

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

Part 7: Method of measurement of the coercivity (up to 160 kA/m) of magnetic materials in an open magnetic circuit

Matériaux magnétiques –

Partie 7: Méthode de mesure de la coercitivité (jusqu'à 160 kA/m) des matériaux magnétiques en circuit magnétique ouvert



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2019 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: sales@iec.ch.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

Part 7: Method of measurement of the coercivity (up to 160 kA/m) of magnetic materials in an open magnetic circuit

Matériaux magnétiques –

Partie 7: Méthode de mesure de la coercitivité (jusqu'à 160 kA/m) des matériaux magnétiques en circuit magnétique ouvert

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.030; 17.220.20

ISBN 978-2-8322-6385-3

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor. Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.
--

CONTENTS

FOREWORD.....	3
1 Scope.....	5
2 Normative references	5
3 Terms and definitions	5
4 Principle of the method.....	7
5 Test specimen	8
6 Solenoid	8
7 Compensation for the earth's magnetic field and static and dynamic magnetic noise fields	8
8 Magnetic shielding of the measurement region	8
9 Measurement.....	8
9.1 Magnetization	8
9.2 Measuring methods.....	9
9.2.1 General	9
9.2.2 Method A.....	9
9.2.3 Method B.....	10
9.3 Determination of coercivity	11
9.4 Reproducibility	12
10 Test report.....	13
Annex A (normative) Precautions to be taken for measurements of coercivity below 40 A/m, with a complex shaped test specimen and some special cases	14
A.1 Coercivity below 40 A/m.....	14
A.2 Coercivity measurement of test specimens with complex shapes	14
A.3 Optimization of the amplitude and time of the magnetizing cycle for a test specimen of soft magnetic material	14
A.4 Mechanical stress and heating of the test specimen in the solenoid	14
Annex B (informative) Method C with a VSM (Vibrating Sample Magnetometer).....	15
Bibliography.....	17
Figure 1 – Demagnetizing $B(H)$ and $J(H)$ curves from saturation	6
Figure 2 – Circuit diagram for Methods A and B	7
Figure 3 – Method A, magnetic flux sensing probe: Hall probe	9
Figure 4 – Method A, magnetic flux sensing probe: differential fluxgate probe	10
Figure 5 – Method B, magnetic flux sensing probe: differential fluxgate probe	11
Figure 6 – Magnetic polarisation J over the length L of a cylindrical rod	12
Figure B.1 – Schematic diagram of Method C with a VSM.....	15

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS –

Part 7: Method of measurement of the coercivity (up to 160 kA/m) of magnetic materials in an open magnetic circuit

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60404-7 has been prepared by IEC technical committee 68: Magnetic alloys and steels.

This second edition cancels and replaces the first published in 1982. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) Clause 1: The scope includes a more detailed description of the magnetic materials which applies to this standard;
- b) Clause 4: Figure 2 – circuit diagram for methods A and B was simplified and the fluxgate probes inside the solenoid have been added;
- c) Clause 7: Compensation for the earth's magnetic field and for static and dynamic magnetic noise fields has been added;

- d) Clause 8: Magnetic shielding of the measuring region has been added;
- e) 9.2.2: The measuring methods for local and integral measurement of the flux in the test specimen have been separated and the limitations in size and shape of the test specimen have been considered.
- f) 9.3: The method C with a VSM (Vibrating Sample Magnetometer) has been moved from 9.3 to the Annex B.
- g) The term "complex shaped test specimen" has been replaced in several clauses by "test specimen different from ellipsoids".
- h) The character of Annex A has been changed from "informative" to "normative".

The text of this International Standard is based on the following documents:

CDV	Report on voting
68/596/CDV	68/608A/RVC

Full information on the voting for the approval of this International Standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This document has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all parts in the IEC 60404 series, published under the general title *Magnetic materials*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

MAGNETIC MATERIALS –

Part 7: Method of measurement of the coercivity (up to 160 kA/m) of magnetic materials in an open magnetic circuit

1 Scope

This part of IEC 60404 specifies a method of measurement of the coercivity of magnetic materials in an open magnetic circuit.

This document is applicable to all magnetic materials with coercivities from 0,2 A/m to 160 kA/m.

NOTE Examples of magnetic materials covered by this document are amorphous alloys, nanocrystalline alloys, all softmagnetic crystalline materials (e.g. Fe, FeSi-, CoFe- and FeNi-alloys), soft ferrites, hard metals, semi-hard magnetic alloys (e.g. FeCoTiAl-, FeCoV-, FeCrCo- and AlNiCo-alloys) [1]¹.

Special precautions are to be taken in measuring coercivities below 40 A/m, in materials with high conductivity and in test specimens which have a shape different from ellipsoids (see Annex A).

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

There are no normative references in this document.

3 Terms and definitions

For the purpose of this document, the following terms and definitions apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1

coercivity H_{cJ}

value of the coercive field strength in a material when the magnetic flux density, magnetic polarization or magnetization is brought from saturation by a monotonically changing magnetic field to zero

Note 1 to entry: The parameter that is varied should be stated, and the appropriate symbol used as follows: H_{cB} for the coercivity relating to the magnetic flux density, H_{cJ} for the coercivity relating to the magnetic polarization, H_{cM} for the coercivity relating to the magnetization. The first two symbols supersede H_{cB} and H_{cJ} respectively.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

4 Principle of the method

If a magnetic test specimen is placed in a uniform and unidirectional magnetic field then it will distort this magnetic field unless a condition that no flux (additional to that previously carried by the air space it now occupies) enters or emerges from the test specimen. This condition represents a state of complete demagnetization which occurs when a demagnetizing coercive magnetic field strength is applied to the test specimen such that the magnetic polarization is zero [2].

The test specimen is magnetized to saturation (J_s) and then the magnetic field is reduced smoothly without interruption to zero (J_r). Afterwards the polarity of the magnetic field is reversed and a demagnetizing field is increased until the magnetic polarization of the test specimen is zero. The applied magnetic field strength required to achieve this condition is measured and defined as the coercivity H_{cJ} of the test specimen (see Figure 1).

A magnetic flux sensing probe enables the detection of the condition of no distortion of a uniform magnetic field by the test specimen and provides the means for determining the coercivity.

For this measurement, the test specimen and the magnetic flux sensing probes are placed in an open magnetic circuit in the uniform and unidirectional magnetic field of a solenoid. The flux sensing probe should be placed as follows:

- inside the solenoid, close to the end of the test specimen (Method A – Hall probe, see Figure 3), or
- inside the solenoid, at a distance from the test specimen, depending on the size and permeability of the test specimen (Method A – differential fluxgate probe, see Figure 4), or
- outside the solenoid (Method B – differential fluxgate probe, see Figure 5).

The solenoid and measuring equipment shall be connected as shown in Figure 2.

NOTE There is an alternative way to use an axially vibrating search coil as magnetic sensing probe like Method A [3].

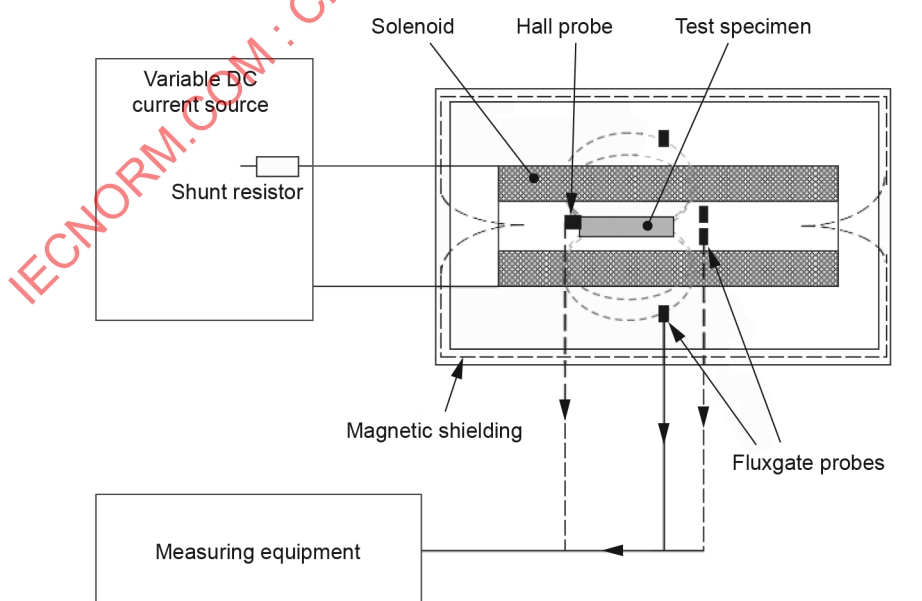


Figure 2 – Circuit diagram for Methods A and B

Alternatively, the test specimen is placed at the centre of the gap of an electromagnet as in Method C, see Annex B.

5 Test specimen

The shape and the dimensions of the test specimen may be varied provided that they meet the following conditions:

- a) the test specimen can be placed inside the solenoid so that its major axis is coincident with the axis of the solenoid;
- b) the test specimen can be magnetized to saturation.

NOTE For the effects of shape and non-uniform magnetic properties of the test specimen refer to 9.2.2 and 9.3.

6 Solenoid

The magnetic field in the solenoid shall have the following specifications:

- a) the magnetic field strength in the solenoid over the volume of the test specimen shall not vary by more than $\pm 0,5$ %;
- b) an AC ripple of the magnetic field strength in the solenoid shall be less than $\pm 0,5$ % of the magnetic field strength.

7 Compensation for the earth's magnetic field and static and dynamic magnetic noise fields

The measurement of the coercivity of a test specimen of soft magnetic material can be distorted by the earth's magnetic field and by external static and dynamic magnetic noise fields. Compensation for these can be achieved either by:

- a) a suitable compensation system for the earth's magnetic field [4] or a magnetic shield placed around the measurement region, or
- b) the magnetic flux sensing probe for the measurement of the stray magnetic field of the test specimen is a differential fluxgate probe to suppress an influence of these uniform external magnetic fields (see Figures 4 and 5).

8 Magnetic shielding of the measurement region

The magnetic shielding shall be constructed from a high magnetic permeability material [1].

Any influence from the magnetic shielding on the magnetic field in the measurement region has to be compensated for.

After magnetizing the test specimen to saturation, the magnetic shielding must be completely demagnetized from the point of the magnetic remanence, to avoid light magnetizing of the test specimen by the residual field of the magnetic shielding. This residual magnetic field from the magnetic shielding inside the solenoid has to be smaller than 5 % of the measured stray magnetic field of the test specimen in the magnetic remanence. The demagnetizing field of the magnetic shielding shall not affect the test specimen, magnetically.

9 Measurement

9.1 Magnetization

The test specimen is magnetized to saturation in:

- a) the solenoid of the coercivity measuring device as in Method A and Method B, or
- b) a separate device which can be, for example, a system with a permanent magnet or an electromagnet, or a pulsed magnetizing coil.

Saturation is considered to be achieved when an increase of 50 % in the magnetizing field strength gives an increase in the coercivity of less than 1 %.

The saturation field shall be held long enough, usually 0,5 s, to ensure complete penetration of the material.

Magnetic materials having a low coercivity and a high electrical conductivity require a reduction of the magnetizing field from saturation to zero to be conducted very smoothly without interruptions. This is to avoid eddy currents in the test specimen, which demagnetize the test specimen and lead to a too low coercivity. The magnetizing field decay from magnetic saturation to zero shall be adjustable between 1 s and 40 s, depending on the magnetic permeability, electrical conductivity and thickness of the test specimen.

9.2 Measuring methods

9.2.1 General

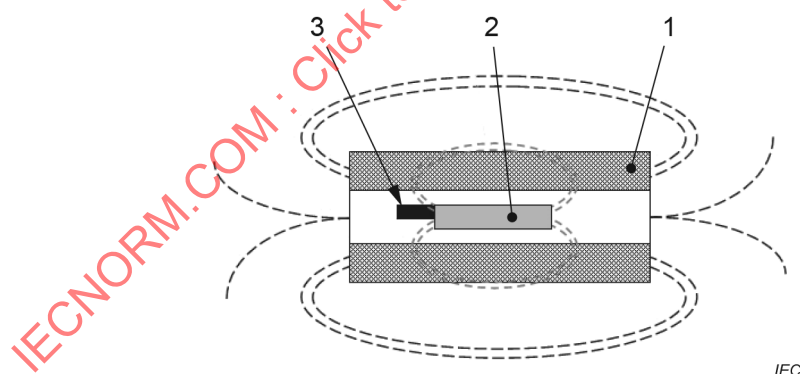
Two methods, A and B, can be used for the detection of a state of zero magnetic polarization in the test specimen during the demagnetization.

The magnetic field strength in the solenoid shall be measured with an accuracy equal to or better than $\pm 0,5$ %.

9.2.2 Method A

This method is based on the use of either:

- a) a magnetic flux sensing probe with a Hall probe placed near the end of the test specimen with its measurement axis at 90° to the axis of the solenoid (see Figure 3). The Hall probe shall be positioned off the axis and in the homogeneous region of the solenoid to give good sensitivity for the stray magnetic field of the test specimen and to suppress the sensitivity for the magnetic field of the solenoid at the same time, or



IEC

Key

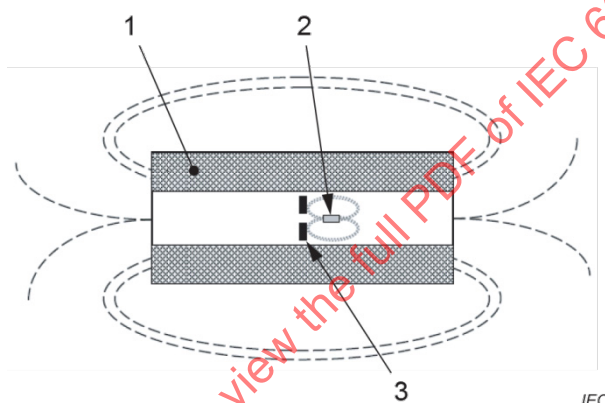
- | | |
|---|---------------|
| 1 | solenoid |
| 2 | test specimen |
| 3 | Hall probe |

Figure 3 – Method A, magnetic flux sensing probe: Hall probe

- b) a magnetic flux sensing probe with a differential fluxgate probe consisting of two single fluxgate sensors connected in series opposition, placed inside the solenoid. The distance between the fluxgate probes and the end of the test specimen is variable (see note below), depending on the size and permeability of the test specimen (see Figure 4). This is an integral measurement of the stray magnetic field divergence over the length of the test specimen, where the distance between the test specimen and the fluxgate probes is longer than the length of the test specimen. The distance between the test specimen and the fluxgate probes is a reasonable compromise between signal strength and the integral stray magnetic field measuring effect. By this differential method, the influence of uniform external magnetic fields is amply compensated for.

NOTE Practical experience in the measurement of very small and/or very soft magnetic materials determine the distance between the fluxgate probes and the test specimen of between 10 mm and 40 mm.

Magnetic flux sensing probes which measure the stray magnetic field of the test specimen at a very small distance from the test specimen, set limitations on the test specimen geometries. These systems have errors which are relevant to the shapes of the test specimen which are different from ellipsoids (see Figure 6) and to non-uniform magnetic properties over the volume of the test specimen.



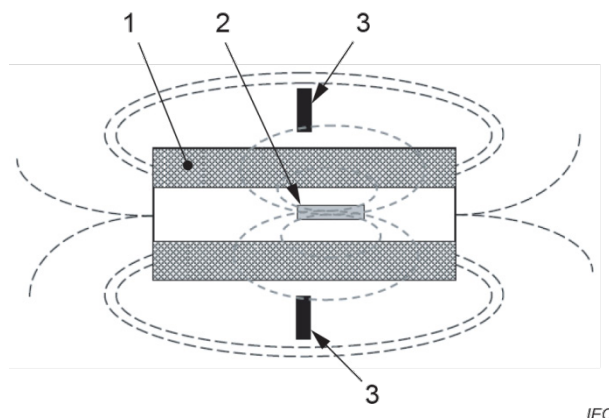
Key

- 1 solenoid
- 2 test specimen
- 3 differential fluxgate probe consisting of two single fluxgate sensors connected in series opposition

Figure 4 – Method A, magnetic flux sensing probe: differential fluxgate probe

9.2.3 Method B

This method is based on the use of a differential fluxgate probe consisting of two single fluxgate sensors, connected in series opposition, placed outside the solenoid. This is an integral measurement of the stray magnetic field of the test specimen (see Figure 5).

**Key**

- 1 solenoid
- 2 test specimen
- 3 differential fluxgate probe consisting of two single fluxgate sensors connected in series opposition

Figure 5 – Method B, magnetic flux sensing probe: differential fluxgate probe

By this differential method, the influence of uniform external magnetic fields is amply compensated for. The axis of the differential fluxgate probe is positioned at 90° to the magnetic field of the solenoid to measure only the stray magnetic field of the test specimen.

The large distance between the two single fluxgate sensors and the test specimen requires a high sensitivity of the fluxgate probes, usually 0,5 nT. They measure the integral of stray magnetic field divergence over the length of test specimen. The same condition applies to the magnetic inhomogeneity over the volume of the test specimen.

9.3 Determination of coercivity

The solenoid, in which the test specimen is placed, is connected to a variable DC current supply. The test specimen is magnetized to saturation and then the magnetic field is reduced smoothly without interrupting to zero. The demagnetizing current through the solenoid shall be increased continuously and slowly to the point at which no stray magnetic field of the test specimen is detected.

The value of this demagnetizing current shall be measured with a digital voltmeter connected across a shunt resistor (see Figure 2) giving an accuracy equal to or better than 0,5 %.

The current shall be measured for each of the two directions of the demagnetizing field of the solenoid.

The value of the coercivity shall be calculated from the relationship:

$$H_{cJ} = kI \quad (2)$$

where

H_{cJ} is the coercivity, in amperes per metre (A/m);

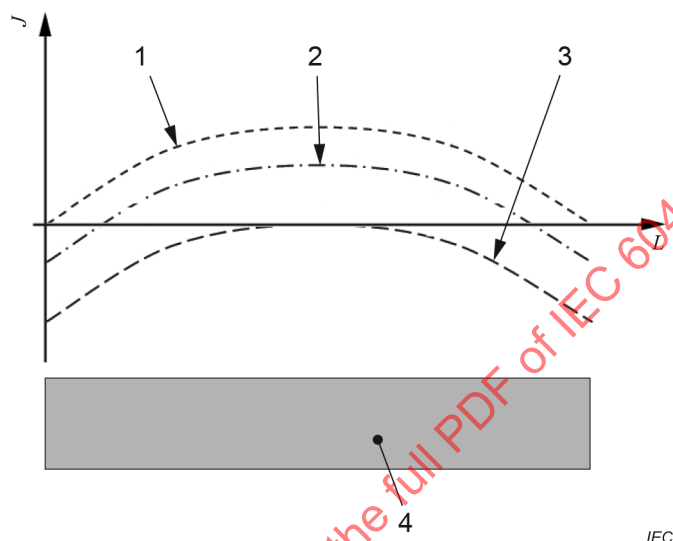
I is the mean value of the two currents of opposite polarity, in amperes (A);

k is magnetic field strength to current ratio for the solenoid, in per metre (1/m).

When method A is used, the measurement shall be made for each end of the test specimen, the value of the coercivity being taken as the mean of the two measurements. Test specimens which have a non-ellipsoidal shape or with inhomogeneous magnetic properties shall generally be measured at each end.

For materials having a coercivity greater than 1 kA/m, it is not necessary to make measurements for two directions of the magnetic field.

NOTE Method A is a localized measurement whereas Methods B and C (see Annex B) are integrated measurements. Therefore the results cannot be the same for a magnetic inhomogeneous test specimen or for a test specimen which has a non-ellipsoidal shape (see Figure 6).



Key

- 1 magnetic polarization J is zero at the ends of the rod; corresponding to Method A with local flux measurement
- 2 sum of the magnetic polarization J is zero over the length of the rod; corresponding to Method B and C with integral flux measurement
- 3 magnetic polarization J is zero at the centre of the rod
- 4 the test specimen as a cylindrical rod

Figure 6 – Magnetic polarisation J over the length L of a cylindrical rod

9.4 Reproducibility

Provided the foregoing procedures are carried out and the material has a uniform magnetic polarization, the reproducibility of the determination of the coercivity normally expected is less than:

- ± 10 % for coercivities from 0,2 A/m up to 5 A/m;
- ± 5 % for coercivities up to 50 A/m;
- ± 2 % for coercivities up to 1 kA/m;
- ± 1 % for coercivities up to 160 kA/m.

However, this reproducibility can be affected by non-uniform magnetic properties and the non-ellipsoidal shape of the test specimen.

10 Test report

The test report shall contain, as necessary:

- type and condition of the material;
- the shape and dimensions of the test specimen;
- the method of magnetizing to saturation;
- the measuring method and device used;
- the calculated value of the coercivity H_{cJ} ;
- the test temperature;
- the date of the test.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-7:2019

Annex A (normative)

Precautions to be taken for measurements of coercivity below 40 A/m, with a complex shaped test specimen and some special cases

A.1 Coercivity below 40 A/m

For materials having a coercivity below 40 A/m, the following precautions shall be observed:

- a) the measuring apparatus shall be set up in an environment free from strong magnetic fields and remote from masses of magnetic material;
- b) the ambient magnetic field shall be compensated for or the equipment shall be shielded to reduce the value of the field to below 0,5 A/m;
- c) care shall be taken to avoid the introduction of internal mechanical stresses during and after preparation of the test specimens;
- d) when using a Hall probe to measure coercivity below 10 A/m, it shall be checked that the magnetic field due to the Hall probe bias current does not affect the measurement.

A.2 Coercivity measurement of test specimens with complex shapes

The measurement of a complex shaped test specimen, different from ellipsoids, is only possible with an integral measurement according Method B. The influence of the complex shape on the coercivity can be further minimized by using the mean value from the two coercivity measurements on both ends of the test specimen.

A.3 Optimization of the amplitude and time of the magnetizing cycle for a test specimen of soft magnetic material

These two parameters can be optimized as a too high a magnetization amplitude heats up the solenoid and a too short a time produces eddy currents in the test specimen with high electrical conductivity.

The procedure of the optimization can be as follows:

Gradually reduce the magnetization amplitude from 200 kA/m to approximately 25 kA/m in decrements of 10 kA/m and perform an H_{cJ} measurement at each step at a constant magnetization time of 40 s. If the H_{cJ} value drops by more than 2 %, the minimum value for the magnetization amplitude is achieved. To guarantee the state of saturation, the determined minimum magnetization amplitude should be increased by 20 %.

Reduce the magnetization time from 40 s to 1 s in decrements of 5 s to 10 s and perform an H_{cJ} measurement at each step to the previously determined minimum magnetization amplitude (+20 %). If the H_{cJ} value drops by more than 2 %, the minimum value for the magnetization time is achieved. To obtain an optimized state of test, the determined minimum magnetization time should be increased by 20 %.

A.4 Mechanical stress and heating of the test specimen in the solenoid

During the measurement the test specimen shall not be stressed either mechanically or thermally since both may change the coercivity. The temperature of the test specimen shall be maintained within $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ during the measurement of coercivity. If the test specimen becomes heated in the solenoid, it shall be air cooled in the solenoid.

Annex B (informative)

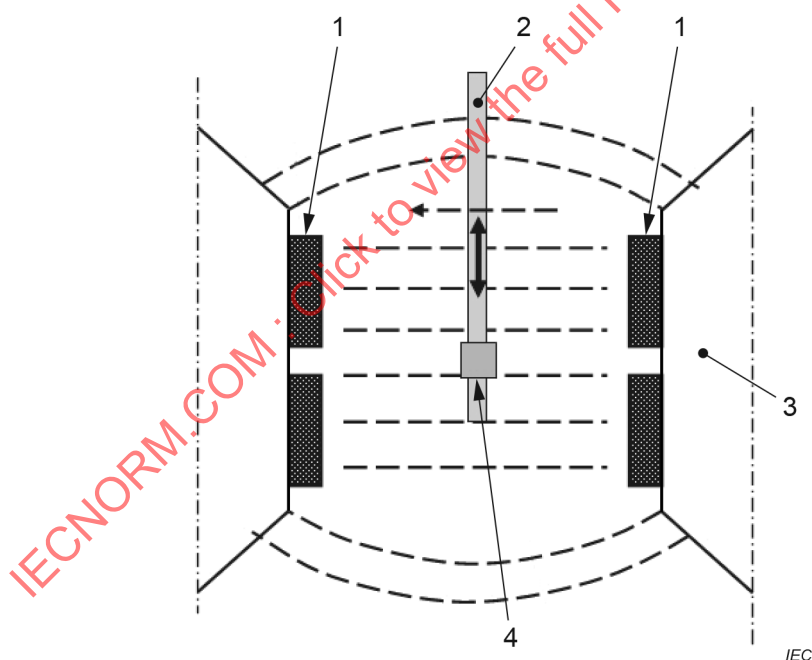
Method C with a VSM (Vibrating Sample Magnetometer)

The Method C with a VSM (Vibrating Sample Magnetometer) [5], [6] is used for the measurement of the coercivity of magnetic materials in an open magnetic circuit. The difference between Method A and Method B is the magnetizing circuit. Instead of a solenoid an electromagnet with yokes is used and the measuring range of the coercivity is limited to a minimum of 2 kA/m.

In a VSM, a test specimen is located within suitably placed search coils, and is made to undergo sinusoidal motion, i.e., mechanically vertical vibrated. The resulting magnetic flux variations induce an alternating voltage in the search coils that is proportional to the magnetic moment of the test specimen. The magnetic field is generated by an electromagnet [5], [6].

The magnetic field at which zero alternating voltage, induced in the search coils by the polarization of the test specimen, is detected (see Figure B.1), represents the coercivity of the sample.

The VSM should be calibrated with a known standard test specimen of the same size and shape as the test specimen to be measured.



Key

- 1 search coils
- 2 vertical vibrating test specimen holder
- 3 electromagnet pole pieces
- 4 test specimen

Figure B.1 – Schematic diagram of Method C with a VSM

The measurement with the VSM is an integral measurement of the stray magnetic field of the test specimen, when the volume of the test specimen is in the homogeneous region of the search coils and in the centre region of the search coils. The VSM is only applicable to small test specimens (e.g. 5 mm x 5 mm x 5 mm).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-7:2019

Bibliography

- [1] Rainer Hilzinger, Werner Rodewald, *Magnetic Materials – Fundamentals, Products, Properties, Applications* -, VAC 2013, ISBN-10: 3895783528
- [2] H. Czichos, T. Saito, L. Smith, *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*, 2006
- [3] EN 10330-2015: *Method of measurement of the coercivity of magnetic materials in an open magnetic circuit*
- [4] Heiko Ahlers, *Design of transversal earth magnetic field compensating coil systems and their comparison with conventional systems*, PTB -Mitteilungen 109, pp. 131-137, 1999
- [5] S. Foner, *Versatile and Sensitive Vibration-Sample Magnetometer*, vol.30, no.7, pp. 548-557, 1959
- [6] IEC TR 62797, *International comparison of measurements of the magnetic moment using vibrating sample magnetometers (VSM) and superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometers*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-7:2019

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	19
1 Domaine d'application	21
2 Références normatives	21
3 Termes et définitions	21
4 Principe de la méthode	23
5 Epreuve d'essai	24
6 Solénoïde	24
7 Compensation du champ magnétique terrestre et des champs magnétiques parasites statiques et dynamiques	24
8 Blindage magnétique de la zone de mesure	24
9 Mesurage	25
9.1 Aimantation	25
9.2 Méthodes de mesure	25
9.2.1 Généralités	25
9.2.2 Méthode A	25
9.2.3 Méthode B	27
9.3 Mesurage de la coercitivité	27
9.4 Reproductibilité	28
10 Rapport d'essai	29
Annexe A (normative) Précautions à prendre pour le mesurage de la coercitivité au-dessous de 40 A/m, avec une éprouvette de forme complexe et certains cas particuliers	30
A.1 Coercitivité au-dessous de 40 A/m	30
A.2 Mesurage de la coercitivité des éprouvettes de formes complexes	30
A.3 Optimisation de l'amplitude et du temps du cycle d'aimantation pour une éprouvette du matériau magnétique doux	30
A.4 Contrainte mécanique et échauffement de l'éprouvette dans le solénoïde	31
Annexe B (informative) Méthode C avec un VSM (magnétomètre à échantillon vibrant)	32
Bibliographie	34
Figure 1 – Courbes de désaimantation $B(H)$ et $J(H)$ depuis la saturation	22
Figure 2 – Schéma du circuit pour les Méthodes A et B	23
Figure 3 – Méthode A, sonde sensible au flux magnétique: sonde de Hall	26
Figure 4 – Méthode A, sonde sensible au flux magnétique: sonde différentielle de flux à seuil	26
Figure 5 – Méthode B, sonde sensible au flux magnétique: sonde différentielle de flux à seuil	27
Figure 6 – Polarisation magnétique J sur la longueur L d'une tige cylindrique	28
Figure B.1 – Schéma de la Méthode C avec un VSM	32

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 7: Méthode de mesure de la coercitivité (jusqu'à 160 kA/m) des matériaux magnétiques en circuit magnétique ouvert

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 60404-7 a été établie par le comité d'études 68 de l'IEC: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 1982. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) Article 1: le domaine d'application inclut une description plus complète des matériaux magnétiques qui s'applique à la présente norme;
- b) Article 4 – Figure 2: le schéma du circuit pour les Méthodes A et B a été simplifié et les sondes de flux à seuil à l'intérieur du solénoïde ont été ajoutées;

- c) Article 7: la compensation du champ magnétique terrestre et des champs magnétiques parasites statiques et dynamiques a été ajoutée;
- d) Article 8: le blindage magnétique de la zone de mesure a été ajouté;
- e) 9.2.2: les méthodes de mesure pour le mesurage local et intégral du flux dans l'éprouvette ont été séparées, et les limites de taille et de forme de l'éprouvette ont été prises en compte;
- f) 9.3: la Méthode C avec un VSM (magnétomètre à échantillon vibrant) a été déplacée du 9.3 à l'Annexe B;
- g) le terme "éprouvette de forme complexe" a été remplacé dans plusieurs articles par le terme "éprouvette différente des ellipsoïdes";
- h) le statut de l'Annexe A a été modifié; cette annexe n'est plus "informative" mais "normative".

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
68/596/CDV	68/608A/RVC

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette Norme internationale.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60404, publiées sous le titre général *Matériaux magnétiques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 7: Méthode de mesure de la coercitivité (jusqu'à 160 kA/m) des matériaux magnétiques en circuit magnétique ouvert

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60404 spécifie une méthode de mesure de la coercitivité des matériaux magnétiques en circuit magnétique ouvert.

Le présent document est applicable à l'ensemble des matériaux magnétiques dont les valeurs de coercitivité sont comprises entre 0,2 A/m et 160 kA/m.

NOTE Les alliages amorphes, les alliages nanocristallins, tous les matériaux magnétiques doux cristallins (par exemple, les alliages Fe, FeSi, CoFe et FeNi), les ferrites doux, les métaux durs, les alliages magnétiques mi-durs (par exemple, les alliages FeCoTiAl, FeCoV, FeCrCo et AlNiCo) sont des exemples de matériaux magnétiques couverts par le présent document [1]¹.

Des précautions particulières sont à prendre lors du mesurage des valeurs de coercitivité au-dessous de 40 A/m dans des matériaux qui présentent une conductivité élevée et dans des éprouvettes qui ont une forme différente des ellipsoïdes (voir Annexe A).

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

Le présent document ne contient aucune référence normative.

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1

coercitivité H_{cJ}

valeur de l'intensité du champ coercitif dans un matériau lorsque l'induction magnétique, la polarisation magnétique ou la magnétisation quitte la saturation sous l'action d'un champ magnétique qui varie de façon monotone

Note 1 à l'article: Il convient de spécifier le paramètre qui varie et d'utiliser le symbole adéquat: H_{cB} pour la coercitivité relative à l'induction magnétique, H_{cJ} pour la coercitivité relative à la polarisation magnétique, H_{cM} pour la coercitivité relative à la magnétisation. Les deux premiers symboles remplacent respectivement H_{cB} et H_{cJ} .

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

3.2 désaimanter

réduire l'induction magnétique d'un matériau aimanté le long de la courbe de désaimantation

Note 1 à l'article: On distingue respectivement les coercitivités H_{cB} et H_{cJ} selon que le cycle d'hystérésis est défini dans le système $B = f(H)$ ou $J = f(H)$ (voir Figure 1). Il peut être démontré que pour les matériaux possédant une perméabilité différentielle élevée dans la région $B = 0$, la différence entre les coercitivités H_{cJ} et H_{cB} est faible, car:

$$H_{cB} = H_{cJ} \left(1 - \mu_0 \frac{\Delta H}{\Delta B} \right) \quad (1)$$

où

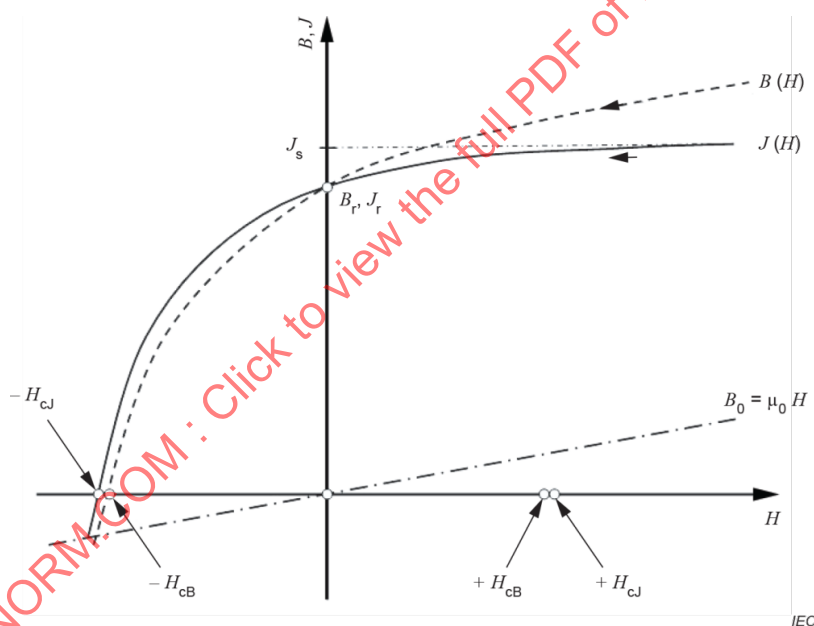
H_{cB} est la coercitivité relative à l'induction magnétique, en ampères par mètre;

H_{cJ} est la coercitivité relative à la polarisation magnétique, en ampères par mètre;

ΔB est la variation de l'induction magnétique (à $B = 0$), en teslas;

ΔH est la variation correspondante de l'intensité de champ magnétique, en ampères par mètre;

μ_0 est la constante magnétique ($4\pi \times 10^{-7}$ en henrys par mètre).



Légende

- B induction magnétique, en teslas
- J polarisation magnétique, en teslas
- H intensité du champ magnétique, en ampères par mètre
- B_r induction magnétique rémanente, en teslas
- B_0 induction dans l'air, en teslas
- J_r polarisation magnétique rémanente, en teslas
- J_s polarisation magnétique à saturation, en teslas

Figure 1 – Courbes de désaimantation $B(H)$ et $J(H)$ depuis la saturation

4 Principe de la méthode

Lorsqu'une éprouvette ferromagnétique est placée dans un champ magnétique unidirectionnel et uniforme, l'éprouvette va perturber le champ magnétique à moins qu'une condition d'absence de flux (additionnel à celui préalablement présent dans le volume d'air occupé par l'éprouvette) ne pénètre dans l'éprouvette ou n'émerge de l'éprouvette. Cette condition correspond à une désaimantation complète qui apparaît lorsque le champ magnétique coercitif désaimantant est appliqué à l'éprouvette de façon à ce que la polarisation magnétique soit nulle [2].

L'éprouvette est aimantée jusqu'à saturation (J_s), puis le champ magnétique est réduit progressivement sans interruption jusqu'à zéro (J_r). Ensuite, la polarité du champ magnétique est inversée et un champ de désaimantation est augmenté jusqu'à ce que la polarisation magnétique de l'éprouvette soit nulle. La valeur de l'intensité du champ magnétique appliqué exigée pour atteindre cette condition est mesurée et déterminée comme la coercitivité de l'éprouvette H_{cJ} (voir Figure 1).

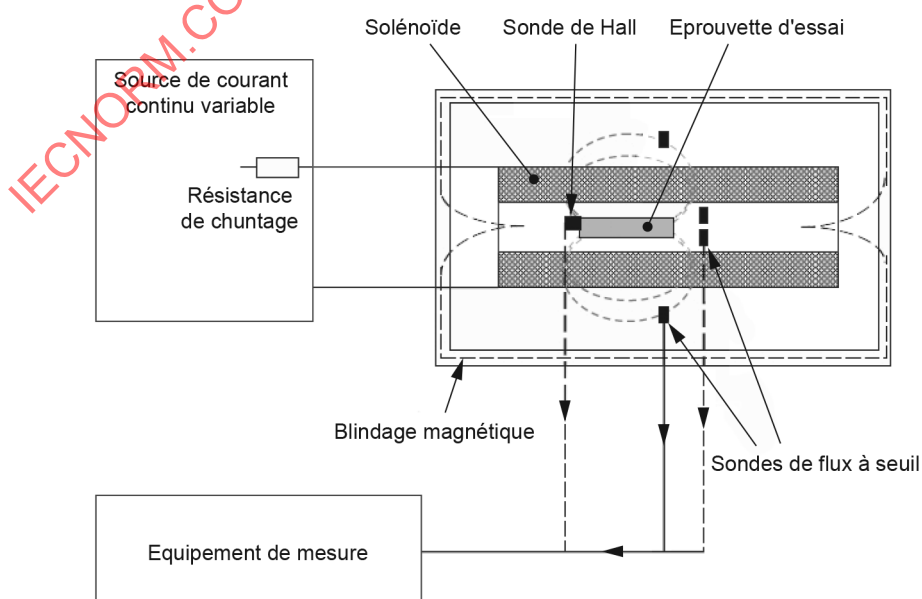
Une sonde sensible au flux magnétique permet de détecter la condition de non-distorsion d'un champ magnétique uniforme par l'éprouvette et permet ainsi de déterminer la coercitivité.

Pour ce mesurage, l'éprouvette et les sondes sensibles au flux magnétique sont placées dans un circuit magnétique ouvert dans le champ magnétique uniforme et unidirectionnel d'un solénoïde. Il convient de placer la sonde sensible au flux magnétique comme suit:

- à l'intérieur du solénoïde, près de l'extrémité de l'éprouvette (Méthode A – sonde Hall, voir Figure 3), ou
- à l'intérieur du solénoïde, à distance de l'éprouvette, en fonction de la taille et de la perméabilité de l'éprouvette (Méthode A – sonde différentielle de flux à seuil, voir Figure 4), ou
- à l'extérieur du solénoïde (Méthode B – sonde différentielle de flux à seuil, voir Figure 5).

Le solénoïde et les équipements de mesure doivent être raccordés conformément à la Figure 2.

NOTE Il existe une autre solution consistant à utiliser une bobine de détection vibrante axiale comme sonde sensible au flux magnétique, voir Méthode A [3].



IEC

Figure 2 – Schéma du circuit pour les Méthodes A et B

En variante et comme Méthode C, l'éprouvette est placée au centre de l'entrefer d'un électroaimant (voir Annexe B).

5 Epreuve d'essai

La forme et les dimensions de l'éprouvette peuvent être variables, à condition qu'elles satisfassent aux conditions suivantes:

- a) l'éprouvette peut être placée à l'intérieur du solénoïde et de façon telle que l'axe principal de l'éprouvette coïncide avec l'axe du solénoïde;
- b) l'éprouvette peut être aimantée jusqu'à saturation.

NOTE Pour les effets de la forme et des propriétés magnétiques non uniformes de l'éprouvette, se référer aux 9.2.2 et 9.3.

6 Solénoïde

Le champ magnétique dans le solénoïde doit avoir les spécifications suivantes:

- a) l'intensité du champ magnétique dans le solénoïde sur le volume de l'éprouvette ne doit pas varier de plus de $\pm 0,5$ %;
- b) l'ondulation en courant alternatif de l'intensité du champ magnétique dans le solénoïde doit être inférieure à $\pm 0,5$ % de l'intensité du champ magnétique.

7 Compensation du champ magnétique terrestre et des champs magnétiques parasites statiques et dynamiques

Le mesurage de la coercitivité d'une éprouvette prélevée dans un matériau magnétique doux peut être perturbé par le champ magnétique terrestre et par des champs magnétiques parasites externes statiques et dynamiques. La compensation de ceux-ci peut être obtenue soit par:

- a) un système de compensation applicable au champ magnétique terrestre [4] ou un blindage magnétique placé autour de la zone de mesure, ou
- b) le fait que la sonde sensible au flux magnétique utilisée pour le mesurage du champ magnétique parasite de l'éprouvette soit une sonde différentielle de flux à seuil destinée à supprimer l'influence de ces champs magnétiques externes uniformes (voir Figures 4 et 5).

8 Blindage magnétique de la zone de mesure

Le blindage magnétique doit être construit dans un matériau à perméabilité magnétique élevée [1].

Toute influence du blindage magnétique sur le champ magnétique dans la zone de mesure doit être compensée.

Après l'aimantation à saturation de l'éprouvette, le blindage magnétique doit être complètement désaimanté à partir du point de rémanence magnétique pour éviter une légère aimantation de l'éprouvette par le champ résiduel du blindage magnétique. Le champ magnétique résiduel du blindage magnétique à l'intérieur du solénoïde doit être inférieur à 5 % du champ magnétique parasite mesuré de l'éprouvette dans la rémanence magnétique. Le champ de désaimantation du blindage magnétique ne doit pas affecter magnétiquement l'éprouvette.

9 Mesurage

9.1 Aimantation

L'éprouvette est aimantée à saturation dans:

- a) le solénoïde du dispositif de mesure de la coercitivité selon les Méthodes A et B, ou
- b) un dispositif distinct qui peut être, par exemple, un circuit à aimant permanent ou un électroaimant, ou un bobinage d'aimantation par impulsion.

La saturation est considérée comme obtenue lorsqu'une augmentation de 50 % de l'intensité du champ magnétique d'aimantation donne une augmentation de la coercitivité inférieure à 1 %.

Le champ de saturation doit être appliqué suffisamment longtemps, généralement 0,5 s, pour assurer une pénétration complète du matériau.

Les matériaux magnétiques qui ont une faible coercitivité et une conductivité électrique élevée exigent une réduction en douceur et sans interruption du champ d'aimantation pour passer de la saturation à zéro. Le but est d'éviter dans l'éprouvette la production de courants de Foucault, qui désaimantent l'éprouvette et induisent une trop faible coercitivité. La diminution du champ d'aimantation de la saturation magnétique à zéro doit être réglable entre 1 s et 40 s, en fonction de la perméabilité magnétique, de la conductivité électrique et de l'épaisseur de l'éprouvette.

9.2 Méthodes de mesure

9.2.1 Généralités

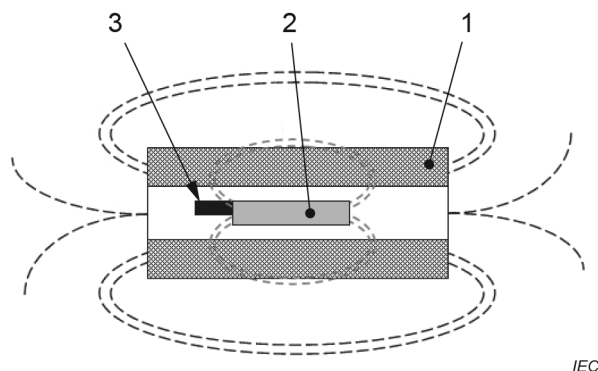
Deux méthodes, A et B, peuvent être retenues pour la détection d'une polarisation magnétique nulle de l'éprouvette au cours de la désaimantation.

L'intensité du champ magnétique dans le solénoïde doit être mesurée avec une précision supérieure ou égale à $\pm 0,5$ %.

9.2.2 Méthode A

Cette méthode repose sur l'emploi, soit:

- a) d'une sonde sensible au flux magnétique avec une sonde de Hall placée près de l'extrémité de l'éprouvette, avec son axe de mesure placé à 90° par rapport à l'axe du solénoïde (voir Figure 3). La sonde de Hall doit être décalée par rapport à l'axe et placée dans la zone homogène du solénoïde afin d'obtenir une bonne sensibilité du champ magnétique parasite de l'éprouvette et de supprimer en même temps la sensibilité du champ magnétique du solénoïde, ou



IEC

Légende

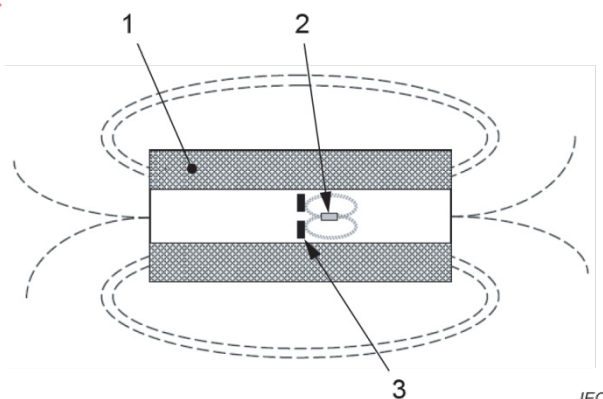
- 1 solénoïde
- 2 éprouvette
- 3 sonde de Hall

Figure 3 – Méthode A, sonde sensible au flux magnétique: sonde de Hall

- b) d'une sonde sensible au flux magnétique avec une sonde différentielle de flux à seuil constituée de deux capteurs individuels de flux à seuil, connectés en série opposition et placés à l'intérieur du solénoïde. La distance entre les sondes de flux à seuil et l'extrémité de l'éprouvette est variable (voir note ci-dessous), en fonction de la taille et de la perméabilité de l'éprouvette (voir Figure 4). Il s'agit d'un intégral de la divergence du champ magnétique parasite sur la longueur de l'éprouvette, où la distance entre l'éprouvette et les sondes de flux à seuil est supérieure à la longueur de l'éprouvette. La distance entre l'éprouvette et les sondes de flux à seuil est un compromis raisonnable entre la force du signal et l'effet du mesurage du champ magnétique parasite intégral. Par cette méthode différentielle, l'influence de champs magnétiques externes uniformes est largement compensée.

NOTE L'expérience pratique en matière de mesurage de matériaux magnétiques de très faibles dimensions et/ou très doux fixe la distance entre les sondes de flux à seuil et l'éprouvette entre 10 mm et 40 mm.

Si les sondes sensibles au flux magnétique mesurent le champ magnétique parasite de l'éprouvette à une distance très faible de l'éprouvette, alors les géométries de l'éprouvette sont limitées. Ces systèmes présentent des erreurs qui sont liées aux formes de l'éprouvette qui sont différentes des ellipsoïdes (voir Figure 6), ainsi qu'aux propriétés magnétiques non uniformes dans le volume de l'éprouvette.



IEC

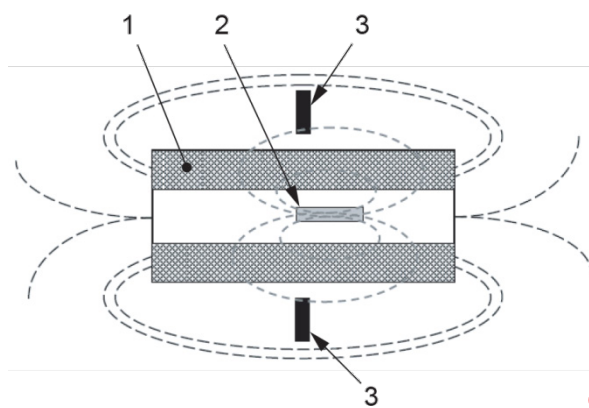
Légende

- 1 solénoïde
- 2 éprouvette
- 3 sonde différentielle de flux à seuil constituée de deux capteurs individuels de flux à seuil connectés en série opposition

Figure 4 – Méthode A, sonde sensible au flux magnétique: sonde différentielle de flux à seuil

9.2.3 Méthode B

Cette méthode repose sur l'emploi d'une sonde différentielle de flux à seuil constituée de deux capteurs individuels de flux à seuil, connectés en série opposition et placés à l'extérieur du solénoïde. Il s'agit d'un mesurage intégral du champ magnétique parasite de l'éprouvette (voir Figure 5).



Légende

- 1 solénoïde
- 2 éprouvette
- 3 sonde différentielle de flux à seuil constituée de deux capteurs individuels de flux à seuil connectés en série opposition

Figure 5 – Méthode B, sonde sensible au flux magnétique: sonde différentielle de flux à seuil

Par cette méthode différentielle, l'influence de champs magnétiques externes uniformes est largement compensée. L'axe de la sonde différentielle de flux à seuil est placé à 90° par rapport au champ magnétique du solénoïde pour mesurer uniquement le champ magnétique parasite de l'éprouvette.

La grande distance entre les deux capteurs individuels de flux à seuil et l'éprouvette exige une sensibilité élevée des sondes de flux à seuil, généralement 0,5 nT. Ils mesurent l'intégrale de la divergence du champ magnétique parasite sur la longueur de l'éprouvette. La même condition s'applique à l'hétérogénéité magnétique dans le volume de l'éprouvette.

9.3 Mesurage de la coercitivité

Le solénoïde, dans lequel est placée l'éprouvette, est relié à une source de courant continu variable. L'éprouvette est aimantée jusqu'à saturation, puis le champ magnétique est réduit progressivement sans interruption jusqu'à zéro. L'intensité du courant de désaimantation traversant le solénoïde doit être augmentée de façon continue et lentement jusqu'au moment, où aucun champ magnétique parasite en provenance de l'éprouvette n'est détecté.

La valeur du courant de désaimantation doit être mesurée à l'aide d'un voltmètre numérique relié à une résistance de shuntage (voir Figure 2) donnant une précision supérieure ou égale à 0,5 %.

L'intensité du courant doit être mesurée pour chacune des deux directions du champ de désaimantation du solénoïde.

La valeur de la coercitivité doit être calculée selon la formule:

$$H_{cJ} = kI \quad (2)$$

où

H_{cJ} est la coercitivité, en ampères par mètre (A/m);

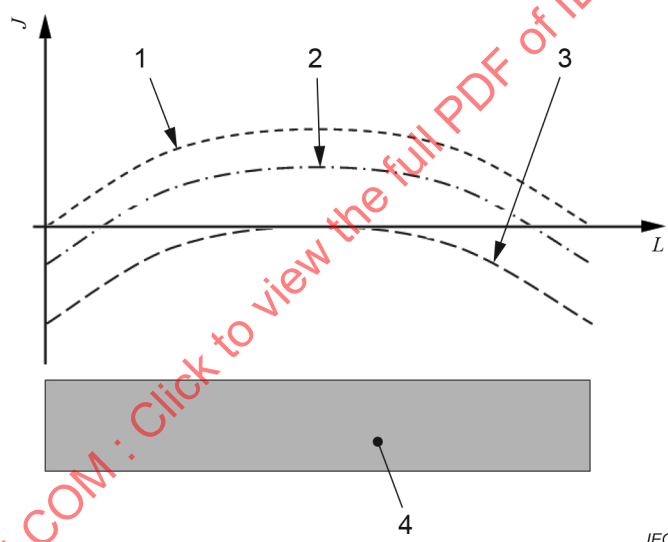
I est la valeur moyenne des deux courants de polarité inverse, en ampères (A);

k est le rapport de l'intensité du champ magnétique au courant du solénoïde, en mètre moins un (1/m).

Lorsque la Méthode A est utilisée, le mesurage doit être effectué pour chacune des extrémités de l'éprouvette, la valeur de la coercitivité retenue étant la moyenne des deux mesures. Les éprouvettes qui ont une forme non ellipsoïdale ou des propriétés magnétiques hétérogènes doivent généralement être mesurées à chaque extrémité.

Pour les matériaux dont la coercitivité est supérieure à 1 kA/m, il n'est pas nécessaire d'effectuer les mesurages pour les deux directions du champ magnétique.

NOTE La Méthode A est un mesurage localisé alors que les Méthodes B et C (voir Annexe B) sont des mesurages intégrés. Par conséquent, les résultats ne peuvent pas être les mêmes pour une éprouvette magnétique hétérogène ou pour une éprouvette de forme non ellipsoïdale (voir Figure 6).



Légende

- 1 la polarisation magnétique J est nulle aux extrémités de la tige; ce qui correspond à la Méthode A avec un mesurage de flux local
- 2 la somme de la polarisation magnétique J est nulle sur la longueur de la tige; ce qui correspond aux Méthodes B et C avec un mesurage de flux intégral
- 3 la polarisation magnétique J est nulle au centre de la tige
- 4 l'éprouvette est une tige cylindrique

Figure 6 – Polarisation magnétique J sur la longueur L d'une tige cylindrique

9.4 Reproductibilité

En respectant les procédures définies ci-dessus et sous réserve que le matériau ait une polarisation magnétique uniforme, la reproductibilité de la détermination de la coercitivité normalement attendue est inférieure à:

- $\pm 10 \%$ pour les coercitivités de 0,2 A/m jusqu'à 5 A/m;
- $\pm 5 \%$ pour les coercitivités jusqu'à 50 A/m;