

Научная статья

УДК 622.23.05

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-73-79

Хазин Марк Леонтьевич, Симисинов Денис Иванович, Адас Виталий Егорович

Уральский государственный горный университет

* для корреспонденции: Khasin@ursmu.ru

АНАЛИЗ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ГРОХОТА, ПРОИЗВЕДЕННОГО ПО ПРОГРАММЕ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ**Информация о статье**

Поступила:

01 ноября 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 ноября 2024 г.

Принята к печати:

24 ноября 2024 г.

Опубликована:

12 декабря 2024 г.

Ключевые слова:

горная промышленность, грохот, вибрация, сталь, усталость, трещина, зерна, твердость.

Аннотация.

Вибрационные машины применяются в различных отраслях промышленности. При этом следует учитывать статические и динамические силы, вызываемые вибрацией. В процессе эксплуатации вибрационный грохот подвергается недогрузкам или перегрузкам. Недостатки конструкции или ее материала могут привести к зарождению и образованию усталостных трещин в корпусе.

Методика проведения исследования. Фазовый состав образца исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра XRD 7000 (Shimadzu) с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа XFlash Detector 630M (Bruker Nano GmbH), на электронном сканирующем микроскопе VEGA LMS фирмы TESCAN с приставкой для энергодисперсионного анализа Xplore30 фирмы OXFORD instruments. Элементный состав образцов проверяли на спектрофотометре универсальном рентгенофлуоресцентном Clever B-23 и лазерном спектрофотометре SkiAps Z-902 Laser-Z. Металлографическое исследование проводили на оптическом микроскопе Olympus BX61. Твердость по Виккерсу измеряли на твердомере ИТВ-30-АМ.

Результаты исследования. Проведен анализ структуры и механических свойств материала корпуса грохота. В образцах материала корпуса грохота ГИС-63 отмечается морфологически одинаковая структура металла из мелкозернистого феррита и структурно-свободного цементита. Количественная оценка микроструктуры показала, что средний размер ферритных зерен составляет 9,17–12,13 мкм, а твердость – 140-150 HV.

Вывод. На основе проведенного исследования следует, что исследуемая сталь характеризуется невысоким металлургическим качеством, а твердость соответствует требованиям нормативных документов для марки стали 09Г2С.

Для цитирования: Хазин М.Л., Симисинов Д.И., Адас В.Е. Анализ свойств конструкционных материалов грохота, произведенного по программе импортозамещения // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 6 (176). С. 73-79. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-73-79, EDN: NEWGPA

Введение

Во многих отраслях промышленности часто необходимо иметь сырье, содержащее определенный состав частиц, поскольку такое разделение сыпучего сырья на отдельные фракции увеличивает эффективность его применения. Поэтому просеивание является незаменимым единичным процессом разделения материалов в различных производственных процессах [1, 2]

В настоящее время для грохочения используют специальное оборудование – грохоты, что связано с простотой конструкции и их высокой эффективностью [4-7]. Существует множество моделей вибра-

ционных грохотов, которые были улучшены за прошедшие годы [4, 6-7].

В горнодобывающей промышленности вибрационные грохоты работают в условиях высоких конструкционных нагрузок и постоянных вибраций. Поэтому конструкция вибрационного грохота испытывает постоянные механические воздействия из-за экстремальных условий, в которых они работают. При этом ключевым моментом для пользователя стала надежность вибрационного грохота. Согласно исследованию условий работы вибрационных грохотов [9, 10], напряжения в компонентах

конструкции должны быть минимальными для достижения приемлемой усталостной долговечности.

С увеличением площади просеивания и производительности рабочая масса вибрационного грохота увеличивается. При этом вибрационный грохот должен выдерживать большую знакопеременную нагрузку при высокой частоте колебаний [11]. Несмотря на простоту установки вибрационного оборудования на опорную конструкцию, необходимо учитывать статические и динамические силы, вызываемые вибрацией. Вибрационные грохоты подвержены случайным толчкам, вызванным изменением силы возбуждения и объемом подачи сырья во времени, а также многоциклового усталости в течение всего срока службы. [6, 12].

Поскольку амплитуда вибрации грохота – величина переменная, это обуславливает образование концентрации напряжений, что часто проявляется в виде разрушения конструкции. Наиболее распространенные неисправности, встречающиеся в промышленности – это трещины в корпусе виброгрохота [13-14].

Образование трещин может быть связано со следующими причинами:

1. переменная амплитуда вызывается большой разницей высот между пружинами виброгрохота по обеим его сторонам;

2. в процессе работы грохота генерируются высокочастотные колебания, которые накладываются на остаточные (сварочные) напряжения, и в результате в боковых пластинах короба образуются трещины.

Материалы и методика эксперимента

Металлографическое исследование

Фазовый состав образца исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра XRD 7000 (Shimadzu) с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа XFlash Detector 630M (Bruker Nano GmbH). Фотографии микроструктуры стали и карты распределения химических элементов получали на электронном сканирующем микроскопе VEGA LMS фирмы TESCAN с приставкой для энергодисперсионного анализа Xplore30 фирмы OXFORD instruments. Элементный состав образцов проверяли на спектрофотометре универсальном рентгенофлуоресцентном Clever B-23 и лазерном спектрофотометре SkiAps Z-902 Laser-Z.

Металлографическое исследование проводили на электронном сканирующем микроскопе и оптическом микроскопе Olympus BX61. Количественную оценку среднего размера зерен осуществляли согласно ГОСТ 9391-80.

Механические испытания

Испытание на твердость по Виккерсу проводили на поверхности образца с помощью твердомера ИТВ-30-АМ под нагрузкой 25 Н в течение 15 секунд времени выдержки. Согласно ГОСТ 2999-75 измерения проводили в 5 точках вдоль поверхности образцов.

Испытания на растяжение проводили на универсальной разрывной машине МИМ 2-20-2 при скорости крейцкопфа 0,2

мм/с с записью диаграммы деформации.

Испытание на усталость проводили на универсальной машине ЦД-20 с пульсатором Пу-10. Переменная растягивающая нагрузка от максимального напряжения растяжения σ_{max} до минимального σ_{min} действовала вдоль оси образца при частоте циклов нагружения 10 Гц и температуре воздуха 20°C. Максимальная растягивающая нагрузка составляла 80%, а минимальная 70% от условного предела текучести стали. Количество циклов до разрушения рассчитывали усреднением результатов серии из 7 образцов.

Результаты исследования

Проблема обеспечения надежности материала различных конструкций сохраняет свою актуальность многие годы. В последние десятилетия она стала еще более острой в результате снижения ресурса конструкций из-за деградации материала в процессе эксплуатации, приводящей к необходимости уточнения норм прочности и рекомендаций по продлению ресурса при длительных сроках службы.

Грохот инерционный ГИС-63 предназначен для промежуточного и товарного разделения на фракции гравия, щебня и других материалов. Корпус грохота изготавливали из стали 13Mn6, 9MnSi5 (ФРГ), SB49 (Япония) или VH2 (Венгрия), которые работали более 6 лет. Однако в связи с санкциями было принято решение использовать отечественные стали, в частности 09Г2С. После срока эксплуатации грохота в течение 6 месяцев в корпусе образовались трещины.

Для исследования физико-механических свойств и состава конструкционного материала корпуса грохота на корпусе было выделено две области: непосредственно около трещины (серия 1) и максимально удаленная от трещины (серия 2), из которых были вырезаны образцы для исследования.

Одной из основных причин отказов и разрушений элементов вибрационных машин, в частности растрескивания корпуса виброгрохота, является усталость конструкционных материалов при циклической нагрузке [13-14]. Усталостное разрушение является наиболее опасным, поскольку накопление усталостных повреждений происходит длительное время без видимых изменений с последующим быстрым ростом магистральной трещины при напряжениях значительно меньше предела прочности материала.

В процессе проведения испытаний образцов се-

Таблица 1. Механические характеристики образцов

Table 1. Mechanical characteristics of samples

Серия	Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение, δ %	Твердость, HV
1	486,8	366,2	16,7	150,2
2	480,2	360,3	26,8	146,5
ГОСТ 5520–2017	440...640	>275	>22	

рий 1 и 2 определяли следующие механические характеристики: временное сопротивление разрыву (σ_b), условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$), пластичность (δ) и твердость и усталость (Таблицы 1 и 2).

Усталостные испытания проводили при растягивающей нагрузке, которая изменялась от макси-

мального напряжения растяжения до минимального, при частоте циклов нагружения 10 Гц. Полученные результаты усредняли по 7 образцам (см. **Таблицу 2**).

Под действием циклической нагрузки структура материала искажается вследствие образования значительного количества дефектов: вакансий, дислокаций, полос скольжения, упрочнения и разупрочнения.

Таблица 2. Результаты испытания на усталость
Table 2. Fatigue test results

Серия	Максимальное напряжение растяжения σ_{max} , МПа	Минимальное напряжение растяжения σ_{min} , МПа	Амплитуда изменения напряжения A_{σ} , МПа	Количество циклов до разрушения N
1	293	256	37	188200
2	288	251	37	303520

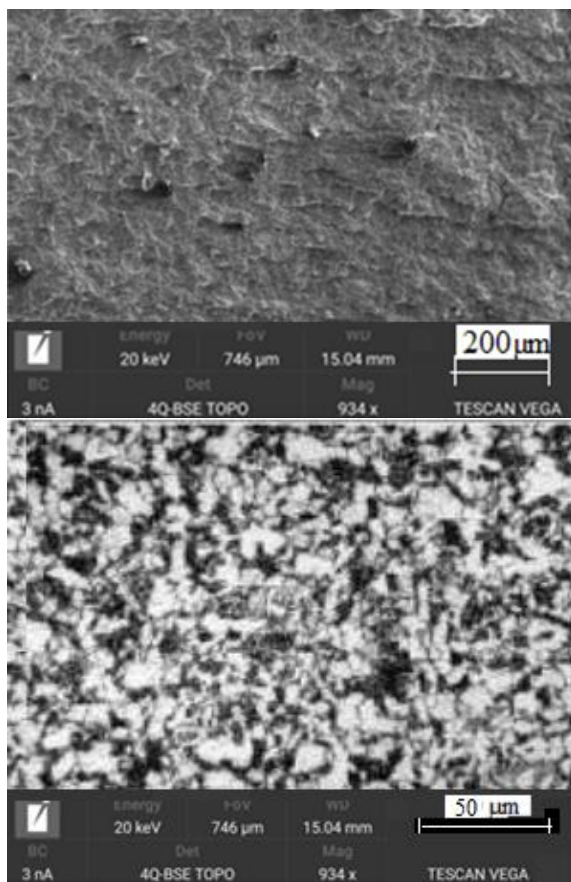


Рис. 1. Фрактограммы усталостного излома стали 09Г2С:

а) серия 1, б) серия 2

Fig. 1. Fractograms of steel 09G2S fatigue fracture:

а) series 1, б) series 2

Таблица 3. Химический состав образца стали (вес. %)

Table 3. Chemical composition of the steel sample (wt. %)

Серия	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	N	As	S	P	Fe
ГОСТ 19281-89	до 0,12	0,5 - 0,8	1,3 - 1,7	до 0,3	до 0,3	до 0,3	до 0,008	до 0,08	до 0,04	до 0,035	96-97
1-1	0,24	0,63	1,34	-	0,03	0,07	-	-	-	-	97,62
1-2	1,45	2,32	2,32	0,2	0,06	0,08	-	-	-	-	93,55
2-1	0,10	0,64	1,25	-	0,05	0,09	-	-	-	-	97,77
2-2	0,11	0,60	1,44	-	0,05	0,07	-	-	-	-	97,76

Из данных сканирующей электронной микроскопии следует, что поверхность стали представляет собой усталостный излом: имеется зарождение трещины, зоны распространения усталостной трещины и разрушения. Большую часть поверхности разрушения образцов серии 1 (70-80% площади) занимает зона хрупкого разрушения. В этой зоне наблюдаются детали микрорельефа, соответствующие механизму внутризеренного скола: фасетки скола, язычки, ручьи, узор (Рис. 1а).

Средний размер фасеток скола, соответствующий величине ферритных зерен, составляет порядка 15-20 мкм. Однородность поверхности излома соответствует стабильному развитию хрупкой трещины. Поверхность разрушения образцов серии 2 больше соответствует вязкому характеру (Рис. 1б): область разрушения деформирована, удлинение составляет не более 1,6% относительно рабочей длины образца.

Для выявления причин различия механических свойств и вида разрушения были исследованы состав и структура образцов стали (Таблица 3).

Согласно полученным данным, элементный состав исследуемых образцов соответствует марке стали 09Г2С [15]. В образцах отмечена морфологически одинаковая структура металла, состоящая из мелкозернистого феррита и структурно-свободного цементита в форме мелких частиц, расположенных на границах зерен. Количественная оценка микроструктуры согласно ГОСТ 9391-80 показала, что средний размер ферритных зерен изменялся в пределах $9,17 \pm 0,20 - 12,13 \pm 0,33$ мкм, что соответствовало 9-10 номеру зерна.

При исследовании структуры стали также были обнаружены неравномерно распределенные неметаллические включения сферической или округлой формы, которые образовывали цепочки и компактные скопления из отдельных частиц (Рис. 2).

Известно, что неметаллические включения являются одним из основ-

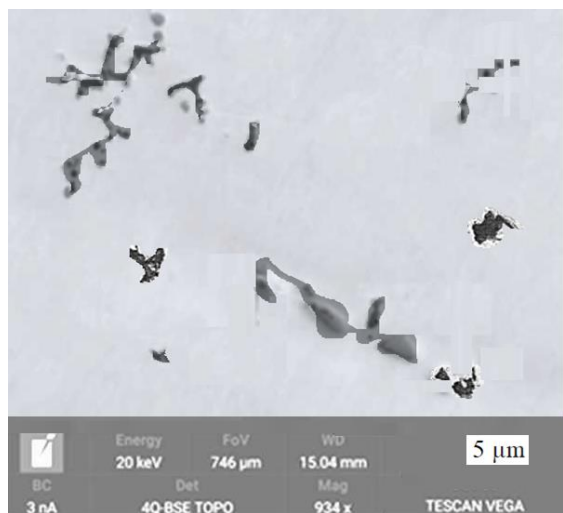


Рис. 2. Микроструктура неметаллических включений на полированной поверхности образца стали 09Г2С

Fig. 2. Microstructure of non-metallic inclusions on 09G2S steel sample polished surface

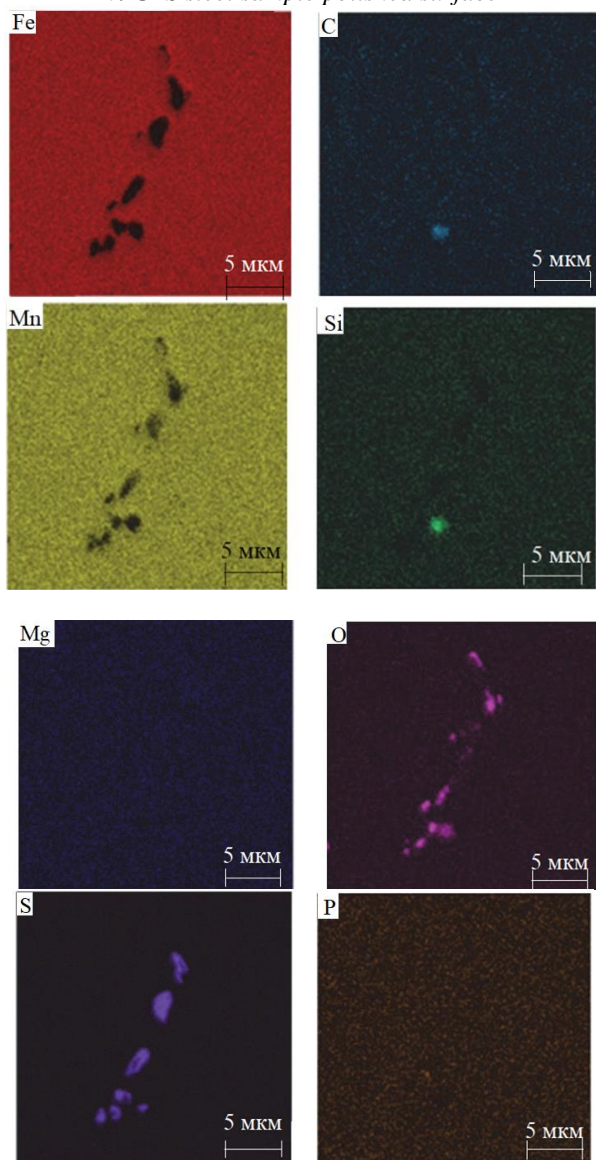


Рис. 3. Карта распределения элементов по поверхности образца

Fig. 3. Map of the elements distribution over the sample surface

ных факторов, определяющих «металлургическое» качество стали и в значительной степени влияющих на технологические, механические и эксплуатационные свойства сталей [16,17]. В частности, неметаллические включения повышают хрупкость сталей за счет уменьшения работы, необходимой для зарождения трещины [18,19]. Однако качество стали зависит не столько от общего количества (объемной доли) включений, сколько от их размеров, формы, распределения и химического состава, а также от прочности связи неметаллических включений со сталью, прочности стали и величины приложенных напряжений.

Таким образом, сталь, использованная для изготовления корпуса грохота, имела неоднородный состав. В локальной области образования трещины состав стали имеет значительный разброс, что подтверждается результатами химического анализа (см. Таблицу 3).

Для определения элементного состава неметаллических включений было проведено картирование по основным элементам (Рис. 3) и были выявлены следующие неметаллические включения: FeO–Al₂O₃ (герцинит), MgO–Al₂O₃ (алюмомагниева шпинель), Al₂O₃ (оксид алюминия), MnS (сульфид марганца).

Оценка неметаллических включений проводилась на 20 полях зрения общей площадью 8 мм². Средний размер, плотность (ρ) и количество включений приведены в Таблице 4.

Таблица 4. Размерные характеристики неметаллических включений

Table 4. Dimensional characteristics of non-metallic inclusions

Серия	Средний размер, мкм	ρ, шт/мм ²	Количество включений, шт						
			0-3	3-6	6-12	12-18	18-24	24-30	30-36
			мкм	мкм	мкм	мкм	мкм	мкм	мкм
1	4,6	338	422	1858	388	24	9	2	3
2	2,4	232	811	619	202	12	5	1	1

По данным таблицы можно сделать вывод, что количество и плотность включений в области трещины примерно в 1,5 раза выше, чем в удаленных областях. Именно этим можно объяснить и различие механических свойств образцов серии 1 и 2. Следовательно, образование трещин в корпусе связано с неоднородностью состава стали.

Выводы

В работе исследовали изменения структуры и механических свойств стали 09Г2С корпуса грохота ГИС-63. Показано, что исследуемая сталь по сечению образцов имела относительно однородную ферритно-перлитную структуру со средним размером зерна феррита в пределах 9–12 мкм с неоднородным распределением неметаллических включений металлургического происхождения. Плотность и количество включений в области трещины примерно в 1,5 раза превышало их содержание по сравнению с другими областями корпуса. Неодно-

родность распределения неметаллических включений проявилась в ослаблении металла корпуса грохота, что количественно отразилось в измеренных значениях механических свойств (прочности, пластичности, числа циклов до разрушения) и обусловило зарождение и развитие усталостной трещины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jahani M., Farzanegan A., Noaparast M. Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM solver // Powder Technology. 2015. Vol. 283. P. 32–47. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2015.05.016.
2. Wang Z., Liu C., Wu J., Jiang H., Song B., Zhao Y. A novel high-strength large vibrating screen with duplex statically indeterminate mesh beam structure // Journal of Vibroengineering. 2017. Vol. 19. No. 8. Pp. 5719–5734. DOI: 10.21595/jve.2017.18319.
3. Григорьев М. С. Особенности грохота ГИЛ-32 и его применение в горной промышленности // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 4. С. 429–431.
4. Тутов С. С. Особенности горнодобывающего оборудования на примере грохота // Достижения науки и образования. 2020. № 14 (68). С. 22–23.
5. Franco R., Flores P. A., Peinado A. A. C. Fatigue failure analysis of vibrating screen spring by means of finite element simulation: a case study // XIV International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications COMPLAS 2017. Pp. 766–775.
6. Linhares T., Vimieiro C. Analysis of the dynamic forces acting on a vibrating screen and its support structure using a scale model // Measurement. 2021. Vol. 176. № 3. 109179. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109179.
7. Kim A., Doudkin M., Vavilov A., Guryanov G. New vibroscreen with additional feed elements // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 17. № 4. Pp. 786–794. DOI: 10.1016/j.acme.2017.02.009.
8. Ляшенко В. И., Дятчин В. З., Франчук В. П. Совершенствование вибрационных питателей-грохотов для горно-металлургической промышленности // Известия вузов. Черная Metallургия. 2018. Т. 61. № 6. С. 470–477. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-470-477.
9. Ramatsetse B., Mporfu K., Makinde O. A. Failure and sensitivity analysis of a reconfigurable vibrating screen using finite element analysis // Case Studies in Engineering Failure Analysis. 2017. Vol. 9. Pp. 40–51. DOI: 10.1016/j.csefa.2017.04.001.
10. Hou Y., Fang P., Zeng L. Finite element analysis of dual-frequency vibrating screen // Adv. Mater. Res. 2012. Vol. 479–481. Pp. 2124–8. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.479-481.2124>.
11. Zhao Y. M., Liu C. S., He X. M., Zhang C. Y., Wang Y. B., Ren Z. T. Dynamic design theory and application of large vibrating screen // Procedia Earth and Planetary Science. 2009. Vol. 1. Issue 1. 2009. Pp. 776–784.
12. Ramatsetse B., Mporfu K., Daniyan I., Makinde O. Assessment of Reconfigurable Vibrating Screen Technology for the Mining Industries // The Human-Data-Technology Nexus. FAIM 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-18326-3_8.
13. Wang Z., Peng L., Zhang C., Qi L., Liu C., Zhao Y. Research on impact characteristics of screening coals on vibrating screen based on discrete-finite element method // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects. 2019. Vol. 42. No. 16. Pp. 1–14. DOI: 10.1080/15567036.2019.1604905.
14. Nie Z. Dynamic Characteristic Analysis of Vibration Screen Based on Joint Face Analysis // Journal of Physics: Conference Series 2085 (2021) 012013. IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/2085/1/012013
15. Орлов П. Н. Краткий справочник металлста. М. : ЁЁ Медиа, 2012. 960 с.
16. Lambrighs K., Verpoest I., Verlinden B., Wevers M. Influence of non-metallic inclusions on the fatigue properties of heavily cold drawn steel wires // Procedia Engineering. 2010. Vol. 2. Iss. 1. Pp. 173–181.
17. Repin A.A., Alekseev S.E., Teplykh A.M., Popelyukh A.I. Influence of nonmetallic inclusions on endurance of percussive machines // Journal of Mining Science. 2011. Vol. 47. № 6. Pp. 798–806.
18. Kondratenko A. S., Timonin V. V., Karпов V. N., Popelyukh A. I. Ways to improve rotary-percussive drilling efficiency // Горный журнал. 2018. № 5. Pp. 63–68.
19. Попелюх А. И., Веселов С. В., Мункуева Д. Д., Тимонин В. В., Карпов В. Н. Влияние неметаллических включений на сопротивление стали разрушению при многократном динамическом сжатии // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 2 (75). С. 67–78.

© 2024 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Хазин Марк Леонтьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры эксплуатации горного оборудования Уральского государственного горного университета, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30. E-mail: Khasin@ursmu.ru

Симисинов Денис Иванович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой эксплуатации горного оборудования Уральского государственного горного университета, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30. E-mail: 7sinov@m.ursmu.ru

Адас Виталий Егорович – аспирант Уральского государственного горного университета, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30. E-mail: adas.v@m.ursmu.ru

Заявленный вклад авторов:

Хазин Марк Леонтьевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования

Симисинов Денис Иванович – сбор и анализ данных, выводы

Адас Виталий Егорович – обзор соответствующей литературы, испытания, написание текста

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-73-79

Mark L. Khazin, Denis I. Simisinov, Vitaly E. Adas

Ural State Mining University

* for correspondence: Khasin@ursmu.ru

ANALYSIS PROPERTIES STRUCTURAL MATERIALS OF THE SCREEN PRODUCED UNDER THE IMPORT SUBSTITUTION PROGRAM

Abstract.

Vibrating screens are used in various industries. Despite the ease of installation, the static and dynamic forces caused by vibration must be taken into account. In the working process, the vibrating screen is subject to conditions of underload or overload, which, due to design or material flaws, can lead to the formation of fatigue cracks in the body.

Methods of research. *The phase composition of the sample was studied using an XRD 7000 X-ray diffractometer (Shimadzu) with an X-ray spectral microanalysis attachment XFlash Detector 630M (Bruker Nano GmbH) and a TESCAN VEGA LMS scanning electron microscope with an Xplore30 energy-dispersive analysis attachment from OXFORD Instruments. The elemental composition of the samples was checked on a Clever B-23 universal X-ray fluorescent spectrophotometer and a SkiAps Z-902 Laser-Z laser spectrophotometer. Metallographic study was carried out on an optical microscope Olympus BX61. Vickers hardness was measured on an ITV-30-AM hardness tester.*

Research results. *The structure and mechanical properties of the screen body were analyzed. In samples of the material of the GIS-63 screen body, a morphologically identical metal structure is noted from fine-grained ferrite and structurally free cementite. Quantitative evaluation of the microstructure showed that the average size of ferrite grains is 9.17 – 12.13 μm , and the hardness is 140-150 HV.*

Conclusion. *Based on the study, it follows that the steel under study is characterized by low metallurgical quality, and its hardness meets the requirements of regulatory documents for steel grade 09G2S.*



Article info

Received:

01 November 2024

Accepted for publication:

15 November 2024

Accepted:

24 November 2024

Published:

12 December 2024

Keywords: *mining, screening, vibration, steel, fatigue, crack, grains, hardness*

For citation: Khazin M.L., Simisinov D.I., Adas V.E. Analysis properties structural materials of the screen produced under the import substitution program. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2024; 6(176):73-79 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-73-79, EDN: NEWGPA

REFERENCES

1. Jahani M., Farzanegan A., Noaparast M. Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM solver. *Powder Technology*.

2015; 283; 32–47.
DOI: 10.1016/J.POWTEC.2015.05.016.

2. Wang Z., Liu C., Wu J., Jiang H., Song B., Zhao Y. A novel high-strength large vibrating screen with duplex statically indeterminate mesh beam struc-

ture. *Journal of Vibroengineering*. 2017; 19(8): 5719–5734. DOI: 10.21595/jve.2017.18319.

3. Grigoriev M. S. Features of the GIL-32 screen and its application in the mining industry. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki=News of TulGU. Technical science*. 2021; 4: 429–431. (In Russ.)

4. Tutov S.S. Features of mining equipment using the example of a screen. *Dostizheniya nauki i obratovaniya*. 2020; № 14(68): 22–23. (In Russ.)

5. Franco R., Flores P. A., Peinado A. A. C. Fatigue failure analysis of vibrating screen spring by means of finite element simulation: a case study. *XIV International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications COMPLAS 2017*. 2017; 766–775.

6. Linhares T., Vimieiro C. Analysis of the dynamic forces acting on a vibrating screen and its support structure using a scale model. *Measurement*. 2021; 176(3): 109179. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109179

7. Kim A., Doudkin M., Vavilov A., Guryanov G. New vibroscreen with additional feed elements. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2017; 17(4):786–794. DOI: 10.1016/j.acme.2017.02.009.

8. Lyashenko V.I., Dyatchin V.Z., Franchuk V.P. Improvement of vibrating feeders-screens for the mining and metallurgical industry. *Izvestiya vuzov. Chernaya Metallurgiya*. 2018; 61(6):470–477. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-470-477 (In Russ.)

9. Ramatsetse B., Mpofo K., Makinde O. A. Failure and sensitivity analysis of a reconfigurable vibrating screen using finite element analysis. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2017; 9:40–51. DOI: 10.1016/j.csefa.2017.04.001.

10. Hou Y.J., Fang P, Zeng L. Finite element analysis of dual-frequency vibrating screen. *Adv. Mater. Res.* 2012; 479–481:2124–2128. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.479-481.2124.

11. Zhao Y.M., Liu C.S., He X.M., Zhang C.Y., Wang Y.B., Ren Z.T. Dynamic design theory and ap-

plication of large vibrating screen. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2009; 1(1):776–784.

12. Ramatsetse B., Mpofo K., Daniyan I., Makinde O. Assessment of Reconfigurable Vibrating Screen Technology for the Mining Industries. *The Human-Data-Technology Nexus. FAIM 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18326-3_8.

13. Wang Z., Peng L., Zhang C., Qi L., Liu C., Zhao Y. Research on impact characteristics of screening coals on vibrating screen based on discrete-finite element method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. 2019; 42(16):1–14. DOI:10.1080/15567036.2019.1604905

14. Nie Z. Dynamic Characteristic Analysis of Vibration Screen Based on Joint Face Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 2085:012013. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/2085/1/012013

15. Orlov P.N. Brief reference book of a metal worker. Moscow: EE Media, 2012. 960 p. (In Russ.)

16. Lambrighs K., Verpoest I., Verlinden B., Wevers M. Influence of non-metallic inclusions on the fatigue properties of heavily cold drawn steel wires. *Procedia Engineering*. 2010; 2(1):173–181.

17. Repin A.A., Alekseev S.E., Teplykh A.M., Popelyukh A.I. Influence of nonmetallic inclusions on endurance of percussive machines. *Journal of Mining Science*. 2011; 47(6):798–806.

18. Kondratenko A. S., Timonin V. V., Karpov V. N., Popelyukh A. I. Ways to improve rotary-percussive drilling efficiency. *Mining magazine*. 2018; 5:63–68.

19. Popelyukh A.I., Veselov S.V., Munkueva D.D., Timonin V.V., Karpov V.N. The effect of non-metallic inclusions on the fracture resistance of steel under repeated dynamic compression. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. 2017; 2(75):67–78.

© 2024 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Mark L. Khazin – Dr. Sc. in Engineering, Professor, Professor of the Department of Mining Equipment Operation, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Kuibyshev str., 30. E-mail: Khasin@ursmu.ru

Denis I. Simisinov – Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Mining Equipment Operation, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Kuibyshev str., 30. E-mail: 7sinov@m.ursmu.ru

Vitaly E. Adas – postgraduate student of the Ural State Mining University, Yekaterinburg, Kuibyshev str., 30. E-mail: adas.v@m.ursmu.ru

Contribution of the authors:

Mark L. Khazin– setting a research task, scientific management, conceptualization of research

Denis I. Simisinov – data collection and analysis, conclusions

Vitaly E. Adas– review of relevant literature, tests, writing the text.

Authors have read and approved the final manuscript.

