

О характеристиках магнитоконтроля ферропримесей (подлежащих магнитной сепарации) сырья строительных материалов

К.т.н., доцент А.А. Сандуляк;*

аспирант Д.В. Ершов;

к.т.н., доцент В.А. Ершова;

д.т.н., профессор А.В. Сандуляк,

ФГБОУ ВПО Московский государственный строительный университет

Ключевые слова: ферропримеси; магнитоконтроль; опытно-расчетная модель

Для объективной диагностики результативности работы магнитных очистных устройств (в частности, получающих широкое распространение магнитных сепараторов [1]), ответственных за удаление магнитоактивных железистых примесей (ферропримесей), все более актуальной становится потребность в тех методах их контроля, которые основаны на том же принципе магнитного выделения (разумеется, при контроле – максимально полного) таких примесей. Этот принцип, т.е. принцип магнитоконтроля, широко используется для различных сред [1–19].

Что касается сырья строительных материалов, то для магнитоконтроля ферропримесей предусматриваются соответствующие стандартные методы [2–5] (вяжущие гипсовые материалы, тальк и талькомагнезит, доломит и др.). Однако к этим методам имеется достаточно много обоснованных претензий [20–22], начиная с того, что результаты операций магнитоконтроля отдельно не фиксируются (а осуществляется аддитивное накопление операционных масс выделяемых примесей), число этих операций постулируется из субъективных соображений «достаточности», выделенные примеси не идентифицируются. Из-за этого стандартные методы [2–5] приходится квалифицировать как обладающие существенной погрешностью, недопустимой на практике, что одновременно ставит актуальную задачу совершенствования магнитоконтроля.

В работах [20–22] в качестве альтернативы стандартным методам магнитоконтроля [2–5] приведены развернутые массово-операционные характеристики магнитоконтроля ферропримесей (кварцевого песка и полевого шпата), а именно данные масс m ферропримесей, выделенных в каждой из n стандартных операций такого контроля. Они позволили установить, что после выполнения даже повышенного числа n операций (до $n=7-10$ вместо оговоренных в работах [2–5] значений $n=3-6$) анализируемые среды полностью не освобождаются от ферропримесей; остаточная масса выделенных примесей, хотя и уменьшается по мере выполнения каждой последующей операции, продолжает оставаться заметной (особенно при относительно высокой дисперсности ферропримесей [21]). А это существенным образом сказывается на точности такого контроля, и определить связанную с этим обстоятельством погрешность (причем непредсказуемую), основываясь только на результатах опытов, не представляется возможным из-за отсутствия информации об истинном и являющимся искомым содержании ферропримесей.

Тем самым, можно вполне определенно заметить, что недостаток существующих стандартных методов магнитоконтроля, осуществляемых обычно при нормативно ограниченном числе операций контроля [2–5], к тому же «слепых», не предполагающих необходимую детализацию пооперационных масс, является принципиальным.

Кроме того, в работе [23] показано, что упомянутым стандартным методам магнитоконтроля [2–5] присущ также недостаток, заключающийся в полном отсутствии анализа роли, которую играет вовлечение частиц контролируемой среды (наряду с выделяемыми из нее феррочастицами), всегда имеющее место при осуществлении магнитоконтроля. Альтернативой рекомендациям этих стандартов [3, 5] о дополнительном магнитном разделении (к сожалению, не получившим должного обоснования – как показывает практика, их эффективность весьма низка) стала количественная оценка самого этого фактора [23]. Так, посредством прямой статобработки выделяемых частиц, подвергаемых для этого микроскопии, исходя из оцениваемого среднего размера частиц, в работе [23] получена соответствующая информация. Это весьма показательные и достаточно информативные гистограммы распределения количества, объема и, главное, массы частиц по размерам δ : как феррочастиц, так и попутно вовлеченных частиц контролируемой среды.

Сандуляк А.А., Ершов Д.В., Ершова В.А., Сандуляк А.В. О характеристиках магнитоконтроля ферропримесей (подлежащих магнитной сепарации) сырья строительных материалов

Из сказанного следует, что магнитоконтроль ферропримесей сырья строительных материалов нуждается в дальнейшем развитии, направленном на устранение отмеченных выше недостатков.

Постановка задач

В данной работе, прежде всего, ставилась задача получения уточненных массово-операционных характеристик магнитоконтроля ферропримесей (на примере кварцевого песка и полевого шпата). В число задач, решение которых позволило бы совершенствовать магнитоконтроль, входили также обработка и анализ этих характеристик, в том числе с позиций общепринятого лимитирования числа операций контроля (для оценки соответствующей погрешности).

Массово-операционные характеристики магнитоконтроля и их анализ

Для получения данных магнитоконтроля ферропримесей кварцевого песка и полевого шпата использовались стандартные методы [2–5], но с существенным дополнением [20–23]. В отличие от аддитивного накопления выделяемых масс, содержащих ферропримеси [2–5], осуществлялась пооперационная идентификация выделяемых масс именно ферропримесей [20–23] с их последующим представлением в виде соответствующих массово-операционных характеристик. Эти характеристики, т.е. убывающие зависимости операционных масс m выделяемых феррочастиц от порядкового номера n операции, показаны на рис. 1, 2. Асимптотически приближаясь к своему предельному (нулевому) значению, они явно свидетельствуют о наличии остаточной (и при выполнении даже повышенного числа операций магнитоконтроля – неучтенной) массы ферропримесей.

Получение таких характеристик является важным шагом в совершенствовании магнитоконтроля, позволяющим одновременно указать и на погрешность, вызванную неполным выделением ферропримесей. Столь же важным шагом является создание опытно-расчетной модели, которая выводила бы на решения задачи определения текущих операционных масс за пределами фактически выполненных операций магнитоконтроля.

Для решения вопроса определения всех возможных операционных масс m , не прибегая при этом к неоправданно большому (заметим, всегда недостаточному для «полного выделения» ферропримесей из пробы анализируемой среды) числу операций магнитоконтроля, можно воспользоваться предложенной в [20–22] расчетной моделью объективной легализации и прогнозной экстраполяции характеристик магнитоконтроля, адаптированной к уточненным характеристикам.

Явные признаки этой модели уже прослеживаются из самого вида опытных зависимостей операционных масс m выделяемых ферропримесей от порядкового номера операции n (рис. 1, 2). Так, эти зависимости, как и в [20–22], близки к экспоненциальным:

$$m = A \cdot \exp(-k \cdot n), \quad (1)$$

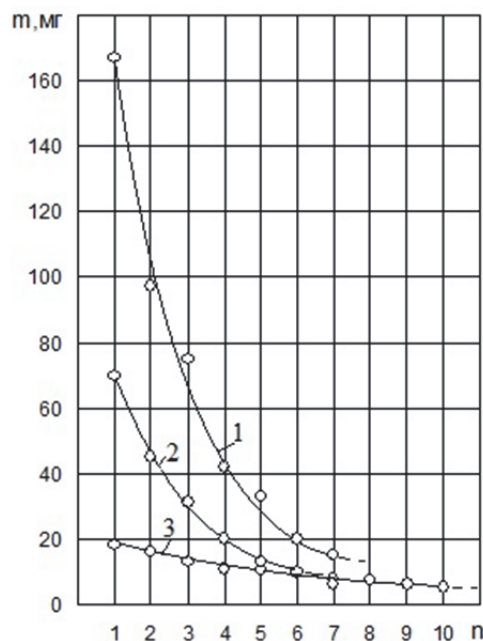


Рисунок 1. Данные по массам ферропримесей, выделенным из кварцевого песка в каждой из операций магнитоконтроля; 1, 2, 3 – пробы №1, 2, 3

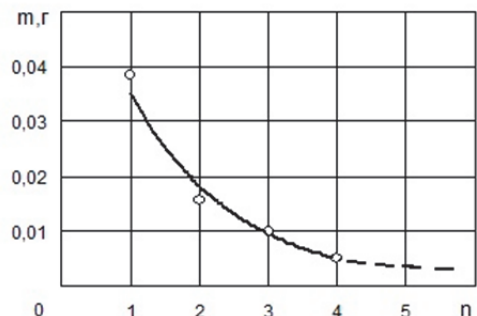


Рисунок 2. Данные по массам ферропримесей, выделенным из полевого шпата в каждой из операций магнитоконтроля

что находит свое наглядное подтверждение, если их представить в полулогарифмических координатах (рис. 3, 4); в таких координатах они хорошо поддаются линеаризации, подтверждая тем самым сказанное.

При этом входящие в формулу (1) параметры A и k (они являются параметрами, необходимыми и для последующих расчетов) легко определяются, как и в [20–22], на основании результатов экспериментов (рис. 1, 2). В частности (табл. 1), для кварцевого песка: $A = 230$ мг и $k = 0,39$ (проба №1), $A = 102$ мг и $k = 0,3$ (проба №2), $A = 20,2$ мг и $k = 0,14$ (проба №3); для полевого шпата: $A = 68$ мг и $k = 0,66$.

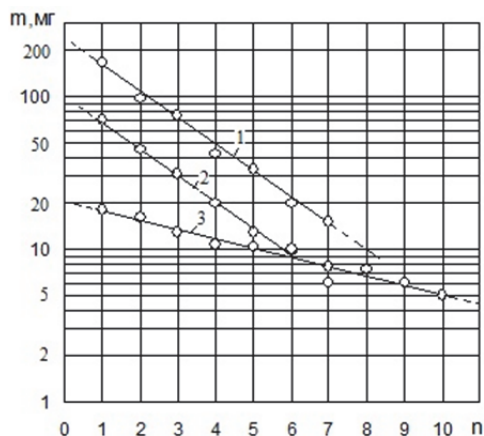


Рисунок 3. Иллюстрация показательного вида массово-операционных характеристик магнитоконтроля ферропримесей, выделенных из кварцевого песка – по данным рис. 1

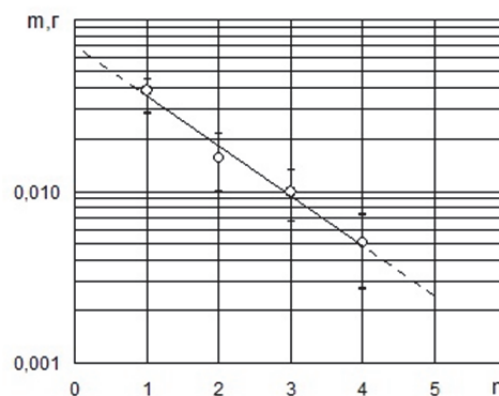


Рисунок 4. Иллюстрация показательного вида массово-операционной характеристики магнитоконтроля ферропримесей, выделенной из полевого шпата – по данным рис. 2

Дальнейшим шагом в совершенствовании магнитоконтроля является получение необходимых расчетных формул для определения суммарных масс ферропримесей, присутствующих в пробе среды, подвергаемой магнитоконтролю. Такая задача также становится решаемой, если обратить внимание на примечательную особенность показательной функции (1). Так, будучи дискретной, справедливой для натурального ряда чисел $1, 2, 3 \dots n$, эта функция, если ее записать почленно, дает количественный ряд, который представляет собой бесконечно убывающую геометрическую прогрессию [20–22]. Следовательно, при известном первом члене этой прогрессии $m_1 = A \cdot \exp(-k \cdot 1)$ и ее знаменателе $q = \exp(-k)$ может быть определена полная сумма членов этой прогрессии, в данном случае это суммарная потенциальная масса осадка $m_{1 \dots \infty}$, которая могла бы быть получена при теоретически неограниченном числе операций магнитоконтроля ($n \rightarrow \infty$), т.е.

$$m_{1 \dots \infty} = \sum_{n=1}^{\infty} m_n = \frac{m_1}{1 - q} = \frac{A}{\exp k - 1}. \quad (2)$$

Именно это получаемое значение $m_{1 \dots \infty}$ при известных значениях объема V и массы M пробы той или иной контролируемой среды следует использовать для определения истинных значений объемной $c_V = m_{1 \dots \infty} / V$ и/или массовой $c_M = m_{1 \dots \infty} / M (\times 100\%)$ концентрации (массовой доли) ферропримесей в этой среде.

Тем самым, проблемная ранее задача достоверного контроля содержания ферропримесей в пробе того или иного сырья строительных материалов и изделий становится вполне решаемой. В частности, для кварцевого песка: $m_{1 \dots \infty} = 482$ мг (проба №1), $m_{1 \dots \infty} = 203$ мг (проба №2), $m_{1 \dots \infty} = 134$ мг (проба №3); для полевого шпата: $m_{1 \dots \infty} = 73$ мг (табл.1).

Одновременно решаемой становится и задача определения погрешности магнитоконтроля

$$\varepsilon_{1 \dots n} = \frac{m_{1 \dots \infty} - m_{1 \dots n}}{m_{1 \dots \infty}} = 1 - \frac{m_{1 \dots n}}{m_{1 \dots \infty}} (\times 100\%), \quad (3)$$

осуществляемого при том или ином лимитировании числа n операций. Соответствующие данные о погрешностях $\varepsilon_{1...n}$ магнитоконтроля ферропримесей кварцевого песка и полевого шпата приведены в табл. 1. Так, например, при выполнении трех стандартных операций магнитоконтроля ферропримесей погрешность такого контроля составляет для кварцевого песка (проба №1 и №2) и полевого шпата 12–30%, а при выполнении одной операции – 47–65%. Для кварцевого песка, характеризующегося повышенной дисперсностью ферропримесей (проба №3), эти показатели составляют соответственно 65% и 87%.

Таблица 1. Сводные данные о параметрах магнитоконтроля ферропримесей кварцевого песка и полевого шпата

Анализируемая среда	Значения ключевых параметров прецизионного магнитоконтроля (операционно экстраполируемого)			Сравнительные значения результата магнитоконтроля, выполняемого ограниченным числом операций					
	$A, \text{мг}$	k	$m_{1...n}, \text{мг}$	$\frac{m_{1...6}}{m_{1...n}}$	$\varepsilon_{1...6}, \%$	$\frac{m_{1...3}}{m_{1...n}}$	$\varepsilon_{1...3}, \%$	$\frac{m_1}{m_{1...n}}$	$\varepsilon_1, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кварцевый песок, проба №1, $n=7$	230	0,39	482	0,9	10	0,7	30	0,35	65
Кварцевый песок, проба №2, $n=7$	102	0,3	203	0,93	7	0,7	30	0,34	64
Полевой шпат, $n=4$	68	0,66	73	-	-	0,88	12	0,53	47
Кварцевый песок, проба №3, $n=10$	20,2	0,14	134	0,58	42	0,35	65	0,13	87

Величину погрешности можно вычислять и по-иному, если после выполнения экспериментальной части магнитоконтроля и описанной выше обработки полученных опытных данных становится известным входящий в базовое выражение (1) параметр k . Так, с учетом выражения (2), а также аналогичного ему выражения, только получаемого для ограниченного числа операций, т.е.

$$m_{1...n} = \sum_{i=1}^n m_i = \frac{m_1 - m_n \cdot q}{1 - q} = A \frac{1 - \exp(-k \cdot n)}{\exp k - 1}, \quad (4)$$

определение (3) принимает такой функциональный вид:

$$\varepsilon_{1...n} = \exp(-k \cdot n) (\times 100\%). \quad (5)$$

Используя это выражение, можно решать и не рассматривавшуюся ранее обратную задачу, а именно находить, какое число операций n магнитоконтроля

$$n = \frac{\ln \varepsilon_{1...n}}{k} \quad (6)$$

необходимо выполнить, соблюдая определенную (допустимую) погрешность такого контроля $\varepsilon_{1...n}$. Так, для кварцевого песка, проба №3, (таблица 1) при условии допускаемой погрешности $\varepsilon_{1...n} = 5\%$ (0,05) необходимо выполнить $n = 21,4 \approx 22$ операции магнитоконтроля, что вряд ли возможно на практике. К тому же, эта информация становится доступной лишь после (или в процессе) выполнения опытов по контролю.

Выводы

1. Получены уточненные массово-операционные характеристики магнитоконтроля ферропримесей кварцевого песка и полевого шпата. Будучи экспоненциальной убывающей, каждая из таких дискретных характеристик, представляющая собой убывающую геометрическую прогрессию, позволяет получить расчетные значения общей (выделенной и остаточной) массы ферропримесей в пробе контролируемой среды.

Сандуляк А.А., Ершов Д.В., Ершова В.А., Сандуляк А.В. О характеристиках магнитоконтроля ферропримесей (подлежащих магнитной сепарации) сырья строительных материалов

2. Показано, что погрешность магнитоконтроля (убывающая по экспоненте при увеличении числа операций такого контроля) для ограниченного стандартного числа операций весьма существенна – до 12–30%.

Литература

1. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Ершов Д.В. [и др.] Магнитная сепарация сырья для производства стекла и керамики. Проблемы контроля железистых примесей (обзор) // Стекло и керамика. 2012. №6. С. 29–34.
2. ГОСТ 23789-79. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний.
3. ГОСТ 25216-82. Тальк и талькомагнезит. Метод определения железа.
4. ГОСТ 23672-79. Доломит для стекольной промышленности. Технические условия.
5. ГОСТ 8253-79. Мел химически осажденный. Технические условия.
6. Macián V., Payri R, Tormos B., Montoro L. Applying analytical ferrography as a technique to detect failures in Diesel engine fuel injection systems // Wear. 2006. No.260. Pp. 562–566.
7. Roylance B.J. Ferrography – then and now // Tribology International. 2005. No.38. Pp. 857–862.
8. Yuan C.Q., Peng Z., Zhou X.C., Yan X.P. The characterization of wear transitions in sliding wear process contaminated with silica and iron powder // Tribology International. 2005. No.38. Pp. 129–143.
9. Chen G., Xie Y., Jiang L. Application Study of Color Feature Extraction on Ferrographic Image Clas-sifying and Particle Recognition // Zhongguo Jixie Gongcheng (China Mechanical Engineering). 2006. No.17(15). Pp. 1576–1580.
10. Lukas M., Yurko R.J., Anderson D.P. Retrode filter spectroscopy: A recently improved method to direct and analyze large wear and contaminant particles in fluids // Journal of ASTM International. 2005. No.2(3). Pp. 187–198.
11. Levy O., Elianz N. Failure Analysis and Condition Monitoring of an Open-Loop Oil System Using Ferrography // Tribology Letters. 2009. Pp. 1–13.
12. Johnson M., Spurlock M. Best practices: Strategic oil analysis: Setting the test slate // Tribology and Lubrication Technology. 2009. No.65(5). Pp. 20–27.
13. Eliaz N., Latanision R.M. Preventative maintenance and failure analysis of aircraft components // Corrosion Reviews. 2007. No.25(1–2). Pp. 107–144.
14. Wakeline G. Operations engineering. Maintenance. In order to continue running as lubricated. Wear particle analyses help in condition oriented maintenance // CIT Plus. 2007. No.10(1–2). Pp. 36–37.
15. Stodola J. The results of ferrography tests and their evaluation // Tribo Test. 2001. No.8(1). Pp. 73–83.
16. Krethe R. Possibilities and limits of ferrography // Tribologie und Schmierungstechnik. 2001. No.48(4). Pp. 48–54.
17. Morovek L. Ferrography – modern maintenance tool // Rock Products. 2000. No.103(6). Pp. 24.
18. Пинчук Е.Л., Маркова Л.В. Магнитные методы и устройства оперативной диагностики трибосо-пряжений (обзор) // Трение и износ. 2000. Т. 21. №2. С. 197–204.
19. Малышев В.С., Коновалова И.Н., Берестова Г.И. [и др.] Анализ частиц износа в системах смазки дизельных двигателей методом феррографии // Двигателестроение. 2002. №1. С. 42–43.
20. Сандуляк А.А., Полисмакова М.Н., Ершов Д.В. [и др.] Функциональная экстраполяция массово-операционной характеристики магнитофореза как основа прецизионного метода контроля феррочастиц // Измерительная техника. 2010. №8. С. 57–60.
21. Сандуляк А.В., Орешкин Д.В., Сандуляк А.А., Ершов Д.В. [и др.] Результаты нелимитированного сканирующего магнитоконтроля ферропримесей кварцевого песка // Строительные материалы. 2012. №4. С. 80–83.
22. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Ершов Д.В. [и др.] О новых принципах актуализации регламентов магнитоконтроля ферропримесей сырья строительных материалов (на примере кварцевого песка) // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №2. С. 68–72.
23. Сандуляк А.В., Ершов Д.В., Сандуляк А.А. [и др.] Роль фактора вовлечения частиц песка при реализации метода магнитоконтроля ферропримесей // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. №1. С. 31–35.

**Анна Александровна Сандуляк, Москва, Россия
Тел. раб.: +7(499)188-63-50; эл. почта: a.sandulyak@mail.ru*

© Сандуляк А.А., Ершов Д.В., Ершова В.А., Сандуляк А.В., 2013

Сандуляк А.А., Ершов Д.В., Ершова В.А., Сандуляк А.В. О характеристиках магнитоконтроля ферропримесей (подлежащих магнитной сепарации) сырья строительных материалов

doi: 10.5862/MCE.38.3

Characteristics of the magnetic control of separable ferrous impurities contained in raw construction materials

A.A. Sandulyak;
D.V. Ershov;
V.A. Ershova;
A.V. Sandulyak,

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
+7(499)188-63-50; e-mail: a.sandulyak@mail.ru

Key words

ferrous impurities; magnetic control; experimental-calculation model

Abstract

Currency of using the method of magnetic control of ferrous impurities for construction materials was noted. Especially it is important because of magnetic separators which are widely used for elimination of these impurities. There were shown the necessity of upgrading the present approach in order to realize the method of magnetic control.

For example, it is necessary to take into account not only the rest of ferrous impurities (that is inevitable after limited numbers of operations) but also a factor of involving sand particles. The concrete proposal how to develop the existing system of magnetic control of ferrous impurities in construction materials subjected to magnetic separation, is stated. The experimental-calculation model for such control is also shown. The main parameters of such model were estimated on the example of quartz sand and feldspar. The errors of standard methods of magnetic control were revealed for the first time.

References

1. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Ershov D.V. [et al.] *Glass and Ceramics*. 2012. No.6. Pp. 29–34. (rus)
2. GOST 23789-79. *Vyazhushchiye gipsovyye. Metody ispytaniy* [Gypsum binder. Test method]. (rus)
3. GOST 25216-82. *Talk i talkomagnezit. Metod opredeleniya zheleza* [Talc and talc-magnesite. Method for iron test]. (rus)
4. GOST 23672-79. *Dolomit dlia stekolnoy promyshlennosti. Tekhnicheskiye usloviya* [Dolomite for glass industry. Technical regulations]. (rus)
5. GOST 8253-79. *Mel khimicheski osazhdenny. Tekhnicheskiye usloviya* [Chemically precipitated chalk. Technical regulations]. (rus)
6. Macián V., Payri R, Tormos B., Montoro L. Applying analytical ferrography as a technique to detect failures in Diesel engine fuel injection systems. *Wear*. 2006. No.260. Pp. 562–566.
7. Roylance B.J. Ferrography – then and now. *Tribology International*. 2005. No.38. Pp. 857–862.
8. Yuan C.Q., Peng Z., Zhou X.C., Yan X.P. The characterization of wear transitions in sliding wear process contaminated with silica and iron powder. *Tribology International*. 2005. No.38. Pp. 129–143.
9. Chen G., Xie Y., Jiang L. Application Study of Color Feature Extraction on Ferrographic Image Clas-sifying and Particle Recognition. *Zhongguo Jixie Gongcheng (China Mechanical Engineering)*. 2006. No.17(15). Pp. 1576–1580.
10. Lukas M., Yurko R.J., Anderson D.P. Retrode filter spectroscopy: A recently improved method to direct and analyze large wear and contaminant particles in fluids. *Journal of ASTM International*. 2005. No.2(3). Pp. 187–198.
11. Levy O., Elianz N. Failure Analysis and Condition Monitoring of an Open-Loop Oil System Using Ferrography. *Tribology Letters*. 2009. Pp. 1–13.
12. Johnson M., Spurlock M. Best practices: Strategic oil analysis: Setting the test slate. *Tribology and Lubrication Technology*. 2009. No.65(5). Pp. 20–27.
13. Eliaz N., Latanision R.M. Preventative maintenance and failure analysis of aircraft components. *Corrosion Reviews*. 2007. No.25(1–2). Pp. 107–144.
14. Wakeline G. Operations engineering. Maintenance. In order to continue running as lubricated. Wear particle analyses help in condition oriented maintenance. *CIT Plus*. 2007. No.10(1–2). Pp. 36–37.

Sandulyak A.A., Ershov D.V., Ershova V.A., Sandulyak A.V. About characteristics of the magnetic control of separable ferrous impurities contained in raw construction materials

15. Stodola J. The results of ferrography tests and their evaluation. *Tribo Test*. 2001. No.8(1). Pp. 73–83.
16. Krethe R. Possibilities and limits of ferrography. *Tribologie und Schmierungstechnik*. 2001. No.48(4). Pp. 48–54.
17. Morovek L. Ferrography – modern maintenance tool. *Rock Products*. 2000. No.103(6). p. 24.
18. Pinchuk E.L., Markova L.V. *Journal of Friction and Wear*. 2000. Vol. 21. No.2. Pp. 197–204. (rus)
19. Malyshev V.S., Konovalova I.N., Berestova G.I. [et al.] *Dvigatellestroeniye*. 2002. No.1. Pp. 42–43. (rus)
20. Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Ershov D.V. [et al.]. *Measurement techniques*. 2010. No.8. Pp. 57–60. (rus)
21. Sandulyak A.V., Oreshkin D.V., Sandulyak A.A., Ershov D.V. [et al.] *Construction materials*. 2012. No.4. Pp. 80–83. (rus)
22. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Ershov D.V. [et al.]. *Industrial and Civil Engineering*. 2013. No.2. Pp. 68–72. (rus)
23. Sandulyak A.V., Ershov D.V., Sandulyak A.A. [et al.] *Construction materials, the equipment, technologies of XXI century*. 2013. No.1. Pp. 31–35. (rus).

Full text of this article in Russian: pp. 24–28