

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ

УДК 620.179.141

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-60-66

Подход к определению магнитных свойств частиц порошка для дефектоскопии*

Д. А. Сандуляк, кандидат технических наук, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Д. А. Головченко, аспирант, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

А. А. Сандуляк, доктор технических наук, профессор, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

А. В. Сандуляк, доктор технических наук, профессор, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

П. Н. Шкатов, доктор технических наук, профессор, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

А. С. Харин, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

В работе описан подход к определению магнитных свойств, а именно магнитной восприимчивости χ частиц порошка, используемого для дефектоскопии. Предложено использовать оригинальный, опробованный на ряде дисперсных образцов (в частности, магнетита) способ разреженного дисперсного образца. Приведены результаты сравнения данных, полученных для мелкодисперсного магнетита разными методами: ранее применяемым пондеромоторным и предлагаемым баллистическим. Определение магнитной восприимчивости $\langle\chi\rangle$ образцов магнетита баллистическим методом осуществлялось при напряженности поля $H = 120 \text{ kA/m}$ и разных значениях объемной доли γ магнетита в образце. Для сравнения приведены результаты определения $\langle\chi\rangle$ для образцов такого же магнетита, но полученных пондеромоторным методом при напряженности поля $H = 140 \text{ kA/m}$. Показано, что сравниваемые данные вполне согласуются между собой; искомый, близкий к линейному участок ограничивается тем же значением γ , то есть «излом» зависимости $\langle\chi\rangle$ от γ в обоих случаях практически приходится на $\gamma \approx 0,2$. Это делает возможным находить (при получении данных для соответствующих разреженных образцов) значения магнитной восприимчивости χ отдельных частиц. Для порошка, используемого в дефектоскопии, выполнены исследования на баллистической установке в диапазоне напряженности поля от $H = 22,5 \text{ kA/m}$ до $H = 135 \text{ kA/m}$ при разных значениях объемной доли γ магнитоактивных частиц в порошке. Установлено, что в указанном диапазоне H данные χ составили от $\chi = 3$ до $\chi = 1,2$. Для указанного диапазона H получена феноменологическая зависимость χ от H , оказавшаяся близкой к экспоненциальной убывающей.

Ключевые слова: магнитопорошковая дефектоскопия, магнитные свойства частиц, баллистический метод, пондеромоторный метод, разреженный дисперсный образец.

Введение

Магнитопорошковая дефектоскопия является одним из признанных методов неразрушающего контроля рельсов и колесных пар [1, 2], авиационных деталей [3] и иных объектов [4, 5], позволяющая по картине осаждений магнитных (магнитоактивных) частиц на изделиях (в том числе сложной формы), подвергаемых намагничиванию, оперативно выявлять дефекты: трещины, непровары сварных соединений и др.

В числе основных свойств используемых при дефектоскопии магнитоактивных порошков (и/или суспензий) можно назвать магнитные свойства, зависящие, главным образом, от магнитных свойств частиц их порошков. К сожалению, такие сведения до сих пор носят весьма ограниченный, преимущественно лишь оценочный, характер. В частности, по информации, приводимой фирмами – производителями магнитоактивных порошков, оценивать достаточно в полной мере их магнитные свойства затрудни-

© Сандуляк Д. А., Головченко Д. А., Сандуляк А. А., Сандуляк А. В., Шкатов П. Н., Харин А. С., 2025

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания в сфере науки (проект FSFZ-2024-0005).

тельно, во всяком случае количественно. Что же касается данных о магнитных свойствах частиц порошка, то такие исследования вообще отсутствуют.

Определение магнитных свойств образцов разных материалов, в том числе дисперсных (включая порошковых) с той или иной объемной долей γ частиц в образце, не вызывает сложностей посредством использования широко известных измерительных устройств-магнитометров: баллистических [6], вибрационных [7, 8], пондеромоторных [9], SQUID [10, 11] и др. [12–14]. Однако по получаемым данным (при обязательном упоминании о конкретном, важном в подобных случаях, значении γ , которое, к сожалению, в соответствующих исследованиях зачастую не приводится) судить о магнитных свойствах отдельных частиц можно лишь отчасти.

Одним из результативных подходов к определению магнитных свойств отдельных частиц является использование специально получаемой концентрационной зависимости, например, магнитной восприимчивости $\langle\chi\rangle$ дисперсного образца [15, 16], то есть зависимости $\langle\chi\rangle$ от γ . Тогда анализ этой зависимости, нацеленный прежде всего на идентификацию характерного, а именно ее линейного (начального) участка, послужил бы установлению данных о магнитной восприимчивости χ отдельных частиц (Sandulyak A.V., Sandulyak D.A., Ershova V.A., Sandulyak A.A., Polismakova M.N. (2019) A ferroparticle in a magnetizable disperse medium made up of particles of a like nature: specific aspects of susceptibility determination; Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Sandulyak A.V., Reptunov R.A., Kurmysheva A.Yu., Makhboroda M.A. (2022) Magnetic Susceptibility of Powders and Magnetic particles (Modified Inclusions of Iron Oxides) Carbon Sorbents).

Действительно, используя в экспериментах однотипные дисперсные образцы, но с отличающимися значениями γ , на получаемой затем зависимости $\langle\chi\rangle$ от γ прослеживается примечательный (чего, к сожалению, не отмечают исследователи такого рода зависимостей) начальный участок близкий к линейному. Именно этот свойственный такого рода зависимостям участок свидетельствует, что частицы в таком, т. е. искусственно разреженном, образце взаимно достаточно разобщены, и их магнитное влияние друг на друга существенно ослаблено. По сути этот (разреженный) образец должен отождествляться скорее не с образцом в его привычном понимании (когда речь идет, в частности, о его традиционном магнитном контроле), а с не-

сколько специфичным образом – дисперсной системой практически уединенных частиц.

В этом случае, т. е. когда, повторим, взаимное магнитное влияние таких разобщенных частиц практически утрачено (минимизировано), вполне оправданным становится применение для расчета магнитной восприимчивости χ отдельных частиц такой связи

$$\chi = \frac{\langle\chi\rangle}{\gamma}, \quad (1)$$

разумеется, при соблюдении требования использовать в расчетах данные $\langle\chi\rangle$ и γ из указанного начального (линейного) участка зависимости $\langle\chi\rangle$ от γ .

Этот подход, опробованный на ряде порошковых сред, в том числе магнетита (как модельной среды), реализован при выполнении таких исследований, в которых данные $\langle\chi\rangle$ получали (что следует оговорить) лишь одним из известных методов – пондеромоторным.

Надо полагать, аналогичный подход может быть применен (заметим, впервые) и к определению магнитной восприимчивости частиц порошка, используемого в дефектоскопии. При этом важно предварительно располагать информацией о том, что характер получаемой зависимости $\langle\chi\rangle$ от γ должен оставаться тем же, а именно с присущим этой зависимости линейным начальным участком (носителем информации о магнитных свойствах отдельных частиц) независимо от того, какой вид измерений используется для получения такой зависимости.

Цель исследования – обосновать подход к определению магнитных свойств частиц дисперсных материалов и применить его при контроле ферромагнитных порошковых и композитных материалов, в частности, порошка для дефектоскопии.

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 1, *a*, показаны результаты определения баллистическим методом магнитной восприимчивости $\langle\chi\rangle$ образцов мелкодисперсного магнетита при напряженности поля $H = 120$ кА/м при разных значениях объемной доли γ магнетита в образце (за счет смешивания фракции магнетита с фракцией мелкодисперсного песка). Здесь же, для сравнения, приведены уже упомянутые результаты [17] определения $\langle\chi\rangle$ для образцов такого же магнетита, но полученных пондеромоторным методом при напряженности поля $H = 140$ кА/м.

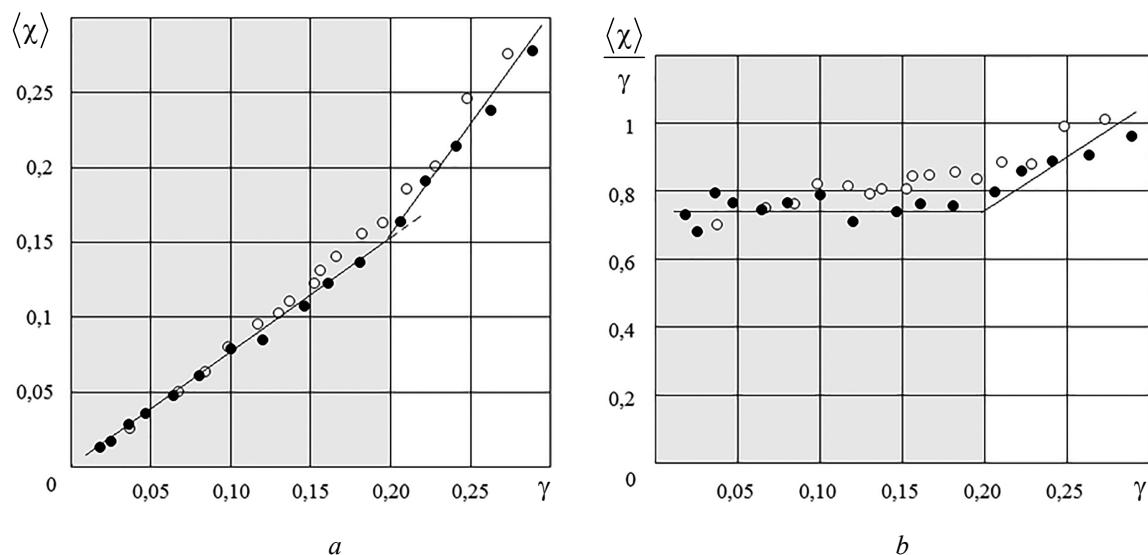


Рис. 1. Магнитная восприимчивость $\langle \chi \rangle$ образца дисперсного магнетита в зависимости от объемной доли γ частиц магнетита в образце (а) и приведенная величина этой восприимчивости $\langle \chi \rangle / \gamma$ (б); \circ – данные, полученные баллистическим методом при $H = 120$ кА/м; \bullet – данные, полученные пондеромоторным методом при $H = 140$ кА/м (затемненные области – данные, позволяющие определять магнитную восприимчивость отдельных частиц)

Fig. 1. Magnetic susceptibility $\langle \chi \rangle$ of disperse magnetite sample–independence of volume fraction γ of particles of magnetite in sample (a) and specific value of this susceptibility $\langle \chi \rangle / \gamma$ (b); \circ – data, obtained by ballistic method at $H= 120$ kA/m, \bullet – data, obtained by ponderomotive method at $H = 140$ kA/m (darkened area – data, allowing to determine magnetic susceptibility of isolated particles)

Видно, что сравниваемые данные на рисунке 1, а, несмотря на их небольшое различие (так как напряженность поля H при использовании баллистического метода немного ниже, чем пондеромоторного), тем не менее вполне согласуются между собой; искомый, близкий к линейному, участок ограничивается тем же значением γ , то есть «излом» зависимости $\langle \chi \rangle$ от γ в обоих случаях практически приходится на $\gamma \approx 0,2$.

Представление данных в несколько иных координатах, а именно с ординатой (рис. 1, б) в виде приведенной (формально) магнитной восприимчивости порошка $\langle \chi \rangle / \gamma$ усиливает сказанное. Так, до указанной величины $\gamma \approx 0,2$ значения $\langle \chi \rangle / \gamma$ сохраняются практически неизменными, подтверждая тем самым оговоренную выше правомочность расценивать эти данные $\langle \chi \rangle / \gamma$ как искомые данные χ – в соответствии с (1); здесь, то есть при $H = 120\dots 140$ кА/м, $\chi \approx 0,73\dots 0,79$.

Таким образом, полагаясь на возможность квалификации таких достаточно разреженных дисперсных образцов ($\gamma \leq 0,2$), как системы практически уединенных частиц (начальный линейный участок зависимости $\langle \chi \rangle$ от γ на ри-

сунке 1, а, или, что то же, – горизонтальный участок зависимости $\langle \chi \rangle / \gamma$ от γ на рисунке 1, б), можно по любому из этих результатов (предпочтительно по данным их аппроксимации) получить искомые значения χ .

Что касается порошка, используемого для дефектоскопии (торговая марка Magnaflux 7c), то на рисунке 2 показаны данные по определению его магнитной восприимчивости $\langle \chi \rangle$ (баллистическим методом). Опыты проведены при разных значениях напряженности поля H : 22,5; 45; 90 и 135 кА/м (для $H = 45$ и 90 кА/м выполнялись по две серии идентичных опытов, подтверждающих хорошую воспроизводимость результатов). На рисунке 2 заметно, что в отличие от магнетита (см. рис. 1) здесь линейными можно считать более протяженные участки зависимостей $\langle \chi \rangle$ от γ (по меньшей мере до $\gamma \approx 0,3$). Несколько большее значение γ , при котором зависимость должна претерпевать «излом», чем для порошка магнетита (см. рис. 1), обусловлена, видимо, тем, что порошок, используемый для дефектоскопии, уже изначально является разреженным, содержащим помимо ферромагнитного компонента полимерную составляющую, частицы красителя и др.

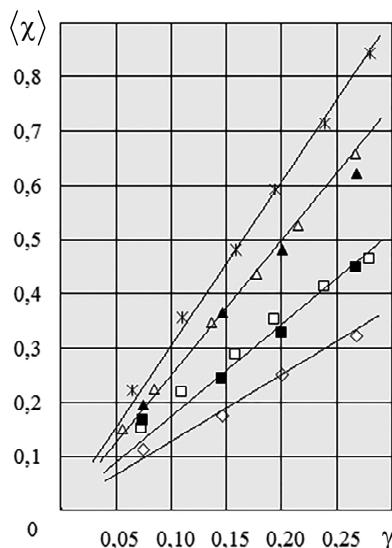


Рис. 2. Влияние объемной доли γ магнитоактивных частиц в образце порошка Magnaflux 7с (для дефектоскопии) на магнитную восприимчивость $\langle\chi\rangle$ образца при различной напряженности поля: $H = 22,5$ кА/м (точки \circledast), $H = 45$ кА/м (точки \blacktriangle и Δ для двух идентичных серий опытов), $H = 90$ кА/м (точки \blacksquare и \square для двух идентичных серий опытов), $H = 135$ кА/м (точки \lozenge)

Fig. 2. Effect of the volume fraction of magnetooactive particles in a sample of Magnaflux 7c powder (for flaw detection) on the magnetic susceptibility $\langle\chi\rangle$ of the sample at different field strength: $H = 22,5$ kA/m (points \circledast), $H = 45$ kA/m (points \blacktriangle and Δ for both identical series of experiments), $H = 90$ kA/m (points \blacksquare and \square for both identical series of experiments), $H = 135$ kA/m (points \lozenge)

Полученная полевая зависимость магнитной восприимчивости частиц χ (рис. 3, а), представленная в полулогарифмических координатах (рис. 3, б), достаточно хорошо квазилинеаризуется, что свидетельствует о ее экспоненциальном виде (по меньшей мере в избранном диапазоне H и, возможно, за его пределами)

$$\chi = Ae^{-kH} \quad (2)$$

при $A = 3,6$, $k = 0,008$ м/кА, что наряду с непосредственно получаемой зависимостью (см. рис. 3, а) позволяет располагать данными χ для других значений H (в оговоренном диапазоне H).

Выводы

Получены концентрационные зависимости магнитной восприимчивости $\langle\chi\rangle$ дисперсных образцов магнетита, а также порошка для дефектоскопии.

Показано наличие начального линейного участка зависимости $\langle\chi\rangle$ от объемной доли γ магнитовосприимчивых частиц в образце. Это делает возможным находить (при получении

данных для соответствующих разреженных образцов) значения магнитной восприимчивости χ отдельных частиц.

Установлено, что для частиц дисперсного образца магнетита $\chi \approx 0,79$ при $H = 120$ кА/м, а для частиц дисперсного образца порошка, используемого в целях дефектоскопии, $\chi = 3$ при $H = 22,5$ кА/м; $\chi = 2,5$ при $H = 45$ кА/м; $\chi = 1,7$ при $H = 90$ кА/м; $\chi = 1,25$ при $H = 135$ кА/м. Для указанного диапазона H получена феноменологическая, оказавшаяся близкой к экспоненциальному убывающей, зависимость χ от H .

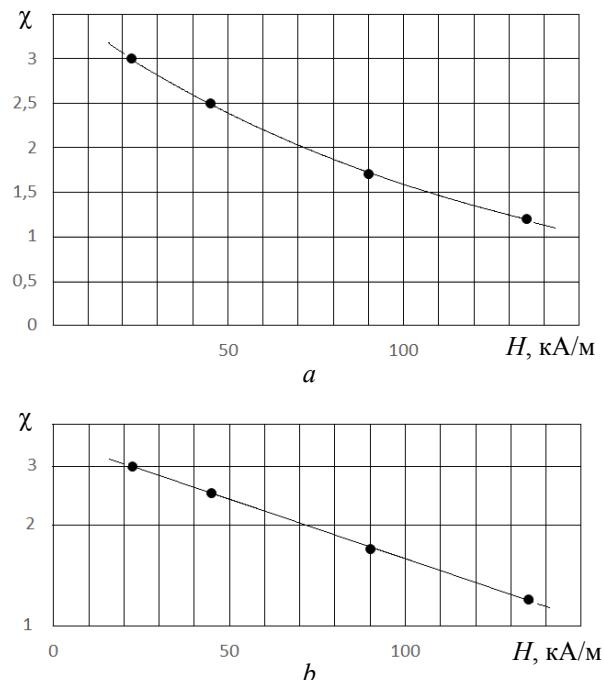


Рис. 3. Магнитная восприимчивость χ частиц используемого при дефектоскопии магнитоактивного порошка в зависимости от напряженности поля H : а – в обычных координатах; б – в полулогарифмических координатах (квазилинейаризация данных χ в таких координатах позволяет судить о приемлемости показательной функции в указанном диапазоне H)

Fig. 3. Magnetic susceptibility χ of particles of the magnetic powder used in flaw detection depending on the field strength H : a - in ordinary coordinates; b - in semi-logarithmic coordinates (quasi-linearization of χ data in such coordinates allows us to judge the acceptability of the exponential function in the specified H -range)

Описанный подход к получению данных магнитной восприимчивости частиц, как и сами данные, востребованы при решении требуемых задач магнитопорошковой дефектоскопии. Так, если оператор располагает выбором порошка (или суспензии) с изначально известными магнитными свойствами частиц, то преследуемая цель качественного контроля проявления воз-

можных дефектов изделий в тех или иных не всегда благоприятных условиях (имеются в виду условия намагничивания изделий) такой дефектоскопии становится более достижимой.

Библиографические ссылки

1. Марков А. А., Максимова Е. А. Анализ эффективности ультразвуковых и магнитных каналов дефектоскопических комплексов при контроле рельсов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 2. С. 22–32. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32
2. Отока А. Г., Холодилов О. В., Дащук П. А. Автоматизированный магнитопорошковый контроль колесных пар с использованием систем видеонаблюдения и нейросетевых технологий // Механика. Исследования и инновации. 2023. Вып. 16. С. 153–158.
3. Леднев И. С., Ходакова Е. А. Расчет режимов намагничивания деталей авиационной техники // Труды ВИАМ. 2024. Т. 9 (139). С. 83–92. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-83-92
4. Исследование дефектоскопических свойств порошковых композиций для повышения эффективности и надежности капиллярного контроля деталей сложной конфигурации / О. Г. Оспенникова, И. И. Кудинов, А. Н. Головков, С. И. Куличкова, Д. С. Скоробогатько // Дефектоскопия. 2020. № 3. С. 72–78. DOI: 10.31857/S0130308220030094
5. Исследование магнитных свойств частиц магнитомягких сплавов 5БДСР И 82К3ХСР / В. А. Светличный, В. Б. Балашов, И. Н. Лапин, А. Э. Соколов, В. Н. Черепанов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62, № 3. С. 26–30. DOI: 10.17223/00213411/62/3/26
6. Соленоид на основе лент высокотемпературного сверхпроводника для магнитокалорических применений / К. А. Колесов, А. В. Маширов, В. В. Коледов [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 11. С. 1–19. DOI: 10.30898/1684-1719.2024.11.31
7. Phillips Ja.P., Yazdani S., Highland W., Cheng R. (2022) A High Sensitivity Custom-Built Vibrating Sample Magnetometer. *Magnetochemistry*. Vol. 8, no. 8. P. 84. DOI: 10.3390/magnetochemistry8080084
8. Rodriguez L., Sapkota A., Alvarado J., Tate J.S., Geerts W.J. (2024) Computational modelling of a triaxial vibrating sample magnetometer. *AIP Advances*. Vol. 14, no. 2. DOI: 10.1063/9.0000787
9. Piepgras R., Zagar B.G. (2022) Komponenten der Messunsicherheit eines Faraday-Magnetometers. *Elektrotechnik und Informationstechnik*. Vol. 139, no. 6. Pp. 544–558. DOI: 10.1007/s00502-022-01043-y
10. Amorim C.O., Mohseni F., Dumas R.K., Amaral V.S., Amaral J.S. (2021) A geometry-independent moment correction method for the MPMS3 SQUID-based magnetometer. *Measurement Science and Technology*. Vol. 32, no. 10. P. 105602. DOI: 10.1088/1361-6501/ac0d23
11. Лабораторный стенд на основе СКВИД-магнитометров для исследования магнитных свойств наноматериалов / Ю. В. Масленников, В. Ю. Слободчиков, В. А. Крымов, А. Д. Суходровский // Журнал радиоэлектроники. 2023. № 1. DOI: 10.30898/1684-1719.2023.1.7
12. Metzger T.S., Tocatty Y., Avigad E., Yochelis S., Paltiel Y. (2020) Selective enantiomer purification using magnetic oriented interacting microparticles. *Separation and Purification Technology*. Vol. 239. P. 116501. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116501
13. Li W., Cai H., Kang Y., Ying Y., Yu J., Zheng J., Qiao L., Che S. (2019) High permeability and low loss bioinspired soft magnetic composites with nacre-like structure for high frequency applications. *Acta Materialia*. Vol. 167. Pp. 267–274. DOI: 10.1016/j.actamat.2019.01.035
14. Шортский И. А., Яковлев Н. Метод формирования материала-поглотителя электромагнитного излучения на основе магнитоуправляемых частиц Fe_3O_4 // Перспективные материалы. 2020. № 3. С. 70–79. DOI: 10.30791/1028-978X-2020-3-70-79
15. Sandulyak A.V., Sandulyak D.A., Ershova V.A., Sandulyak A.A., Polismakova M.N. (2019) A ferroparticle in a magnetizable disperse medium made up of particles of a like nature: Specific aspects of susceptibility determination. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Vol. 488. P. 1653651. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.165365
16. Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Sandulyak A.V., Repetunov R.A., Kurmysheva A.Yu., Makhiboroda M.A. (2022) Magnetic Susceptibility of Powders and Magnetic particles (Modified Inclusions of Iron Oxides) Carbon Sorbents. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 908. Pp. 103–111. DOI: 10.4028/p-w721c4
17. Sandulyak D.A., Sandulyak A.A., Kiselev D.O., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Kononov M.A., Ershova V.A. (2017) Determining the magnetic susceptibility of ferroparticles from the susceptibility of their dispersive samples. *Measurement Techniques*. Vol. 60 (9). Pp. 928–933. DOI: 10.1007/s11018-017-1295-z

References

1. Markov A.A., Maksimova E.A. (2019) [Analysis of the efficiency of ultrasonic and magnetic channels of flaw detection systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. Vol. 22, no. 2. Pp. 22–32. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32 (in Russ.).
2. Otoka A.G., Kholodilov O.V., Dashuk P.A. (2023) [Automated magnetic particle testing of wheelsets using video surveillance systems and neural network technologies]. *Mekhanika. Issledovaniya i innovacii*. Is. 16. Pp. 153–158 (in Russ.).
3. Lednev I.S., Hodakova E.A. (2024) [Raschet rezhimov namagnichivaniya detalej aviacionnoj tekhniki]. *Trudy VIAM*. Vol. 9(139). Pp. 83–92. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-83-92 (in Russ.).
4. Ospennikova O.G., Kudinov I.I., Golovkov A.N., Kulichkova S.I., Skorobogat'ko D.S. (2020) [Study of the defectoscope properties of powder composites to improve the efficiency and reliability of capillary control of complex configuration parts]. *Russian Journal of*

- Nondestructive Testing.* No. 3. Pp. 72-78. DOI: 10.31857/S0130308220030094 (in Russ.)
5. Svetlichnyj V.A., Balashov V.B., Lapin I.N., Sokolov A.E., Cherepanov V.N. (2019) [Study of magnetic properties of particles of soft magnetic alloys 5BDSR and 82K3KS]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika.* Vol. 62, no. 3. Pp. 26-30. DOI: 10.17223/00213411/62/3/26 (in Russ.)
6. Kolesov K.A., Mashirov A.V., Koledov V.V. (2024) [High-temperature superconductor tape solenoid for magnetocaloric applications]. *Zhurnal radioelektroniki.* No. 11. Pp. 1-19. DOI: 10.30898/1684-1719.2024.11.31 (in Russ.)
7. Phillips Ja.P., Yazdani S., Highland W., Cheng R. (2022) A High Sensitivity Custom-Built Vibrating Sample Magnetometer. *Magnetochemistry.* Vol. 8, no. 8. P. 84. DOI: 10.3390/magnetochemistry8080084
8. Rodriguez L., Sapkota A., Alvarado J., Tate J.S., Geerts W.J. (2024) Computational modelling of a triaxial vibrating sample magnetometer. *AIP Advances.* 2024. Vol. 14, no. 2. DOI: 10.1063/9.0000787
9. Piegras R., Zagar B.G. (2022) Komponenten der Messunsicherheit eines Faraday-Magnetometers. *Elektrotechnik und Informationstechnik.* Vol. 139, no. 6. Pp. 544-558. DOI: 10.1007/s00502-022-01043-y
10. Amorim C.O., Mohseni F., Dumas R.K., Amaral V.S., Amaral J.S. (2021) A geometry-independent moment correction method for the MPMS3 SQUID-based magnetometer. *Measurement Science and Technology.* Vol. 32, no. 10. Pp. 105602. DOI: 10.1088/1361-6501/ac0d23
11. Maslenikov Yu.V., Slobodchikov V.Yu., Krymov V.A., Suhodrovskij A.D. (2023) [Laboratory stand based on SQUID magnetometers for studying magnetic properties of nanomaterials]. *Zhurnal radioelektroniki.* No. 1. DOI: 10.30898/1684-1719.2023.1.7 (in Russ.).
12. Metzger T.S., Tocatty Y., Avigad E., Yochelis S., Paltiel Y. (2020) Selective enantiomer purification using magnetic oriented interacting microparticles. *Separation and Purification Technology.* Vol. 239. P. 116501. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116501
13. Li W., Cai H., Kang Y., Ying Y., Yu J., Zheng J., Qiao L., Che S. (2019) High permeability and low loss bioinspired soft magnetic composites with nacre-like structure for high frequency applications. *Acta Materialia.* Vol. 167. Pp. 267-274. DOI: 10.1016/j.actamat.2019.01.035
14. Shortskij I.A., Yakovlev N. (2020) [Method of forming an absorbent material for electromagnetic radiation based on magnetically controlled Fe₃O₄ particles]. *Perspektivnye materialy.* No. 3. Pp. 70-79. DOI: 10.30791/1028-978X-2020-3-70-79 (in Russ.)
15. Sandulyak A.V., Sandulyak D.A., Ershova V.A., Sandulyak A.A., Polismakova M.N. (2019) A ferroparticle in a magnetizable disperse medium made up of particles of a like nature: Specific aspects of susceptibility determination. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* Vol. 488. P. 1653651. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.165365
16. Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Sandulyak A.V., Repetunov R.A., Kurmysheva A.Yu., Makhiboroda M.A. (2022) Magnetic Susceptibility of Powders and Magnetic particles (Modified Inclusions of Iron Oxides) Carbon Sorbents. *Applied Mechanics and Materials.* Vol. 908. Pp. 103-111. DOI: 10.4028/p-w721c4
17. Sandulyak D.A., Sandulyak A.A., Kiselev D.O., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Kononov M.A., Ershova V.A. (2017) Determining the magnetic susceptibility of ferroparticles from the susceptibility of their dispersive samples. *Measurement Techniques.* Vol. 60 (9). Pp. 928-933. DOI: 10.1007/s11018-017-1295-z

Approach to Magnetic Property Determination of Powder Particles for Flaw Detection

D.A. Sandulyak, PhD in Engineering, MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

D.A. Golovchenko, Post-graduate, MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

A.A. Sandulyak, DSc in Engineering. Professor, MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

A.V. Sandulyak, DSc in Engineering. Professor, MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

P.N. Shkatov, DSc in Engineering. Professor, MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

A.S. Kharin, MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

The paper describes an approach to magnetic property determination, namely, magnetic susceptibility of χ particles of a powder used for flaw detection. It is proposed to use the original method of a sparse dispersed sample tested on a number of dispersed samples (in particular, magnetite). The results of data comparison obtained for finely dispersed magnetite by different methods: previously applied ponderomotive method and the proposed ballistic method, are given. Magnetic susceptibility $\langle\chi\rangle$ of magnetite samples is determined by ballistic method at field strength $H = 120$ kA/m and different values of volume fraction γ of magnetite in a sample. Here, the results of $\langle\chi\rangle$ determination for samples of the same magnetite, but obtained by the ponderomotive method, with a field strength $H = 140$ kA/m, are given for comparison. It is shown that the compared data are quite consistent with each other; the desired, close to linear section is limited to the same γ value, i.e. the "inflection" of γ -dependence of $\langle\chi\rangle$ in both cases practically falls on the $\gamma \approx 0.2$. This makes it possible to find (when obtaining data for the corresponding sparse samples) the values of magnetic susceptibility χ of individual particles. For the powder used in flaw detection, studies were carried out on a ballistic installation in the field strength range $H = 22.5-135$ kA/m at different values of the volume fraction γ of magnetoactive particles in the powder. It was found that within the present H range, χ values fall within the range of

$H = 120$ kA/m and different values of volume fraction γ of magnetite in a sample. Here, the results of $\langle\chi\rangle$ determination for samples of the same magnetite, but obtained by the ponderomotive method, with a field strength $H = 140$ kA/m, are given for comparison. It is shown that the compared data are quite consistent with each other; the desired, close to linear section is limited to the same γ value, i.e. the "inflection" of γ -dependence of $\langle\chi\rangle$ in both cases practically falls on the $\gamma \approx 0.2$. This makes it possible to find (when obtaining data for the corresponding sparse samples) the values of magnetic susceptibility χ of individual particles. For the powder used in flaw detection, studies were carried out on a ballistic installation in the field strength range $H = 22.5-135$ kA/m at different values of the volume fraction γ of magnetoactive particles in the powder. It was found that within the present H range, χ values fall within the range of

$\chi = 3-1.2$. For this H range, a phenomenological dependence of χ and H was obtained, which turned out to be close to exponential decreasing.

Keywords: magnetic particle flaw detection, magnetic properties of particles, ballistic method, ponderomotive method, sparse dispersed sample.

Получено 14.03.2025

Образец цитирования

Подход к определению магнитных свойств частиц порошка для дефектоскопии / Д. А. Сандуляк, Д. А. Головченко, А. А. Сандуляк, А. В. Сандуляк, П. Н. Шкатов, А. С. Харин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 2. С. 60–66. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-60-66

For Citation

Sandulyak D.A., Golovchenko D.A., Sandulyak A.A., Sandulyak A. V., Shkatov P.N., Kharin A.S. (2025) [Approach to Magnetic Property Determination of Powder Particles for Flaw Detection]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 2, pp. 60-66. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-60-66 (in Russ.)