0399	0,0389	2,16
	$m_2$	0,0049	0,0259	0,0393	0,0387	
	$\Delta m_{\text{ср}}$	0,0051	0,0264	0,0396	0,0388	

Таблица 6

Твердость разных образцов

Наплавка	Материал	HRC	Примечание
1. Ручная дуговая	Castolin XHD 6710 ASM-570A	59	Базовая технология
2. Дуговая в среде CO <sub>2</sub>		63	
3. Ручная дуговая	T-620	57	Опытные варианты
4. Дуговая в среде CO <sub>2</sub>	EWC CW6082-OA	66	
5. Плазменная	PLASMOTEC 29	68	
Примечание: HRC — среднее значение по пяти замерам.			

матрице наплавленного металла твердые сложные карбиды высокой стойкости к истиранию.

Исследования показали, что ручная дуговая наплавка электродами с основным покрытием и легированным сердечником наиболее рациональное и универсальное решение для восстановления таких деталей, как лопатки эксгаустера.

Наилучшее повышение стойкости роторов обеспечивает плазменно-порошковая наплавка, позволяющая уже в первом наплавленном слое получать покрытия заданного химического состава, что экономит расход наплавочных материалов. Применение наплавочного порошка PLASMOTEC 29 позволяет более чем в 2 раза повысить износостойкость деталей.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Коротич В. И., Фролов Ю. А., Бездежский Г. Н.** Агломерация рудных материалов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. 400 с.

2. **Пузанов В. П., Кобелев В. А.** Введение в технологии металлургического структурообразования. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 501 с.

3. **Фролов Ю. А.** Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология. М.: Металлургия, 2016. 672 с.

4. **Suprunenko R. S., Pritykin D. P., Teverovskii B. Z.** Extending the period of service of the rotors of the exhaust fans for the sintering machines // Metallurgist. 1966. Vol. 10. P. 198–199. doi.org/10.1007/BF00735137.

5. **Лавошник А. С., Дамрин В. Я.** Повышение ресурса стойкости роторов эксгаустеров в эксплуатационных условиях агломерационного производства // Экология и промышленность. 2013. № 3 (36). С. 39–45.

6. **Повышение** наработки роторов эксгаустеров в агломерационном производстве / В. Д. Мантула, А. С. Лавошник, А. В. Шапаренко и др. // Сталь. 2013. № 11. С. 71–78.

7. **Юзвенко Ю. А., Тарашенко А. Ф., Гавриш В. А.** Абразивность колошниковой пыли доменных печей // Сталь. 1969. № 8. С. 683–684.

8. **Повышение** эффективности процесса агломерации при окомковании шихты с использованием ПАВ / Н. А. Майстренко, Е. В. Овчинникова, А. Н. Шаповалов, И. С. Берсенев // Сталь. 2016. № 1. С. 12–15.

9. **Application** of new surfactants sintering agglomerate / A. N. Shapovalov, R. R. Dema, S. P. Nefedyev et al. // Journal of chemical technology and metallurgy. 2017. Т. 52. № 5. С. 1008–1016.

10. **Effect** of three different binders and pellet feed on granulation behaviour of sintering mixtures / F. M. Linhares, C. F. Victor, L. R. Lemos, M. C. Bagatini // Ironmaking & Steelmaking. 2020. Vol. 47 (9). P. 991–997.

11. **Examining** the effects of liquid–powder binder concentration on the cohesion and friction of a granular bed / H. Zhou, M. W. Dahri, M. Zhou, Z. Lai // Particulate Science and Technology. 2020. N. 39 (7). P. 832–843.

12. **Женин Е. В., Шаповалов А. Н.** Влияние температуры воды на результаты окомкования, показатели агломерационного процесса и качество агломерата // Черные металлы. 2024. № 7 (1111). С. 24–29.

13. **Клейс И. Р.** Основы выбора материалов для работы в условиях газоабразивного изнашивания // Трение и износ. 1980. № 2. С. 263–271.

14. **Шумилов А. А., Штанько П. К., Гордиенко В. Н.** Разработка наплавочных материалов для повышения износостойкости деталей тягодутьевых машин тепловых электростанций // Вестник СевНТУ. 2010. № 110. С. 216–218.

15. **Nefed'ev S. P., Romanenko D. N., Artemenko Yu. A.** Physical modeling of the mechanism of modification with wear-resistant surfacing // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 52. N. 11, 12. P. 769–773.

16. **Shapovalov A. N., Kalugina O. B., Dema R. R.** Investigation of the structure of wear resistant coatings obtained by plasma powder surfacing // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 129. P. 02044. DOI: 10.1051/mateconf/201712902044.

17. **Wear** of the working bodies of the exhauster from low-alloy steels and reinforced coatings to increase wear resistance / A. Yusupov, B. Yusupov, Z. Ermatov, N. Dunyashin // Machine building. 2022. P. 95–100.

18. **Al-Samarai R. A., Al-Douri Y.** Surface protection from wear through coating: Friction and wear in metals // Materials horizons: from nature to nanomaterials. Singapore: Springer. 2024. doi.org/10.1007/978-981-97-1168-0\_5.

19. **Пат. на полезную модель 123524 Рос. Федерации:** Установка для исследования газоабразивного изнашивания.

20. **Коротков В. А.** Опыт промышленной наплавки лопаток роторов нагнетателей // Промышленная энергетика. 2017. № 4. С. 36–39.

21. **Опыт** внедрения технологий восстановления на ведущих предприятиях Урала / В. А. Коротков, И. Д. Михайлов, А. М. Веснин, А. С. Зотов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 10. С. 33–36.

22. **Продление** эксплуатационного ресурса тягодутьевых машин с применением технологии защиты поверхности от износа / В. Л. Луканин, Е. В. Удалова, В. Н. Васильев, С. А. Васильев // Тяжелое машиностроение. 2016. № 9. С. 7–10.

Статья поступила в редакцию 18.02.2025;  
одобрена после рецензирования 12.03.2025;  
принята к публикации 17.03.2025.