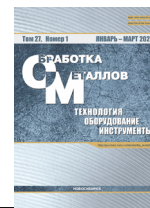




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Повышение эксплуатационных свойств деталей из серого чугуна с помощью ионной имплантации

Ольга Усанова^{1, a}, Анна Рязанцева^{1, b, *}, Марина Вахрушева^{2, c}, Марина Модина^{3, d}, Юлия Кузнецова^{3, e}

¹ Московский политехнический университет, ул. Б. Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия

² Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, г. Братск, 665709, Россия

³ Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, пр. Ленина, 93, г. Новороссийск, 353924, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4399-5074>,  olus2000@mail.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-6558-3089>,  rav300576@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-6118-9527>,  mvahr@yandex.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-2482-5472>,  marishamodina@yandex.ru;

^e  <https://orcid.org/0000-0002-1388-6125>,  julx@bk.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.787.4:669.13

История статьи:

Поступила: 30 сентября 2024

Рецензирование: 19 октября 2024

Принята к печати: 21 ноября 2024

Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:

Ионная имплантация

Микроструктура

Микродюрометрический анализ

Фазовый состав

Рентгеноструктурный анализ

АННОТАЦИЯ

Введение. Существует широкий спектр методов для улучшения свойств чугуна при помощи разнообразных технологий. Пример таких методов – нанесение защитного покрытия TiN, нормализация чугуна, нанесение диффузионных карбидсодержащих покрытий и др. Однако эти методы имеют недостатки: изменение размеров после обработки, слабое сцепление покрытия с материалом подложки. В нашей работе мы рассмотрели один из наиболее перспективных и современных методов – ионную имплантацию. **Целью работы** является изучение влияния имплантации с различными дозами ионов азота (для определения оптимального режима) для изменения поверхностных и механических свойств чугуна. **Методы.** Образцы чугуна были имплантированы ионами азота различными дозами для выбора наиболее оптимального режима (оптимальной дозы имплантированных ионов азота как нитридообразующего элемента). Исследована микроструктура поверхности образцов чугуна после обработки с помощью сканирующего электронного микроскопа «Стереоскан S-180» при увеличении 2900, 5000 крат. Выполнен микродюрометрический анализ образцов с помощью металлографического микроскопа Neophot-2, оснащенного приставкой для измерения микротвердости, при нагрузке 10 г после имплантации образцов чугуна различными дозами ионов азота. Был также осуществлен рентгеноструктурный анализ на дифрактометре ДРОН-3 для определения фазового состава и тонкой структуры модифицированных образцов чугуна. **Результаты и обсуждение.** Ионная имплантация образцов чугуна значительно повышает микротвердость. Так, в результате проведенных исследований установлено, что наилучшие механические свойства (микротвердость) наблюдаются у образцов чугуна после имплантации ионами N^+ с дозой $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² и энергией 40 КэВ. Рентгеноструктурный анализ показал, что в результате имплантации ионами азота образуются нитриты Fe_2N и Fe_3N , а также наблюдаются изменения в тонкой структуре (средняя плотность дислокации и величина блоков мозаики).

Для цитирования: Повышение эксплуатационных свойств деталей из серого чугуна с помощью ионной имплантации / О.Ю. Усанова, А.В. Рязанцева, М.Ю. Вахрушева, М.А. Модина, Ю.С. Кузнецова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 143–154. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-143-154.

Введение

Чугун обладает рядом свойств, делающих его незаменимым при изготовлении различных деталей [1], например поршневых колец, втулок, деталей турбин и др. Прочностные свойства дают возможность его использования для изготовления элементов, которые подвергаются

большим нагрузкам, и деталей, выдерживающих воздействие воды и пара. Однако существует проблема улучшения поверхностных свойств чугуна (износостойкости, коррозионной стойкости и др.).

Существует множество способов дополнительно улучшить свойства чугуна с помощью различных технологий [2–4], таких как нанесение защитного покрытия нитрида титана [5], нормализация чугуна [6], нанесение диффузионных карбидсодержащих покрытий [7] и др. Однако у этих методов есть недостаток: плохое

*Адрес для переписки

Рязанцева Анна Владимировна, к.т.н., доцент
Московский политехнический университет,
ул. Б. Семеновская, 38,
107023, г. Москва, Россия

Тел.: +7 967 114-12-30, e-mail: rav300576@mail.ru

сцепление покрытия с материалом подложки (чугуном) [8–10].

Для улучшения свойств чугуна и усиления его поверхности, а также для создания качественного сцепления между поверхностным слоем и основным материалом предлагается применить метод ионной имплантации [11–13]. Ионная имплантация – это технология, которая позволяет изменять свойства материалов, «бомбардируя» их поверхность высокоэнергетическими ионами. В случае чугуна в качестве «снарядов» используются ионы различных элементов, которые встраиваются в его поверхностный слой. В результате ионной имплантации образуется не просто покрытие, а глубоко измененный сплав с переменным составом. Этот сплав отличается от обычных покрытий отсутствием четкой границы между исходным материалом и модифицированным слоем. Вместо резкого перехода мы видим плавное изменение состава и свойств в глубину материала. Такое плавное изменение состава дает возможность достигать более равномерного распределения улучшенных свойств по глубине модифицированного слоя. Исследования показывают, что толщина такого измененного слоя может достигать 150...200 мкм, что делает ионную имплантацию отличным инструментом для повышения износостойкости и прочности деталей [14, 15].

Использование метода ионной имплантации обеспечивает улучшение механических свойств материала, увеличивая его твердость, прочность и износостойкость. Этот процесс также способствует улучшению адгезии между поверхностным слоем и основным материалом, что повышает стойкость к коррозии и воздействию внешних факторов [16–18]. Ионная имплантация широко применяется в промышленности для модификации свойств различных материалов, таких как различные стали и сплавы, включая чугун. Этот метод является эффективным способом улучшения качества поверхности и общих характеристик материала, что делает его привлекательным для использования в различных отраслях, где требуется повышение износостойкости, твердости, усталостной прочности, коррозионной стойкости и других поверхностных свойств материалов [19–22].

Ионная имплантация, несмотря на свою эффективность, не лишена определенных сложно-

стей. Одна из ключевых проблем заключается в непредсказуемости ее результатов. В отличие от других методов обработки материалов, где влияние параметров на свойства легко моделируется, ионная имплантация характеризуется значительной вариабельностью результатов. Это обусловлено тем, что в процессе имплантации ионы взаимодействуют с материалом на атомном уровне, а их поведение под воздействием разных условий может быть довольно сложным. До сих пор не существует универсальной модели, которая бы полностью описывала механизм упрочнения от ионной имплантации и позволяла с точностью предсказывать результат. Часто оказывается, что ионы ведут себя не в соответствии с предполагаемыми закономерностями, что приводит к необходимости тщательной экспериментальной проверки каждого конкретного случая [23]. Однако необходимо отметить, что успешность процесса зависит от технологических параметров, таких как доза и энергия ионов. Несмотря на сложности, связанные с предсказуемостью и результатами процесса, ионная имплантация остается важным методом для улучшения свойств материалов и создания новых функциональных поверхностей. Важно правильно выбирать технологические параметры для достижения желаемых результатов и дальнейшего применения этого метода [24, 25].

Для решения проблемы упрочнения поверхностного слоя чугунных изделий и деталей необходимо провести предварительные исследования, которые покажут закономерности формирования структуры и свойств имплантированных поверхностей. **Целью данной работы** стало определение технологических параметров обработки поверхности заготовок из чугуна с помощью ионной имплантации (оптимальной дозы излучения и энергии пучка), позволяющих повысить прочностные свойства поверхностного слоя. Для достижения поставленной цели были решены следующие *задачи*.

1. Определен оптимальный режим ионной имплантации азота в серый чугун, установлена оптимальная доза излучения и энергия пучка для достижения максимальной прочности поверхностного слоя.

2. Изучено влияние ионной имплантации на микроструктуру серого чугуна. Проведен анализ изменений в микроструктуре, таких как раз-

дробление перлитных колоний, формирование диффузионного слоя и выгорание графитовых включений.

3. Проведена оценка изменения микротвердости поверхности чугуна после имплантации. Определена зависимость микротвердости от дозы имплантации и анализ ее распределения по глубине модифицированного слоя.

4. Определен фазовый состав и тонкая структура имплантированного слоя. Идентифицированы фазы, образующиеся в результате имплантации. Проведен анализ изменений в средней плотности дислокаций и величине блоков мозаики.

Методика исследований

Исследование микроструктуры опытного чугуна

Микроструктуру имплантированного серого чугуна (типа СЧ20 перлитной структуры, химический состав приведен в табл. 1) изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа «Стереоскан S-180» с разрешающей способностью до $60 \text{ \AA}$ на образцах $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}$ (рис. 1) после травления в 3%-й HNO_3 . Образцы были вырезаны в направлении, перпендикулярном имплантированному слою, и исследовались при увеличении $\times 2900, 5000$.

Таблица 1

Table 1

Состав чугуна
The composition of cast iron

Элемент	C	Si	Mn	Cr	P	S
Процентное содержание, %	3,45	2,2	0,8	0,32	0,1	0,12

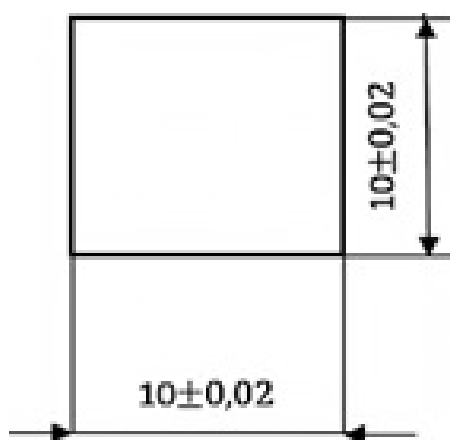


Рис. 1. Схема образца серого чугуна

Fig. 1. Gray cast iron sample diagram

Исследование чугуна после имплантации методом микродюрометрии

Для дюрOMETрических исследований использовали образцы, полученные при трех режимах обработки (с дозами 10^{17} , $2 \cdot 10^{17}$ и $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² и с энергией имплантации 40 КэВ). Исследования проводили на приборе Neophot-2 (нагрузка составляла 10 г).

Микротвердость измеряли в направлении от имплантированной поверхности к центру на образцах, вырезанных перпендикулярно имплан-

тированному слою. Значения микротвердости по глубине слоя определялось как среднее арифметическое пяти измерений.

Исследование фазового состава поверхности чугуна после имплантации

Рентгеноструктурные исследования выполнялись на дифрактометре ДРОН-3. Рентгеновский анализ проводился в излучении $\text{CoK}\alpha$.

Известно, что собственно имплантированный слой в толщину составляет всего около $1000 \text{ \AA}$ [26–28]. Помимо специально применимых приборов съемки, задачу фазового анализа облегчило и то обстоятельство, что самые интенсивные линии фаз, ожидаемых в имплантированных слоях (нитриды, карбиды и др.), находятся в диапазоне малых углов отражения. В силу геометрии съемки на малых углах рентгеновские лучи проходят в поверхностном слое более длинный путь, чем на углах, близких к 90° , за счет чего увеличивается отражающий объем образующихся фаз.

Несмотря на то что интенсивность дифракционных линий фаз в имплантированных слоях во много раз меньше интенсивностей линий матрицы, удалось провести идентификацию фаз.

Результаты и их обсуждение

Микроструктура опытного чугуна

Микроструктура имплантированных металлов и сплавов контролируется процессами, протекающими в любом пересыщенном твердом растворе, и специфическими эффектами, характерными для имплантированной поверхности металла.

В результате ионной имплантации происходит не просто нанесение поверхностного покрытия, а глубокое изменение структуры материала. Вместо четкой границы между новым слоем и исходным материалом, как это бывает при обычном напылении, образуется переходная зона. В этой зоне состав материала постепенно меняется от исходного чугуна к модифицированному слою, обогащенному атомами азота. Этот изменяющийся состав создает градиент свойств, где твердость и другие механические характеристики плавно переходят от исходных значений к улучшенным параметрам, достигнутым благодаря ионной имплантации (рис. 2). Тем не менее из фотографий микроструктуры поверхностного слоя видно, что на поверхности имплантированного образца сформировался диффузионный слой толщиной около 400 мкм. В данном слое практически полностью отсутствуют графитовые включения. Они начинают появляться только в конце этого слоя и в небольшом количестве.

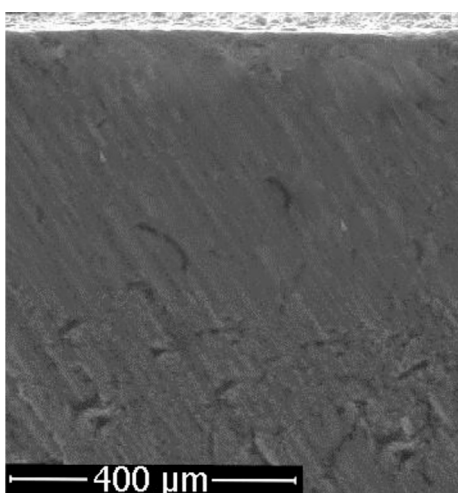


Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя чугуна, имплантированного ионами N^+

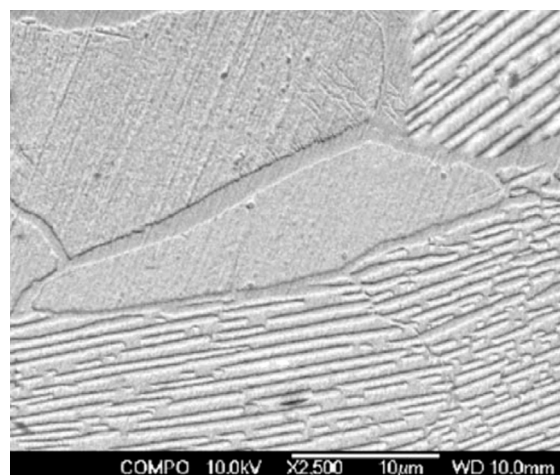
Fig. 2. Microstructure of the surface layer of cast iron implanted with N^+ ions

В структуре серого чугуна происходит выгорание графита под воздействием ионов азота. Подобные результаты были получены и авторами работы [29]. В этой работе азотирование поверхности серого чугуна при других режимах также приводило к выгоранию включений графита в поверхностном слое образцов.

Имплантация ионами азота (N^+) в приповерхностную область серого чугуна приводит к существенным изменениям его микроструктуры. В первую очередь происходит раздробление и разориентация перлитных колоний, которые являются характерной особенностью микроструктуры серого чугуна. Микроструктура имплантированного чугуна представлена на рис. 3.



a



a

Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя чугуна, имплантированного ионами N^+ :

a – $2 \cdot 10^{17}$ ион/см²; б – $1 \cdot 10^{17}$ ион/см²

Fig. 3. Microstructure of the surface layer of cast iron implanted with N^+ ions:

a – $2 \cdot 10^{17}$ ion/cm²; б – $1 \cdot 10^{17}$ ion/cm²

Изменения в микроструктуре поверхностного слоя после ионной имплантации имеют решающее значение для определения различных свойств поверхности (микротвердости, износостойкости и др.).

Микродюриметрический анализ чугуна после имплантации

Микродюриметрический анализ показал, что в результате ионной имплантации происходит повышение микротвердости (табл. 2, рис. 4, 5, 6).

Из табл. 2 и графиков (рис. 4, 5, 6) видно, что твердость у поверхности существенно возрастает и при удалении от поверхности постепенно

понижается до 2500 МПа. Снижение происходит до значения, характерного для исходного состояния, до имплантации.

Таким образом, максимальное значение микротвердости поверхности наблюдается у образцов после имплантации ионами азота с дозой $5 \cdot 10^{17}$ ион/см². Следовательно, это является оптимальной дозой ионной имплантации для образцов чугуна (типа СЧ20), что показано при данных условиях исследований.

Увеличение микротвердости в приповерхностном слое связано с образованием в нем большого количества специфических радиационных дефектов – таких как, например, пары Френкеля,

Т а б л и ц а 2

Table 2

Результаты микродюриметрического анализа чугуна после имплантации

Results of microdurometry analysis of cast iron after implantation

Доза излучения, ион/см ²	Значение твердости, МПа
0	2500
10^{17}	18 500
$2 \cdot 10^{17}$	20 500
$5 \cdot 10^{17}$	24 000

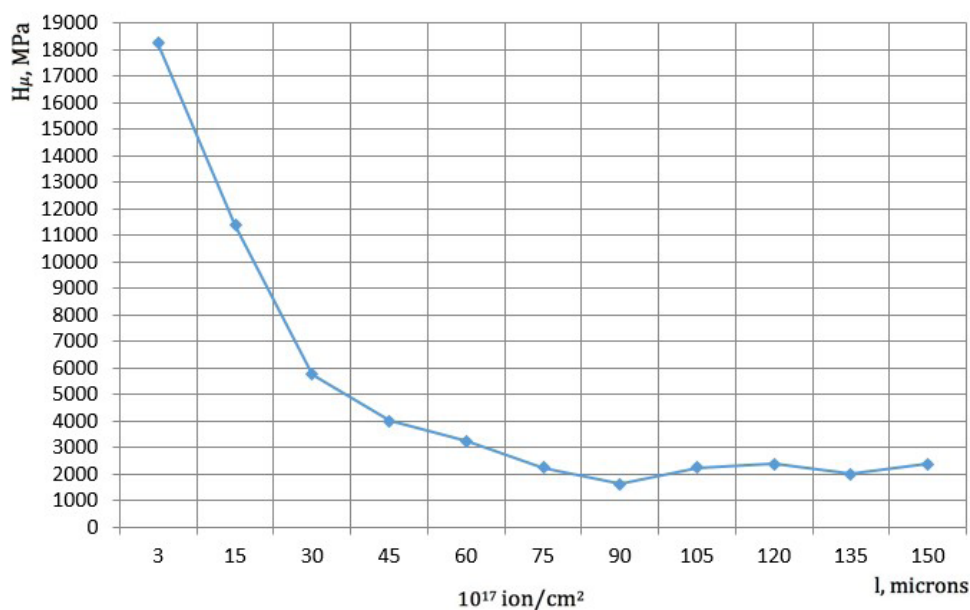


Рис. 4. Изменение микротвердости чугуна, имплантированного ионами азота с дозой 10^{17} ион/см²

Fig. 4. Change in microhardness of cast iron implanted with nitrogen ions at a dose of 10^{17} ion/cm²

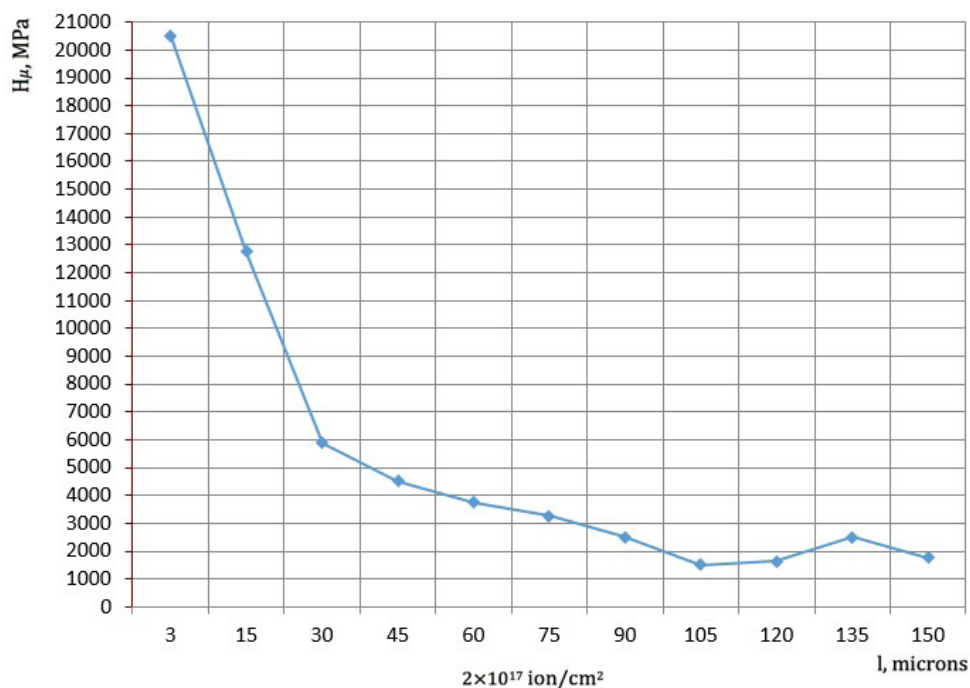


Рис. 5. Изменение микротвердости чугуна, имплантированного ионами азота с дозой $2 \cdot 10^{17}$ ион/см²

Fig. 5. Change in microhardness of cast iron implanted with nitrogen ions at a dose of $2 \cdot 10^{17}$ ion/cm²

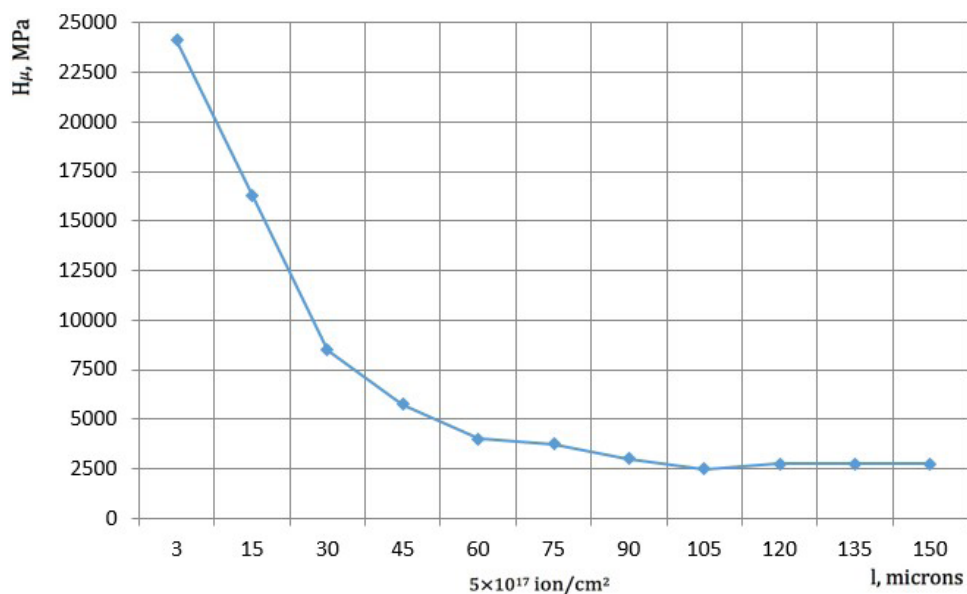


Рис. 6. Изменение микротвердости чугуна, имплантированного ионами азота с дозой $5 \cdot 10^{17}$ ион/см²

Fig. 6. Change in microhardness of cast iron implanted with nitrogen ions at a dose of $5 \cdot 10^{17}$ ion/cm²

и образуемых фаз, в данном случае нитридов, которые, как известно, имеют высокое значение твердости (микротвердости).

Анализируя полученные данные о твердости поверхностного слоя образцов и данные, полученные по результатам микроструктурного

анализа (при различных мощностях излучения), можно увидеть, что толщина имплантированного слоя азота в наших образцах из серого чугуна напрямую зависит от дозы имплантации. Чем больше доза излучения, тем шире слой. Однако зависимость не носит линейный характер.

По-видимому, с увеличением дозы имплантации толщина слоя может достичь насыщения, когда все доступные междоузлия в кристаллической решетке железа будут заполнены атомами азота. Так, рост твердости для имплантированного слоя при мощности $1 \cdot 10^{17}$ ион/см² начинается примерно с 75 мкм от поверхности, для $2 \cdot 10^{17}$ ион/см² – с 90 мкм от поверхности, для $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² – также примерно с 90...100 мкм от поверхности. Аналогичная картина наблюдается и для твердости ближайшего к поверхности слоя. Увеличение мощности излучения с 10^{17} до $2 \cdot 10^{17}$ ион/см² дало прирост твердости примерно на 2000 МПа. Дальнейшее увеличение мощности излучения с $2 \cdot 10^{17}$ до $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² дало прирост твердости этого слоя уже на 3500 МПа.

Результаты рентгеноструктурного анализа

Рентгеновский анализ проводился для определения фазового состава и изучения тонкой структуры (средняя плотность дислокаций и величина блоков мозаики). Этот анализ продемонстрировал, что при ионной имплантации азота в серый чугун происходит образование новых фаз. Ионы азота, проникая в материал, вступают в химические реакции с атомами железа (Fe), составляющими матрицу чугуна. В результате этих взаимодействий образуются нитриды железа. Среди них преобладает фаза Fe₃N, нитрид железа (III). Кроме нее в меньшем количестве присутствует нитрид железа (II) – Fe₂N. Образование этих нитридов является следствием процесса ионной имплантации и оказывает существенное влияние на свойства поверхностного слоя чугуна, увеличивая его твердость и износостойкость.

Увеличение дозы N⁺ с 10^{17} до $2 \cdot 10^{17}$ не приводит к изменению фазового состава.

Исследования также показали, что после имплантации величина блоков мозаики (О.К.Р.) уменьшается по сравнению с исходным необработанным состоянием. Причем наибольшее выраженное уменьшение наблюдается у образцов после имплантации с дозой $2 \cdot 10^{17}$ ион/см² (табл. 3).

Ионная имплантация азотом вносит существенные изменения в структуру чугуна, в его приповерхностный слой. Одним из ключевых изменений является повышение плотности дислокаций в этом слое по сравнению с исходным материалом, который не подвергался обработке. Дислокации, являющиеся дефектами кристаллической решетки, влияют на механические свойства материалов. Их повышенная концентрация, обусловленная ионной имплантацией, приводит к увеличению твердости и прочности. Это подтверждается наблюдениями, показывающими, что самая высокая средняя плотность дислокаций наблюдается именно у образцов, имплантированных с наибольшей дозой азота – $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² (табл. 3). Важно отметить, что именно эта доза признана оптимальной в настоящем исследовании, так как она обеспечивает наиболее эффективное повышение прочностных свойств без ухудшения других характеристик.

Таким образом, рентгеноструктурный анализ показал, что после имплантации ионами азота происходит повышение средней плотности дислокаций и уменьшение величины блоков мозаики, что в конечном итоге объясняет улучшение поверхностных свойств образцов данного вида чугуна.

Таблица 3

Table 3

Результаты рентгеноструктурного анализа образцов до и после имплантирования ионами N⁺

Results of X-ray diffraction analysis of samples before and after implantation with N⁺ ions ions

Тип чугуна	Мощность излучения, ион/см ²	О.К.Р. (D ± ΔD) см · 10 ⁻⁴	Средняя плотность дислокации (ρ ± Δρ) · 10 ⁹ , см ⁻²	Фазовый состав
СЧ	0 (исходный образец)	2,0 ± 0,12	0,75 ± 0,5	α-Fe
	10 ¹⁷ ион/см ²	1,5 ± 0,08	1,3 ± 0,1	α-Fe, Fe ₃ N, Fe ₂ N
	2 · 10 ¹⁷ ион/см ²	0,9 ± 0,03	3,7 ± 0,6	α-Fe, Fe ₃ N, Fe ₂ N
	5 · 10 ¹⁷ ион/см ²	0,6 ± 0,03	4,8 ± 0,6	α-Fe, Fe ₃ N, Fe ₂ N

Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что ионная имплантация азотом является эффективным методом повышения прочностных свойств деталей из серого чугуна.

1. По итогам работы показано, что оптимальным режимом имплантации в условиях настоящего исследования является доза $5 \cdot 10^{17}$ ион/см². При этой дозе наблюдается максимальное повышение микротвердости, достигающее 24 000 МПа, что значительно превосходит исходное значение (2500 МПа).

2. Ионная имплантация приводит к существенным изменениям в микроструктуре чугуна. Образуется диффузионный слой толщиной около 400 мкм, в котором практически отсутствуют графитовые включения. Происходит раздробление и разориентация перлитных колоний, характерных для исходной структуры серого чугуна.

3. В результате имплантации азота изменяется фазовый состав поверхностного слоя, формируются нитриды Fe₂N и Fe₃N. Наблюдается увеличение средней плотности дислокаций и уменьшение величины блоков мозаики.

Таким образом, применение ионной имплантации азота с оптимальной дозой позволяет получить упрочненный слой на поверхности чугуна с сохранением заданных размеров деталей. Полученные результаты открывают возможности для практического применения ионной имплантации в промышленности с целью повышения долговечности и надежности деталей из серого чугуна, используемых в различных областях техники.

Список литературы

1. Production of workpieces from martensitic stainless steel using electron-beam surfacing and investigation of cutting forces when milling workpieces / N.V. Martyushev, V.N. Kozlov, M. Qi, V.S. Tynchenko, R.V. Kononenko, V.Yu. Konyukhov, D.V. Valuev // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – P. 4529. – DOI: 10.3390/ma16134529.
2. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings / E.A. Zverev, V.Yu. Skeeba, N.V. Martyushev, P.Yu. Skeeba // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 736. – P. 132–137. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.132.
3. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: methodologi-

cal aspect // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1040. – P. 912–916. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912.

4. The resource efficiency assessment technique for the foundry production / I.G. Vidayev, N.V. Martyushev, A.S. Ivashutenko, A.M. Bogdan // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 880. – P. 141–145. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141.

5. Usanova O.Yu., Ryazantseva A.V., Kolishchak L.M. Investigation of the effect of ion implantation on tribotechnical characteristics of cast iron // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – Vol. 2373 (2). – P. 022029. – DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022029.

6. Влияние ионной имплантации на свойства чугуна, используемого в конструкциях горнодобывающих машин и аппаратов / О.Ю. Усанова, А.В. Рязанцева, О.Б. Сенникова, С.Д. Корнеев // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 912–920. – DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-912-920.

7. Ni-hard-class cast irons, prospects for their improvement / A. Issagulov, M. Ibatov, P. Kovalyov, E. Shcherbakova, A. Dostaeva, S. Arinova // *Труды Университета*. – 2021. – № 2 (83). – С. 47–51. – DOI: 10.52209/1609-1825_2021_2_47.

8. Konyukhov V.Y., Gladkih A.M., Semenov V.V. Measures to the improvement of efficiency of a repair enterprise // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1353. – P. 012046. – DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012046.

9. Method for selecting the location of the clearance fields of the landing surfaces of gear pump parts with a biaxial connection / A.K. Sherov, B. Myrzakhmet, K.T. Sherov, B.N. Absadykov, M.R. Sikhimbayev // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. – 2022. – Vol. 1 (451). – P. 159–166. – DOI: 10.32014/2022.2518-170X.153.

10. 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. – P. 0120123.

11. Improvement of wear and hardness of steel by nitrogen implantation / A.A. Youssef, P. Budzynski, J. Filiks, A.P. Kobzev, J. Sielanko // *Vacuum*. – 2004. – Vol. 77 (1). – P. 37–45.

12. Усанова О.Ю., Столяров В.В., Рязанцева А.В. Исследование свойств ионно-имплантированного титанового сплава с памятью формы, используемого в конструкциях горнодобывающего оборудования // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2022. – Т. 14, № 4. – С. 695–701. – DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-695-701.



13. *Sudjatmoko L.S., Wirjoadi B.S.* Effects of nitrogen ion implantation on hardness and wear resistance of the Ti-6Al-4V alloy // *Jurnal Iptek Nuklir Ganendra = Ganendra Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2015. – Vol. 18 (2). – P. 61–68.

14. *Bosikov I.I., Modina M.A., Khekert E.V.* Analysis of the quality of underground mineral waters of terrigenous deposits of the hauteriv-barremian aquifer of the lower cretaceous // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences* 2024. – Vol. 2. – P. 36–47. – DOI: 10.32014/2024.2518-170X.392.

15. *Ershov V.A., Sysoev I.A., Kondrat'ev V.V.* Determination of aluminum oxide concentration in molten cryolite-alumina // *Metallurgist*. – 2013. – Vol. 57 (3–4). – P. 346–351.

16. Mathematical modeling of thermofrictional milling process using ANSYS WB software / K.T. Sherov, M.R. Sikhimbayev, A.K. Sherov, B.S. Donenbayev, A.K. Rakishev, A.B. Mazdubai, M.M. Musayev, A.M. Abeuova // *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. – 2017. – Vol. 47 (2). – P. 24–33. – DOI: 10.1515/jtam-2017-0008.

17. *Pashkov E.N., Martyushev N.V., Ponomarev A.V.* An investigation into autobalancing devices with multireservoir system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2014. – Vol. 66 (1). – P. 012014. – DOI: 10.1088/1757-899X/66/1/012014.

18. Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when high-energy heating by high-frequency currents / N.V. Plotnikova, V.Yu. Skeebea, R.A. Miller, N.S. Rubtsova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 156 (1). – P. 012022. – DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012022.

19. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling / V.V. Ivancivsky, V.Yu. Skeebea, I.A. Bataev, O.V. Sakha, I.V. Khlebova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 156 (1). – P. 012025. – DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012025.

20. Снижение биокоррозии деталей оборудования, эксплуатируемого в подземных выработках за счет применения детонационного Ti-Cu напыления / У.В. Харченко, В.С. Егоркин, В.В. Сирота, С.В. Зайцев // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2024. – Т. 16, № 1. – С. 336–344. – DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-336-344.

21. *Balovtsev S.V., Merkulova A.M.* Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2024. – № 3. – С. 170–181. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.

22. *Шарипзянова Г.Х., Еремеева Ж.В.* Управление эксплуатационными свойствами порошковых материалов для повышения коррозионной стойкости и износостойкости деталей // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2023. – Т. 15, № 2. – С. 443–449. – DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-443-449.

23. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating Source / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, N.V. Vakhruшев, A.K. Zhigulev // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 712. – P. 105–111. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.

24. Formation and utilization of nanostructures based on carbon during primary aluminum production / V.V. Kondrat'ev, V.A. Ershov, S.G. Shakhrai, N.A. Ivanov, A.I. Karlina // *Metallurgist*. – 2016. – Vol. 60 (7–8). – P. 877–882.

25. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining / V.S. Brigida, V.I. Golik, R.V. Klyuev, L.B. Sabirova, A.R. Mambetalieva, Yu.I. Karlina // *Metallurgist*. – 2023. – Vol. 67 (3–4). – P. 398–408. – DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

26. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing / V.I. Golik, R.V. Klyuev, D.A. Zyukin, A.I. Karlina // *Metallurgist*. – 2023. – Vol. 67 (1–2). – P. 96–103. – DOI: 10.1007/s11015-023-01493-5.

27. 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.

28. *Akst E.R.* Structural and phase transformations in cast irons when implanted into the surface layers of nitrogen ions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 86 (1). – P. 012038. – DOI: 10.1088/1757-899X/86/1/012038.

29. *Мишук Л.Н., Юдина Т.Ю.* Изучение микроструктуры, химического состава и свойств поверхностной зоны высокопрочных чугунов после азотирования // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение*. – 2018. – № 4. – С. 84–90.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Improving the performance characteristics of grey cast iron parts via ion implantation

Olga Usanova^{1, a}, Anna Ryazantseva^{1, b, *}, Marina Vakhrusheva^{2, c}, Marina Modina^{3, d}, Yulia Kuznetsova^{3, e}

¹ Moscow Polytechnic University, 38 B. Semenovskaya str., Moscow, 107023, Russian Federation

² Bratsk State University, 40 Makarenko Str., Bratsk, 665709, Russian Federation

³ Admiral Ushakov Maritime State University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-4399-5074>, olus2000@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-6558-3089>, rav300576@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0002-6118-9527>, mvahr@yandex.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0003-2482-5472>, marishamodina@yandex.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0002-1388-6125>, julx@bk.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 30 September 2024

Revised: 19 October 2024

Accepted: 21 November 2024

Available online: 15 March 2025

Keywords:

Cast iron

Ion implantation

Microstructure

Microradiometric analysis

Phase composition

X-ray diffraction analysis

ABSTRACT

Introduction. Cast iron is a material that is widely used in various industries. It possesses high heat capacity, relatively high hardness, and a number of other physical, mechanical and technological properties. Due to the significant operational stress experienced by the working surfaces of cast iron parts and its frequent exposure to aggressive environments, additional surface treatment is required to enhance wear resistance, corrosion resistance, and other properties. There are many different methods of surface modification. One of the most promising and modern ones is ion implantation with various ions. The **purpose of the work** is thus to study the effect of ion implantation on the surface of cast iron and the resulting changes in its mechanical properties. **Methods.** Cast iron samples were implanted with nitrogen ions of different doses (optimal dose of implanted nitrogen ions as a nitride-forming element). The surface microstructure of cast iron samples was investigated using a scanning electron microscope *Stereoscan S-180* at a magnification of $\times 2,900$ and $\times 5,000$. Microdurometry analysis of the samples was carried out using a *Neophot-2* metallographic microscope equipped with an attachment for measuring microhardness, at a load of 10 g after implantation of cast iron samples with various doses of nitrogen ions. In addition, X-ray diffraction analysis was performed on a *DRON-3* diffractometer to determine the phase composition and fine structure of modified cast iron samples. **Results and Discussion.** Ion implantation of cast iron samples significantly increases microhardness. Thus, the conducted study reveals that the best mechanical properties (specifically microhardness) are observed in cast iron samples after implantation by N^+ ions with a dose of 5×10^{17} ions/cm² with energy of 40 KeV. X-ray diffraction analysis demonstrated that the ion implantation with nitrogen results in the formation of Fe_2N and Fe_3N nitrides, and also revealed changes in fine structure (average dislocation density and size of mosaic blocks).

For citation: Usanova O.Yu., Ryazantseva A.V., Vakhrusheva M.Yu., Modina M.A., Kuznetsova Yu.S. Improving the performance characteristics of grey cast iron parts via ion implantation. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 143–154. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-143-154. (In Russian).

References

1. Martyushev N.V., Kozlov V.N., Qi M., Tynchenko V.S., Kononenko R.V., Konyukhov V.Yu., Valuev D.V. Production of workpieces from martensitic stainless steel using electron-beam surfacing and investigation of cutting forces when milling workpieces. *Materials*, 2023, vol. 16, p. 4529. DOI: 10.3390/ma16134529.
2. Zverev E.A., Skeebe V.Yu., Martyushev N.V., Skeebe P.Yu. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 132–137. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.132.

* Corresponding author

Ryazantseva Anna V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Moscow Polytechnic University,
38 B. Semenovskaya str.,
107023, Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 967 114-12-30, e-mail: rav300576@mail.ru

3. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: methodological aspect. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1040, pp. 912–916. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912.
4. Vidayev I.G., Martyushev N.V., Ivashutenko A.S., Bogdan A.M. The resource efficiency assessment technique for the foundry production. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 141–145. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141.
5. Usanova O.Yu., Ryazantseva A.V., Kolishchak L.M. Investigation of the effect of ion implantation on tribotechnical characteristics of cast iron. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2373 (2), p. 022029. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022029.
6. Usanova O.Yu., Ryazantseva A.V., Sennikova O.B., Korneev S.D. Vliyanie ionnoi implantatsii na svoystva chuguna, ispol'zuemogo v konstruktsiyakh gornodobyvayushchikh mashin i apparatov [Ionic implantation influence on the properties of cast iron used in the structures of mining machines and devices]. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2023, vol. 15 (4), pp. 912–920. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-912-920.
7. Issagulov A., Ibatov M., Kovalyov P., Shcherbakova E., Dostaeva A., Arinova S. Ni-hard-class cast irons, prospects for their improvement. *Trudy Universiteta = University Proceedings*, 2021, no. 2 (83), pp. 47–51. DOI: 10.52209/1609-1825_2021_2_47.
8. Konyuhov V.Y., Gladkih A.M., Semenov V.V. Measures to the improvement of efficiency of a repair enterprise. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1353, p. 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012046.
9. Sherov A.K., Myrzakhmet B., Sherov K.T., Absadykov B.N., Sikhimbayev M.R. Method for selecting the location of the clearance fields of the landing surfaces of gear pump parts with a biaxial connection. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 2022, vol. 1 (451), pp. 159–166. DOI: 10.32014/2022.2518-170X.153.
10. 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, p. 012012.
11. Youssef A.A., Budzynski P., Filiks J., Kobzev A.P., Sielanko J. Improvement of wear and hardness of steel by nitrogen implantation. *Vacuum*, 2004, vol. 77 (1), pp. 37–45.
12. Usanova O.Yu., Stolyarov V.V., Ryazantseva A.V. Issledovanie svoystv ionno-implantirovannogo titanovogo splava s pamyat'yu formy, ispol'zuemogo v konstruktsiyakh gornodobyvayushchego oborudovaniya [Investigation of the properties of ion-implanted shape memory titanium alloy used in the construction of mining equipment]. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2022, vol. 14 (4), pp. 695–701. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-695-701.
13. Sudjatmoko L.S., Wirjoadi B.S. Effects of nitrogen ion implantation on hardness and wear resistance of the Ti-6Al-4V alloy. *Jurnal Iptek Nuklir Ganendra = Ganendra Journal of Nuclear Science and Technology*, 2015, no. 18 (2), pp. 61–68.
14. Bosikov I.I., Modina M.A., Khekert E.V. Analysis of the quality of underground mineral waters of terrigenous deposits of the Hauteriv-Barremian aquifer of the lower cretaceous. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 2024, vol. 2, pp. 36–47. DOI: 10.32014/2024.2518-170X.392.
15. Ershov V.A., Sysoev I.A., Kondrat'ev V.V. Determination of aluminum oxide concentration in molten cryolite-alumina. *Metallurgist*, 2013, vol. 57 (3–4), pp. 346–351.
16. Sherov K.T., Sikhimbaev M.R., Sherov A.K., Donenbayev B.S., Rakishev A.K., Mazdubai A.B., Musayev M.M., Abeuova A.M. Mathematical modeling of thermofrictional milling process using ANSYS WB software. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, vol. 47 (2), pp. 24–33. DOI: 10.1515/jtam-2017-0008.
17. Pashkov E.N., Martyushev N.V., Ponomarev A.V. An investigation into autobalancing devices with multireservoir system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66 (1), p. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/66/1/012014.
18. Plotnikova N.V., Skeebe V.Yu., Miller R.A., Rubtsova N.S. Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when high-energy heating by high-frequency currents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 156 (1), p. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012022.
19. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu., Bataev I.A., Sakha O.V., Khlebova I.V. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 156 (1), p. 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012025.

20. Kharchenko U.V., Egorkin V.S., Sirota V.V., Zaitsev S.V. Snizhenie biokorrozii detalei oborudovaniya, ekspluatiruemogo v podzemnykh vyrabotkakh za schet primeneniya detonatsionnogo Ti-Cu napyleniya [Reducing equipment parts biocorrosion operated in underground minings due to the detonation Ti-Cu spraying application]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2024, vol. 16 (1), pp. 336–344. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-336-344.

21. Balovtsev S.V., Merkulova A.M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*, 2024, no. 3, pp. 170–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.

22. Sharipzyanova G.Kh., Ereemeeva Zh.V. Upravlenie ekspluatatsionnymi svoistvami poroshkovykh materialov dlya povysheniya korrozionnoi stoikosti i iznosostoikosti detalei [Control of the operational properties of powder materials to increase the corrosion resistance and wear resistance of parts]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2023, vol. 15 (2), pp. 443–449. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-443-449.

23. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Vakhrushev N.V., Zhigulev A.K. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating Source. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 712, pp. 105–111. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.

24. Kondrat'ev V.V., Ershov V.A., Shakhrai S.G., Ivanov N.A., Karlina A.I. Formation and utilization of nanostructures based on carbon during primary aluminum production. *Metallurgist*, 2016, vol. 60 (7–8), pp. 877–882.

25. Brigida V.S., Golik V.I., Klyuev R.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Yu.I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. *Metallurgist*, 2023, vol. 67 (3–4), pp. 398–408. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

26. Golik V.I., Klyuev R.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing. *Metallurgist*, 2023, vol. 67 (1–2), pp. 96–103. DOI: 10.1007/s11015-023-01493-5.

27. 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.

28. Akst E.R. Structural and phase transformations in cast irons when implanted into the surface layers of nitrogen ions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 86 (1), p. 012038. DOI: 10.1088/1757-899X/86/1/012038.

29. Mishchuk L.N., Yudina T.Yu. Izuchenie mikrostruktury, khimicheskogo sostava i svoistv poverkhnostnoi zony vysokoprochnykh chugunov posle azotirovaniya [Investigating microstructure, chemical composition and surface layer properties of heavy-duty cast iron after nitriding]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2018, no. 4, pp. 84–90.

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>).