

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74.019:622.73-1:669.1

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-26-31>

## ПОВЫШЕНИЕ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛИТЫХ БРОНЕЙ ИЗ ВЫСОКОМАРГАНЦЕВОЙ СТАЛИ МЕЛЬНИЦЫ ПОЛУСАМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Хабибуллин Ш.М.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** На обогатительных фабриках горной промышленности значительная часть общих затрат на переработку (от 45 до 65%) расходуется на выполнение операций дробления и измельчения, в том числе и на мельничную футеровку. Обеспечение работоспособности измельчительного оборудования в условиях абразивного воздействия руды и круглосуточного режима работы, требует производить периодическую замену изношенной футеровки. Затраты на ее приобретение, доставку и монтаж в течение года составляют десятки миллионов рублей, а простой оборудования, связанный с заменой футеровки, сокращает объемы готовой продукции на сотни миллионов рублей в год. Практическая эффективность мельничных броней импортного производства не всегда подтверждается ожидаемо положительным результатом фактической эксплуатации, и повышением коэффициента использования оборудования (КИО), но их использование обязательно требует значительных финансовых расходов и связано с рисками в условиях нестабильной политической и финансовой ситуации. Поэтому задача повышения срока эксплуатации броней мельничной футеровки является актуальной задачей. В статье рассмотрено предложенное и реализованное решение задачи повышения срока эксплуатации футеровки мельницы мокрого полусамоизмельчения (МПСИ-70х23) из стали 110Г13Л. Приведены результаты мониторинга фактической эксплуатации футеровки и математического моделирования траектории рудно – шарового потока в мельнице, выявлены зоны интенсивного износа, дефекты отливок броней и разработаны новые конструкции элементов футеровки. С помощью программного пакета моделирования исследованы существующие литейные технологии, выявлены причины возникновения дефектов и разработаны технологии литья броней новой конструкции, исключающие образование дефектов. Показаны результаты промышленных испытаний броней новой конструкции, изготовленных по разработанным технологиям.

**Ключевые слова:** мельница полусамоизмельчения, отливка, моделирование, технология литья.

### Введение

Проблема повышения срока эксплуатации мельничной футеровки не нова и окончательно не решена. Применение достижений научно-технического прогресса различных областей, способствует развитию новых методов и инструментов для решения этого вопроса и позволяет достичь рационального и эффективного результата [1, с. 173]. Решение проблемы повышения срока эксплуатации футеровки особенно важно для фабрик, работающих по схеме полусамоизмельчения. Тяжелые, ударно-абразивные условия эксплуатации футеровки требуют более частую остановку мельницы для замены защитных броней. А в случае отсутствия резервной технологической нитки первой стадии, на период замены футеровки, необходимо останавливать весь про-

изводственный процесс [2]. Увеличение продолжительности эксплуатационного ресурса футеровки мельниц позволит сократить количество и продолжительность остановок оборудования, снизить затраты на приобретение и приведет к увеличению производительности и прибыли.

В начальный период эксплуатации мельницы Хайбуллинской обогатительной фабрики для выявления свойств футеровки и оптимизации продолжительности межремонтного периода были исследованы металлические брони, изготовленные из стали 110Г13Л. Сталь Гадфильда имеет свойство упрочняться под действием ударных нагрузок, поэтому ее применяют для изготовления футеровки дробильного и измельчительного оборудования. По химическому составу это аустенитная сталь и обладает хорошими эксплуатационными свойствами. С целью повышения определенных свойств ее дополнительно модифицируют и легируют [3–6].

© Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Хабибуллин Ш.М., 2019

Важным условием в процессе решения задачи было исключить или минимизировать возможные затраты. Поэтому решили исключить легирование и достичь максимально возможного результата с бронями из стали 110Г13Л.

В течение 3-х лет провели мониторинг стойкости футеровок: выполняли промежуточные осмотры, замеры и сбор статистических данных, определяющих скорость истирания рабочих поверхностей и характер износа профиля, с учетом объемов перерабатываемой руды и ее механических свойств.

В ходе наблюдения для каждого вида броней выявлены особенности демонтажа, средняя продолжительность эксплуатации, расположение общих характерных зон интенсивного износа (рис. 1, а), наличие идентичных скрытых дефектов литья (рис. 1, б) (усадочная раковина, усадочная пористость, литейные трещины, пригар [7, 8, с. 145–161, 9, с. 46–51]), ухудшающие эксплуатационные свойства.



Рис. 1. Износ броней торцевой загрузочной стенки (а) и дефекты литья, выявленные в процессе эксплуатации (б)

Общезвестно, что наличие литых дефектов в отливках способно приводить к снижению их эксплуатационной стойкости. Наличие углублений и неровностей на поверхности отливки, образованных раковинами и пористостью, способствует отрыву частиц металла от тела брони и ускоряет истирание при ударно-абразивном износе, действующем на мельничную футеровку [10, с. 104–106]. Наиболее опасными являются скрытые литые дефекты, которые нельзя исправить после производства литой детали.

Применив программный пакет ROCKY DEM Particle Simulator [11] и реальные параметры, смоделировали и визуализировали траекторию рудно-шарового потока в области торцевой загрузочной крышки и центральной части барабана (рис. 2, а, 3, а). Таким образом, зоны интенсивного износа обнаружили в зоне контакта максимально движущейся части рудно-шарового потока и футеровки, которые расположены радиально, в области стыка внешнего и среднего рядов броней торцевой крышки, и по центральной части барабана.

Сравнение данных, полученных моделированием, с фактическим состоянием футеровки после эксплуатации подтверждает правильность созданной модели и виртуально воссозданного процесса (рис. 2, 3).

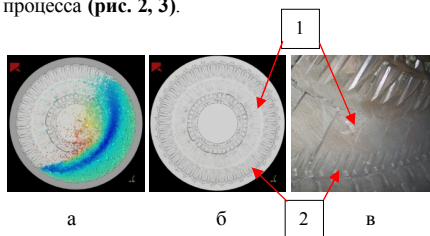


Рис. 2. Траектория (а) и зоны износа на смоделированной (б) и фактической (в) торцевой загрузочной стенке после эксплуатации: 1 – зона максимального износа; 2 – зона минимального износа броней

Полученное расположение зон максимального износа броней торцевой крышки и барабана при сопоставлении идентично положению этих зон в реально действующей мельнице.

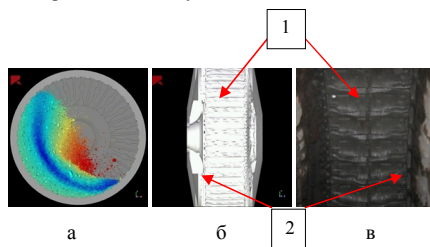


Рис. 3. Траектория (а) и зоны износа смоделированной (б) и фактической (в) футеровки барабана после эксплуатации: 1 – зона максимального износа; 2 – зона минимального износа броней

Малоизнашиваемой участки являются конструкционным балластом, увеличивая общую массу футеровки. За счет перераспределения малоизнашиваемой части металла в зону максимального износа и уменьшения высоты лифтеров футеровки внутреннего ряда были разработаны новые конструкции броней торцевой загрузочной крышки и барабана.

Промышленные испытания экспериментального комплекта броней разработанной конструкции в условиях действующего производства показали увеличение периода эксплуатации на 30,7% по сравнению с бронями базовой конструк-

ции. Однако при осмотрах в процессе эксплуатации и постепенного износа рабочей поверхности броней в отливках также выявлены скрытые усадочные раковины и пористость. Характер и положение этих дефектов идентичны дефектам, выявленным при эксплуатации базового комплекта броней (см. **рис. 1, а**). Это подтвердило необходимость изучения существующей литейной технологии и структуры металла в отливках для разработки новой технологии литья броней, исключающей возникновение дефектов.

Для анализа существующей в литейном цехе технологии, используя отечественную программу трехмерного моделирования CAE LVM Flow, смоделировали процессы заливки и кристаллизации отливок «Броня торцовая средняя» и «Броня торцовая внешняя». В этой программе для прогнозирования пористости в отливках стандартно включен расчет безразмерного критерия Ниямы (Nu). Его используют для предсказания усадочной пористости, возникновение которой зависит от питания двухфазной зоны [12].

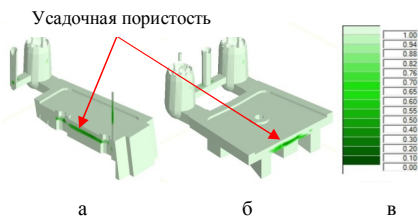


Рис. 4. Усадочная пористость на модели отливки «Броня торцовая средняя» (а, б) и шкала критерия Ниямы (в)

На представленном **рис. 4** видно, что критерий Ниямы в средней части может варьироваться от 0,20 до 0,55 единиц, указывая на наличие несплошности в теле отливки, изготовленной по существующей технологии. Кроме того, следует отметить, что чем меньше критерий Ниямы, тем более ярко выражена в процентном отношении микропористость отливки.

Учитывая результаты моделирования существующей литейной технологии, предложены два варианта литья для каждого вида броней, с различным расположением литниково-питающей системы. Анализ каждого из смоделированных вариантов показал, что предложенные технологии могут обеспечить отсутствие несплошностей (скрытых усадочных раковин, пористости) в исследуемых отливках. Также в процессе компьютерного моделирования существующей и пред-

ложенных литейных технологий были составлены компьютерные топографии усадочной пористости в продольном сечении брони, численно выраженные в виде критерия Ниямы. В качестве примера на **рис. 5** графически дана топография усадочной пористости в отливке «Броня торцовая средняя».

На **рис. 5** видно, что зона повышенной микропористости расположена в центральной части отливки и может быть причиной преждевременного изнашивания детали в процессе эксплуатации.

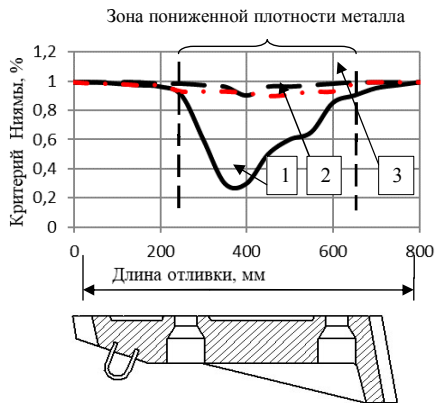


Рис. 5. Сравнительная топография усадочной пористости в отливке «Броня торцовая средняя»: 1 – существующая технология; 2 – предложенная технология, вариант № 1; 3 – предложенная технология, вариант № 2

С целью более корректной оценки данных сравнили полученные результаты с характером износа выведенной из эксплуатации брони.

Сопоставление положений зоны пористости, определенное на топографии с помощью критерия Ниямы, и зоны фактической пористости в отливке подтверждает их идентичность. Аналогичную картину наблюдали и для отливок «Броня торцовая внешняя».

Анализ полученных после моделирования результатов показал, что предложенные технологии могут обеспечить отсутствие несплошностей (скрытых усадочных раковин, пористости) в исследуемых отливках [13]. Кроме того, некоторые из предложенных вариантов позволяют получать такой же уровень технологического выхода годного, каким он был до изменения технологии производства «Броней торцовых». Сравнительная гистограмма значений техноло-

гического выхода годного различных вариантов литейных технологий представлена на рис. 6.

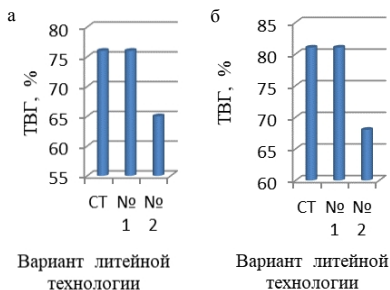


Рис. 6. Сравнительные гистограммы технологического выхода годного различных вариантов технологий: а – «Броня торцовая средняя»; б – «Броня торцовая внешняя»; СТ – существующая технология; № 1 – вариант № 1; № 2 – вариант № 2

Для объективности и достоверности полученных теоретических выводов по скорректированным технологиям с легкоотделяемой прибылью отлили опытные образцы броней и провели металлографический анализ макро- и микроструктуры различных частей отливок [14, 15]. После проведения финишных операций (очистки от пригара, удаления элементов литниково-питающей системы и термообработки) каждую отливку порезали по зонам тепловых узлов (рис. 7). Дефектов в отливках, полученных по новой литейной технологии, не обнаружили. Кроме того, осуществили ультразвуковой контроль, который также не показал дефектов.

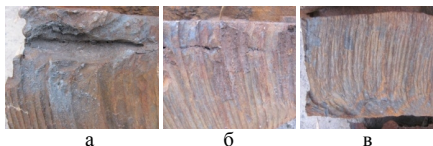


Рис. 7. Зоны отливки для исследования: а – усадочная раковина; б – усадочная пористость; в – плотный металл

Для практического подтверждения результатов, полученных в ходе работы, были проведены эксплуатационные испытания опытной партии броней новой конструкции, изготовленных по разработанной технологии литья.

Эксплуатационные испытания опытных образцов проводили в мельнице первой стадии измельчения МПСИ-70х23 в условиях действующего

цеха производства Хайбуллинской обогатительной фабрики. Выполнение работ по монтажу и демонтажу произведено без трудностей. Условия соответствия габаритных и посадочных размеров опытных образцов выполнены.

В результате проведенных испытаний период эксплуатации броней составил 2280 ч. Это на 46,1% больше продолжительности эксплуатационного периода футеровки базовой конструкции.

### Заключение

Таким образом, усовершенствование конструкции броней привело к увеличению эксплуатационного периода на 30,7%, а разработка литейной технологии позволила изготовить качественные отливки и повысить срок эксплуатации еще на 15,4%.

Увеличение срока эксплуатации броней позволило сократить количество приобретаемых за год комплектов футеровки и время простоя фабрики.

Годовая экономия от внедрения в производство футеровки составляет более 10,5 млн руб. (75 т литья) без учета дополнительного объема медного концентрата, полученного за счет сокращения простоя фабрики.

Для создания мельничной футеровки с наилучшими эксплуатационными свойствами требуется в первую очередь изучить характер ее износа и определить зоны, подверженные максимальному воздействию рудно-шарового потока. Анализ динамики износа броней позволяет разработать наилучший профиль рабочей поверхности футеровки и устранить выявленные недостатки ее материала или технологии производства.

### Список литературы

1. Крюков Д.К. Футеровки шаровых мельниц. М., 1965. 182 с.
2. Liners for the Grinders / Written by E&MJ News [Электронный ресурс]: URL: <http://www.e-mj.com>, // Published: Tuesday, 08 June 2010 15:04 (дата обращения 22.05.2017).
3. Matti Lindroos, Marian Apostol, Vuokko Heino, Kati Vaitonen, Anssi Laukkanen, Kenneth Holmberg, Veli-Tapani Kuokkala. The Deformation, Strain Hardening, and Wear Behavior of Chromium-Alloyed Hadfield Steel in Abrasive and Impact Conditions / Tribology Letters. 57:24. March 2015. Doi: 10.1007/s11249-015-0477-6.
4. Nasajpour, A., Kokabi, A.H., Davami, P., Nikzad, S. Effect of molybdenum on mechanical and abrasive wear properties of coating of as weld Hadfield steel with flux-cored gas tungsten arc welding // Journal of Alloys and Compounds. 2016. Vol. 659, pp. 262–269.
5. I. Mejia, A. Bedolla-Jacuinde, J.R. Pablo Sliding wear behavior of a high – Mn austenitic twinning induced plasticity (TWIP) steel microalloyed with Nb / Wear.

- Volume 301, Issues 1–2, April – May 2013. P. 590–597. Doi: 10.1016/j.wear.2013.01.054.
6. Xing Tian, Hong Li, Yansheng Zhang. Effect of Al content on stacking fault energy in austenitic Fe–Mn–Al–C alloys / Journal of Materials Science. Volume 43, Issue 18. September 2008. P. 6214–6222. Doi: 10.1007/s10853-008-2919-0
  7. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Хабибуллин Ш.М. Исследование процесса эксплуатации литых броней из стали марки 110Г13Л в мельнице МПСИ-70Х23 // Литейные процессы. 2013. № 12. С. 8–11.
  8. Воронин Ю.Ф., Камаев В.А. Атлас литейных дефектов. Черные сплавы. М.: Машиностроение-1, 2005. 330 с.
  9. Литейные дефекты и способы их устранения / А.В. Лакедемонский, Ф.С. Кваша, Я.И. Медведев и др. М.: Машиностроение, 1972. 152 с.
  10. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: учебник для высш. техн. учеб. заведений. 3-е изд., перераб., доп. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.
  11. Моделирование динамики частиц методом DEM / [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rockydem.ru/mills/> (дата обращения: 17.08.2016).
  12. KENTD. CARLSON Прогнозирование объемной доли усадочной пористости с использованием безразмерного критерия НИЯМЫ / KENT D. CARLSON, CHRISTOPH BECKERMANN [Электронный ресурс]. URL: [http://www.castsoft.ru/Articles/PDF/CarlsinBeckerMann\\_Niyama.pdf](http://www.castsoft.ru/Articles/PDF/CarlsinBeckerMann_Niyama.pdf) (Дата обращения: 22.10.2017).
  13. Вдовин К.Н., Хабибуллин Ш.М. Совершенствование технологии производства литых броней из стали марки 110Г13Л для мельницы МПСИ-70Х23 // Литейщик России. 2014. № 1. С. 13–15.
  14. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Хабибуллин Ш.М. Отработка технологии производства и исследование качества литых броней с применением методов неразрушающего контроля // Литейные процессы. 2014. № 13. С. 75–82.
  15. Исследование механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания высокомарганцевой стали / В.М. Колокольцев, К.Н. Вдовин, В.П. Чернов, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко, В.К. Дубровин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2017. Т. 15. № 2. С. 54–62.

Поступила 10.01.19

Принята в печать 24.01.19

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-26-31>

## INCREASING THE LIFETIME OF CAST HIGH-MANGANESE STEEL LINERS FOR THE SEMI-AUTOGENOUS GRINDING MILL

**Konstantin N. Vdovin** – DSc (Eng.), Professor  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [Vdovin@magtu.ru](mailto:Vdovin@magtu.ru)  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3244-3327>

**Nikolai A. Feoktistov** – PhD (Eng.), Associate Professor  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6091-7983>

**Shamil M. Khabibullin** – Postgraduate Student  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: 0000-0002-1543-3015

**Abstract.** At the processing plants of the mining industry, a significant part of the total processing costs (from 45 to 65%) is spent on crushing and grinding operations, including mill lining. The efficiency of grinding equipment in the conditions of abrasive impact of ore and a continuous operation requires periodic replacement of a worn-out lining. The costs for its purchase, delivery and installation during a year amount to tens of millions of rubles, and the equipment downtime associated with the replacement of the lining reduces the volume of finished products by hundreds of millions of rubles per year. The practical efficiency of imported mill liners is not always confirmed by the expected positive result of their actual operation, and an increase in the equipment utilization coefficient (EUC), but their use definitely requires significant financial costs and entails risks in an unstable political and financial situation. Therefore, the task of increasing the service life of the mill liners is urgent. The paper presents a suggested and implemented solution to increase the lifetime of 110G13L steel lining for the wet semi-

autogenous grinding mill (SAG mill-70x23). It includes monitoring of the actual liner operation and a mathematical simulation of the ore and ball trajectory in the mill, reveals zones of intensive wear, defects of liner castings and developed new structures of the lining elements. Applying the simulation software package, the authors studied the existing casting technologies, found reasons for defects and developed the casting technology for a new design of liners excluding defects. The paper contains industrial tests of the liners of a new design manufactured according to the developed technologies.

**Keywords:** Semi-autogenous grinding mill, casting, simulation, casting technology.

### References

1. Kryukov D.K. *Futerovki sharovykh melnits* [Ball mill lining]. Moscow, 1965, 182 p. (In Russ.)
2. Liners for the Grinders. Written by E&MJ News [Electronic resource]. Available at: <http://www.e-mj.com>. Published:

- Tuesday, 08 June 2010 15:04 (Accessed: 22.05.2017).
3. Matti Lindroos, Marian Apostol, Vuokko Heino, Kati Valtonen, Anssi Laukkanen, Kenneth Holmberg, Veli-Tapani Kuokkala. The deformation, strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed hadfield steel in abrasive and impact conditions. *Tribology Letters*. 57:24. March 2015. Doi: 10.1007/s11249-015-0477-6.
  4. Nasajour A., Kokabi A.H., Davami P., Nikzad S. Effect of molybdenum on mechanical and abrasive wear properties of coating of as weld Hadfield steel with flux-cored gas tungsten arc welding. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 659, pp. 262–269.
  5. I. Mejia, A. Bedolla-Jacuinde, J.R. Pablo. Sliding wear behavior of a high-Mn austenitic twinning induced plasticity (TWIP) steel microalloyed with Nb. *Wear*, vol. 301, issues 1–2, April–May 2013, pp. 590–597. Doi: 10.1016/j.wear.2013.01.054.
  6. Xing Tian, Hong Li, Yansheng Zhang. Effect of Al content on stacking fault energy in austenitic Fe–Mn–Al–C alloys. *Journal of Materials Science*. September 2008, volume 43, issue 18, pp. 6214–6222. Doi: 10.1007/s10853-008-2919-0.
  7. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Khabibullin Sh.M. The study of the process of operation of 110G13L steel cast liners in SAG mill 70X23. *Liteynye protsessy* [Casting processes], 2013, no. 12, pp. 8–11. (In Russ.)
  8. Voronin Yu.F., Kamaev V.A. *Atlas liteynykh defektov. Chernye splavy* [Atlas of casting defects. Ferrous alloys]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005, 330 p. (In Russ.)
  9. Lakedemonkiy A.V., Kvasha F.S., Medvedev Ya.I. et al. *Liteynye defekty i sposoby ikh ustraneniya* [Casting defects and methods of their elimination]. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 152 p. (In Russ.)
  10. Lakhtin Yu.M. Leonteva V.P. *Materialovedenie: uchebnik dlya vyssh. tekhnich. uchebn. zavedeniy* [Materials science: the textbook for higher technical education institutions]. 3rd edition; revised and updated. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 528 p. (In Russ.)
  11. Particle dynamics simulation by the DEM method [Electronic resource]. Available at: <http://www.rockydem.ru/mills/> (Accessed: 17.08.2016). (In Russ.)
  12. Kent D. Carlson, Christoph Beckermann. *Prognozirovaniye obemnoy doli usadochnoy poristosti s ispolzovaniem bezrazmernogo kriteriya Niyamy* [Prediction of shrinkage pore volume fraction using a dimensionless Niyama criterion], [Electronic resource]. Available at: [http://www.castsoft.ru/Articles/PDF/CarlsinBeckermann\\_Niyama.pdf](http://www.castsoft.ru/Articles/PDF/CarlsinBeckermann_Niyama.pdf) (Accessed: 22.10.2017). (In Russ.)
  13. Vdovin K.N., Khabibullin Sh.M. Improvement of the production technology for 110G13L steel cast liners for SAG mill 70X23. *Liteishchnik Rossii* [Russian Foundryman], 2014, no. 1, pp. 13–15. (In Russ.)
  14. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Khabibullin Sh.M. Development of production technology and study of the quality of cast liners with the use of NDT methods. *Liteynye protsessy* [Casting processes], 2014, no. 13, pp. 75–82. (In Russ.)
  15. Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Chernov V.P., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A., Dubrovin V.K. 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, vol. 15, no. 2, pp. 54–62. (In Russ.)

Received 10/01/19

Accepted 24/01/19

**Образец для цитирования**

Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Хабибуллин Ш.М. Повышение срока эксплуатации литых броней из высокомарганцевой стали мельницы полусамозмельчения // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2019. Т.17. №1. С. 26–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-26-31>

**For citation**

Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Khabibullin Sh.M. Increasing the lifetime of cast high-manganese steel liners for the semi-autogenous grinding mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 1, pp. 26–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-26-31>