

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE

### Superconductivity –

**Part 27: Twist pitch measurement of practical superconducting wires – Twist pitch measurement of Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu composite superconductors**

### Supraconductivité –

**Partie 27: Mesurage du pas de torsade de fils supraconducteurs pratiques – Mesurage du pas de torsade des composites supraconducteurs Nb-Ti/Cu et Nb-Sn/Cu**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-27:2025



## THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2025 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 Secretariat  
3, rue de Varembe  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://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](http://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](http://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](http://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](mailto:sales@iec.ch).

#### IEC Products & Services Portal - [products.iec.ch](http://products.iec.ch)

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews, graphical symbols and the glossary. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

#### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 500 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 25 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

### 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](http://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](http://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](http://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](mailto:sales@iec.ch).

#### IEC Products & Services Portal - [products.iec.ch](http://products.iec.ch)

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications, symboles graphiques et le glossaire. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

#### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE

---

### Superconductivity –

**Part 27: Twist pitch measurement of practical superconducting wires – Twist pitch measurement of Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu composite superconductors**

### Supraconductivité –

**Partie 27: Mesurage du pas de torsade de fils supraconducteurs pratiques – Mesurage du pas de torsade des composites supraconducteurs Nb-Ti/Cu et Nb-Sn/Cu**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

---

ICS 29.050

ISBN 978-2-8327-0133-1

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

## CONTENTS

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FOREWORD.....                                                                                                              | 5  |
| INTRODUCTION.....                                                                                                          | 7  |
| 1 Scope.....                                                                                                               | 8  |
| 2 Normative references .....                                                                                               | 8  |
| 3 Terms and definitions .....                                                                                              | 8  |
| 4 Principle .....                                                                                                          | 9  |
| 5 Reagents and auxiliary materials .....                                                                                   | 10 |
| 6 Apparatus and tools.....                                                                                                 | 10 |
| 7 Specimen preparation.....                                                                                                | 10 |
| 7.1 Requirements .....                                                                                                     | 10 |
| 7.2 Cleaning .....                                                                                                         | 10 |
| 7.3 Drying.....                                                                                                            | 10 |
| 7.4 Removing matrix copper and sanding barrier (apply to Nb-Sn/Cu specimen<br>of external stabilizer type only) .....      | 11 |
| 8 Measurement procedure .....                                                                                              | 11 |
| 8.1 Specimen fixing .....                                                                                                  | 11 |
| 8.2 Specimen dissolution .....                                                                                             | 11 |
| 8.3 Cleaning and drying.....                                                                                               | 11 |
| 8.4 Measurement.....                                                                                                       | 12 |
| 9 Calculation of results .....                                                                                             | 12 |
| 10 Uncertainty of measurement.....                                                                                         | 12 |
| 11 Test report.....                                                                                                        | 13 |
| 11.1 Specimen.....                                                                                                         | 13 |
| 11.2 Results .....                                                                                                         | 13 |
| Annex A (normative) Measurement – Direct measurement method .....                                                          | 14 |
| A.1 Method .....                                                                                                           | 14 |
| A.2 Measurement procedure .....                                                                                            | 14 |
| A.2.1 Specimen dissolution.....                                                                                            | 14 |
| A.2.2 Cleaning and drying.....                                                                                             | 14 |
| A.2.3 Measurement.....                                                                                                     | 15 |
| A.3 Uncertainty of measurement .....                                                                                       | 15 |
| A.4 Test report.....                                                                                                       | 15 |
| Annex B (normative) Measurement – Image processing method .....                                                            | 16 |
| B.1 Method .....                                                                                                           | 16 |
| B.2 Measurement procedure .....                                                                                            | 17 |
| B.2.1 Specimen dissolution.....                                                                                            | 17 |
| B.2.2 Cleaning and drying.....                                                                                             | 17 |
| B.2.3 Photo taking .....                                                                                                   | 17 |
| B.2.4 Measuring the helix angle .....                                                                                      | 17 |
| B.2.5 Result and rounding method .....                                                                                     | 18 |
| B.3 Uncertainty of measurement .....                                                                                       | 18 |
| B.4 Test report.....                                                                                                       | 18 |
| Annex C (informative) A typical design of the auxiliary tool for twist pitch<br>measurement by the untwisting method ..... | 19 |
| C.1 Apparatus of twist angle measurement.....                                                                              | 19 |
| C.2 Measurement procedure .....                                                                                            | 20 |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Annex D (informative) Uncertainty evaluation .....                                                | 22 |
| D.1 Untwisting method .....                                                                       | 22 |
| D.1.1 Mathematical model.....                                                                     | 22 |
| D.1.2 Measurement uncertainty in twist pitch $L_p$ for Nb-Ti/Cu .....                             | 22 |
| D.1.3 Measurement uncertainty in twist pitch $L_p$ for Nb-Sn/Cu .....                             | 24 |
| D.1.4 Round robin test.....                                                                       | 26 |
| D.1.5 Other influences of uncertainty .....                                                       | 27 |
| D.2 Direct measurement method .....                                                               | 28 |
| D.2.1 Mathematical model.....                                                                     | 28 |
| D.2.2 Procedures of standard uncertainty evaluation .....                                         | 28 |
| D.2.3 Specimen identification.....                                                                | 29 |
| D.2.4 Evaluation of each standard uncertainty component .....                                     | 29 |
| D.2.5 Evaluation results of combined standard uncertainty in twist pitch $L_p$ .....              | 30 |
| D.2.6 Expanded uncertainty in twist pitch $L_p$ .....                                             | 30 |
| D.2.7 Round robin test.....                                                                       | 30 |
| D.3 Image processing method .....                                                                 | 32 |
| D.3.1 Mathematical model.....                                                                     | 32 |
| D.3.2 Procedures of standard uncertainty evaluation.....                                          | 32 |
| D.3.3 Specimen identification.....                                                                | 33 |
| D.3.4 Evaluation of each standard uncertainty component .....                                     | 33 |
| D.3.5 Evaluation results of combined standard uncertainty in twist pitch $L_p$ .....              | 35 |
| D.3.6 Expanded uncertainty in twist pitch $L_p$ .....                                             | 35 |
| D.3.7 Round robin test.....                                                                       | 35 |
| Bibliography.....                                                                                 | 37 |
| Figure 1 – Principle demonstration.....                                                           | 9  |
| Figure B.1 – Principle demonstration for image processing method.....                             | 16 |
| Figure B.2 – Measurement of helix angle .....                                                     | 18 |
| Figure C.1 – A typical design of the auxiliary tool for twist pitch measurement.....              | 20 |
| Figure C.2 – Specimen fixing .....                                                                | 20 |
| Figure C.3 – Specimen bending and dissolution.....                                                | 20 |
| Figure C.4 – Back to the initial state .....                                                      | 20 |
| Figure C.5 – Rotate the knob to untwist filaments .....                                           | 21 |
| Figure C.6 – Judge the parallelism of filaments.....                                              | 21 |
| Figure C.7 – Measure the distance .....                                                           | 21 |
| Table D.1 – Measurement results of dissolved length $l$ (Nb-Ti/Cu) .....                          | 23 |
| Table D.2 – Measurement results of untwist angle $\theta$ (Nb-Ti/Cu) .....                        | 23 |
| Table D.3 – Measurement results of dissolved length $l$ (Nb-Sn/Cu).....                           | 25 |
| Table D.4 – Measurement results of untwisted angle $\theta$ (Nb-Sn/Cu) .....                      | 25 |
| Table D.5 – RRT results of Nb-Ti/Cu specimen.....                                                 | 26 |
| Table D.6 – RRT results of Nb-Sn/Cu specimen.....                                                 | 27 |
| Table D.7 – Measurement results and uncertainties of each institution for Nb-Ti/Cu specimen ..... | 27 |

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Table D.8 – Measurement results and uncertainties of each institution for Nb-Sn/Cu specimen .....                                       | 27 |
| Table D.9 – Measured twist pitches for Nb-Ti/Cu specimen.....                                                                           | 29 |
| Table D.10 – RRT results of Nb-Ti/Cu specimen .....                                                                                     | 31 |
| Table D.11 – RRT results of Nb-Sn/Cu specimen.....                                                                                      | 31 |
| Table D.12 – Measurement results and uncertainties of each institution for Nb-Ti/Cu specimen .....                                      | 31 |
| Table D.13 – Measurement results and uncertainties of each institution for Nb-Sn/Cu specimen .....                                      | 32 |
| Table D.14 – Measured diameter ( $D_i$ ), helix angle ( $\varphi_i$ ) and obtained twist pitch ( $L_{pi}$ ) for Nb-Sn/Cu specimen ..... | 34 |
| Table D.15 – RRT results of Nb-Ti/Cu specimen .....                                                                                     | 35 |
| Table D.16 – RRT results of Nb-Sn/Cu specimen.....                                                                                      | 36 |
| Table D.17 – Measurement results and uncertainties of each institution for Nb-Ti/Cu specimen .....                                      | 36 |
| Table D.18 – Measurement results and uncertainties of each institution for Nb-Sn/Cu specimen .....                                      | 36 |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-27:2025

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## SUPERCONDUCTIVITY –

**Part 27: Twist pitch measurement of practical superconducting wires –  
Twist pitch measurement of Nb-Ti/Cu and  
Nb-Sn/Cu composite superconductors**

## 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 shall 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) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 61788-27 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity. It is an International Standard.

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

| Draft       | Report on voting |
|-------------|------------------|
| 90/532/FDIS | 90/540/RVD       |

Full information on the voting for its approval can be found in the report on voting indicated in the above table.

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at [www.iec.ch/members\\_experts/refdocs](http://www.iec.ch/members_experts/refdocs). The main document types developed by IEC are described in greater detail at [www.iec.ch/publications](http://www.iec.ch/publications).

A list of all parts of the IEC 61788 series, published under the general title *Superconductivity*, 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 [webstore.iec.ch](http://webstore.iec.ch) in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn, or
- revised.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-27:2025

## INTRODUCTION

Twisting of multi-filamentary superconductors is an important step in the development of wires with AC losses at an acceptable level for AC applications. The necessary twist pitch depends on wire architecture, critical current density, matrix material, and external factors such as temperature, frequency and applied magnetic field.

Therefore, twist pitch is a very important parameter in the design and application of composite superconducting wires, which is often inspected in the last stage of fabrication. Due to the different architectures of different composite superconductors, appropriate test methods should be adopted for specific architectures.

This document specifies the untwisting method for measuring the twist pitch of Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu composite superconductors [1]<sup>1</sup>. As supplementary methods, the direct measurement method and the image processing method [1] are specified in Annex A and Annex B, respectively.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-27:2025

---

<sup>1</sup> Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

## SUPERCONDUCTIVITY –

### Part 27: Twist pitch measurement of practical superconducting wires – Twist pitch measurement of Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu composite superconductors

#### 1 Scope

This part of IEC 61788 specifies a test method for the twist pitch measurement of Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu composite superconductors by an untwisting method.

The test method is applicable to Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu composite superconducting wires with monolithic structures, which have either a round cross section with a diameter ranging from 0,2 mm to 2 mm or a rectangular cross section that is equivalent in area to the round cross-sectional wires. These wires possess a filament diameter ranging from 6  $\mu\text{m}$  to 200  $\mu\text{m}$ , a twist pitch between 5 mm and 50 mm, and a matrix of copper or copper alloy. This document uses nitric acid to remove the matrix (copper or copper alloy), so the surface of the composite superconducting wire can be plated with a material that is dissolvable by nitric acid.

Though uncertainty can increase, the method can apply to Nb-Ti/Cu or Nb-Sn/Cu composite superconducting wires when the parameters of cross-sectional area, filament diameter and twist pitch are out of the limit.

The test method specified in this document is expected to apply to other types of composite superconducting wires after some appropriate modifications.

#### 2 Normative references

There are no normative references in this document.

#### 3 Terms and definitions

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

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

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

##### 3.1

##### **twist**

turns made by a filament around a central wire axis

[SOURCE: IEC 60050-815:2015 [2], 815-13-46, modified – In the definition, "or strand" has been deleted and "conductor" has been replaced with "central wire".]

### 3.2

#### twist direction

direction of a filament in twist

Note 1 to entry: There are two types of twist direction: Z-twist (sometimes referred to as right-hand twist) when the filament or strand is twisted in a clockwise direction and S-twist (sometimes referred to as left-hand twist) when the filament or strand is twisted in an anticlockwise direction.

### 3.3

#### twist pitch

$L_p$

axial length in which a filament firstly returns to its original relative position in a twisted superconducting wire

[SOURCE: IEC 60050-815:2015 [2], 815-13-47, modified – The preferred term "twist pitch length" has been deleted. In the definition, "or strand" has been deleted and "conductor" has been replaced with "superconducting wire".]

### 3.4

#### twist angle

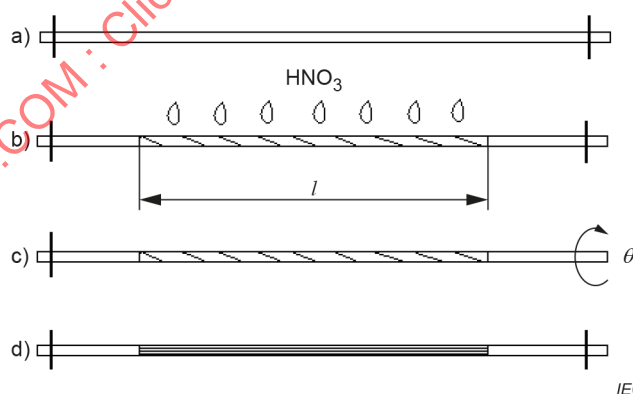
#### untwist angle

$\theta$

angle at which all filaments of a twisted superconducting wire return to parallel original axial positions during the untwisting process

## 4 Principle

Low temperature superconducting wire is usually composed of tens to even thousands of superconducting filaments embedded in copper and copper alloy matrix. After the superconducting wire is twisted, the inner filaments are also regularly twisted with a specific twist pitch. This document specifies an untwisting method to measure the twist pitch (see Figure 1).



**Figure 1 – Principle demonstration**

The untwisting method can be briefly described as follows.

- Fix the two ends of the specimen (Figure 1a).
- Remove the copper or copper alloy matrix in the middle section of the specimen with  $\text{HNO}_3$  solution (Figure 1b).
- Measure the length of the dissolved zone (denoted as  $l$ , explanation see 8.4).
- Rotate one end of the wire to untwist it until the filaments in the dissolved zone are parallel (Figure 1c and Figure 1d). Record the rotated angle (denoted as  $\theta$ ).

e) Calculate the twist pitch  $L_p$  using  $l$  and  $\theta$  (see Formulae (1) and (2)).

The other two normative methods, the direct measurement method and the image processing method, are specified in Annex A and Annex B, which are equivalent alternatives.

## 5 Reagents and auxiliary materials

The following reagents shall be prepared for specimen preparation:

- detergent and degreaser;
- anhydrous ethanol;
- nitric acid solution (40 % to 65 % mass percentage concentration is recommended).

Rubber gloves and acid-resistant tweezers shall be used when handling acid solution.

The following auxiliary materials and tools shall be prepared for specimen preparation:

- 300 to 800 mesh fine sandpaper (apply to Nb-Sn/Cu specimens only).

## 6 Apparatus and tools

The apparatus and tools required for measurement shall include the following:

- an auxiliary tool for twist pitch measurement, which has an angle scale with an accuracy of 5° or better (an example is given in Annex C);
- fume hood;
- calliper (accuracy 0,02 mm or better);
- oven or dryer.

## 7 Specimen preparation

### 7.1 Requirements

The untwisting method shall be used for twist pitches in the range of 5 mm to 50 mm to ensure adequate accuracy for the measurement. The specimen length shall be longer than six times of the nominal twist pitch.

The specimen shall be free from torsion and bending.

### 7.2 Cleaning

Detergent and degreaser shall be used to remove oil stains and other contamination from the specimen. Then, the specimen shall be rinsed repeatedly with running water, and finally dehydrated by anhydrous ethanol.

### 7.3 Drying

After cleaning, the specimen shall be dried completely in an appropriate manner. For example, drying with hot air or placed into an oven (60 °C to 70 °C).

#### **7.4 Removing matrix copper and sanding barrier (apply to Nb-Sn/Cu specimen of external stabilizer type only)**

Some Nb-Sn/Cu wires have a Nb or Ta external diffusion barrier to inhibit diffusion reaction between Cu-Sn matrix and external copper stabilizer, and the barrier is insoluble in nitric acid. When the external copper stabilizer is dissolved, this barrier prevents the inner copper from being corroded by nitric acid, therefore the barrier shall be removed. The following steps are recommended when removing the barrier; these steps are not applied to distributed barrier wires.

- a) Removing matrix copper: Immerse the Nb-Sn/Cu specimen in nitric acid solution and leave the container in a fume hood for about 15 minutes until the copper sheath of the specimen is completely dissolved. Take the specimen out by acid-resistant tweezers, rinse it with running water, and then dehydrate it with anhydrous ethanol, and dry it.

For safety, wear long sleeves, trousers, and rubber gloves to prevent nitric acid from splashing on the skin.

- b) Inspecting barrier surface for barrier seam: If the barrier has a seam, inspect the surface of the barrier which will follow the filament position underneath. If a seam is clearly visible, the specimen needs no further preparation.
- c) Sanding barrier: Take a fine sandpaper, and evenly sand the measuring section until the internal copper red is completely exposed.

Use a fume hood during sanding.

- d) Cleaning and drying: Clean and dry the specimen in accordance with 7.2 and 7.3, respectively.

### **8 Measurement procedure**

#### **8.1 Specimen fixing**

If necessary, for Nb-Sn/Cu specimens with external diffusion barrier, the barrier shall be removed in advance in accordance with 7.4. Both ends of the specimen shall be clamped or pressed tightly to the auxiliary tool to straighten the specimen. During the fixing process, distortion, bending, or any other actions that will affect the measurement results are not allowed.

#### **8.2 Specimen dissolution**

Immerse the middle part of the specimen, approximately two thirds of the total length, in nitric acid solution and hold for about 30 minutes. This can be achieved by pushing the slider in the auxiliary tool toward the centre, and thus bending the specimen at the same time. Details are given in Annex C.

Take the dissolved part out and observe inner filaments. If there is still residual copper or filament bonding, or the dissolved zone boundary is not clear, immerse the part into nitric acid solution again. Ensure that the position of the specimen relative to the nitric acid surface does not change so that boundaries of the dissolution zone are as clear as possible.

Use personal protective equipment and a fume hood while handling the specimen.

#### **8.3 Cleaning and drying**

When all the inner filaments are fully dispersed with no residual copper, take the dissolved part out, with the whole specimen still fixed on the auxiliary tool. Clean and dry the specimen in accordance with 7.2 and 7.3, respectively.

## 8.4 Measurement

Restore the specimen in the auxiliary tool to the initial state, horizontal without bending, and observe the twist direction. While fixing the axial position of the specimen, rotate one end of it in the opposite direction to untwist it. Meanwhile, observe the filaments or barrier seam carefully, and stop rotating when all filaments or barrier seam are nearly parallel to the wire axis.

Insert two pieces of thin plate, such as copper foils, with approximately 0,5 mm thickness and 10 mm to 30 mm width. Two pieces of plate are overlapped, without any filament between them. They are both applied to pick up several filaments. One of them is kept at the start of the dissolved zone, and the other slides towards the end of the zone. Tune the angle at the same time until the picked filaments are completely untwisted, that is, those filaments are now parallel to the wire axis of the specimen. Alternatively, if there is a visible seam on the barrier, use the apparatus to untwist the wire until the seam runs parallel to the wire axis.

Record the total rotation angle, i.e. twist angle  $\theta$ . It is recommended to repeat the previous step several times to improve the measurement accuracy.

Measure the length of the picked filaments by a calliper, using the copper foils marking the boundaries. It is recommended to carry out multiple measurements to improve the measurement accuracy. It is worth noting that, by twist pitch definition,  $l$  is the length in twist state. However, since the boundary of the dissolved zone is difficult to identify, this compromise is justified. On one hand, an appropriate auxiliary tool can be designed to fix the position of both ends of the specimen, as seen in Annex C, so that the distance of the dissolved part remains unchanged. On the other hand, the untwisting process cannot guarantee that all filaments are completely parallel. Thus, only the length or distance of the picked filaments is measured. The introduced uncertainty is considered in the uncertainty evaluation (Annex D).

For another dissolution method, the specimen is dissolved, cleaned and dried in advance, and then fixed to the tool for measurement. In this case, the dissolved specimen shall not be twisted before and during fixing.

## 9 Calculation of results

The twist pitch shall be calculated and rounded to one decimal using Formulae (1) and (2):

$$L_p = \frac{l}{n} \quad (1)$$

$$n = \frac{\theta}{360} \quad (2)$$

where

$L_p$  is the twist pitch (mm);

$l$  is the length of the dissolved zone (mm);

$n$  is the number of turns;

$\theta$  is the untwist angle ( $^{\circ}$ ).

## 10 Uncertainty of measurement

The twist pitch is obtained by measuring the dissolved zone length  $l$  and the untwist angle  $\theta$ . The target relative expanded standard uncertainty (RSU) of measurement shall not exceed 2 % ( $k = 2$ ). Details of the uncertainty evaluation are described in Clause D.1.

## 11 Test report

### 11.1 Specimen

The following information of the specimen shall be reported:

- a) type and classification of wire;
- b) identification of specimen;
- c) dimension (diameter, length and width).

The following information of the specimen shall be reported if possible:

- d) manufacturer;
- e) manufacturing process;
- f) lot number;
- g) nominal copper to non-copper volume ratio;
- h) nominal filament diameter;
- i) number of filaments;
- j) photo of cross-section.

### 11.2 Results

The following information shall be reported:

- a) twist pitch of each specimen;
- b) twist direction;
- c) method.

The following information shall be reported if necessary:

- d) uncertainty.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-27:2025

## **Annex A**

(normative)

### **Measurement – Direct measurement method**

#### **A.1 Method**

This Annex A describes the direct measurement method to measure the twist pitch. It is applicable to Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu composite superconducting wires in round or rectangular shape and with or without a Nb or Ta diffusion barrier surrounding the outmost superconducting filament bundle. It is recommended to be applied for twist pitches in the range of 5 mm to 100 mm with high reproducibility and accuracy. This method can also be used when twist pitch is over 100 mm, but the uncertainty becomes larger for longer twist pitches, for example twist pitch up to 300 mm. It will be possible to apply this method for external stabilizer type (with external barrier) Nb-Sn/Cu wires without removal of the barrier where the contours of the filaments underneath can be seen, or where a seam is visible on the barrier after etching the outer copper sheath.

#### **A.2 Measurement procedure**

##### **A.2.1 Specimen dissolution**

Cut a specimen with a length much larger than the nominal twist pitch (for twist pitches in the range of 50 mm to 100 mm, a specimen length of 300 mm is recommended) with a clean pair of nippers, and stick a label of the specimen identification on one end.

Wipe the specimen with gauze soaked with anhydrous ethanol using clean gloves.

Immerse the specimen into nitric acid solution in a graduated cylinder (e.g. 100 ml) leaving the stuck end. It is important that the immersed length is greater than 1,5 times the expected twist pitch.

Use personal protective equipment and a fume hood while handling the specimen.

Prepare a distilled-water-filled graduated cylinder of same size to rinse the specimen.

Dissolve the copper sheath, and confirm that the copper sheath is etched away, so that the outermost filaments have started to be visible along the circumference of the specimen. The etched metal removal shall be as low as possible to ensure an accurate twist pitch determination. To ensure this grade of etching, the etching of the specimen shall be continuously checked by visual inspection. For the external stabilizer type (with external barrier) Nb-Sn/Cu wire specimens shall be prepared in accordance with 7.4, steps a) and b).

##### **A.2.2 Cleaning and drying**

Take the specimen out of the solution and put it in the graduated cylinder filled with distilled water to rinse it well or rinse it quickly with running water.

Dry the specimen completely after rinsing, using anhydrous ethanol and hot air, oven or a non-marking tissue.

### A.2.3 Measurement

Follow and mark one or more visible filaments along the wire axis with a permanent marker. This can be done using an optical microscope, if needed. For external stabilizer type Nb-Sn/Cu wire with a barrier seam, the seam itself shall serve as a visual guide. No marking on the specimen is necessary.

Measure the length of one or a few twist pitches with a ruler or calliper.

Calculate the twist pitch by dividing the measured length by the number of marked twist pitches.

$$L_p = \frac{L_n}{n} \quad (\text{A.1})$$

where

$L_p$  is the twist pitch;

$L_n$  is the length of  $n$  twist pitches;

$n$  is the measured number of twist pitches.

NOTE The measurement can be performed with multiple specimens, ideally more than 10 specimens, or multiple measurements with one specimen, hopefully more than ten times.

### A.3 Uncertainty of measurement

The target relative expanded standard uncertainty (RSU) of measurement shall not exceed 5 % ( $k = 2$ ). Details of the uncertainty evaluation are described in Clause D.2.

### A.4 Test report

See Clause 11.

## Annex B (normative)

### Measurement – Image processing method

#### B.1 Method

This Annex B describes the image processing method to measure the twist pitch. It is applicable to Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu composite superconducting wires in round or rectangular shape and with or without a Nb or Ta diffusion barrier surrounding the outmost superconducting filament bundle. It is recommended to be applied for twist pitches in the range of 5 mm to 300 mm. This method can be used when twist pitch is over 50 mm, but the uncertainty becomes larger for longer twist pitches. The method will show higher uncertainty with increasing twist pitch, as the uncertainty for the angle reading increases with increasing twist pitch. The schematic diagram is shown in Figure B.1. This method is especially advantageous for specimens with high filament number count, specimens with very small wire diameter and specimens with Nb or Ta barrier surrounding the filament pack. The specimen shall be kept straight throughout the measuring process. The measurement shall be carried out on photos (such as scanning electron microscope (SEM) photos, metallographic photos and so on). It would be beneficial to use a photo of the specimen surface with high depth of focus to determine the twist pitch helix. Here, helix angle of the filaments and the diameter of the wire in the photo after removal of the Cu matrix (or diffusion barrier, in case of the external stabilizer Nb-Sn/Cu wire) are needed to determine the twist pitch.

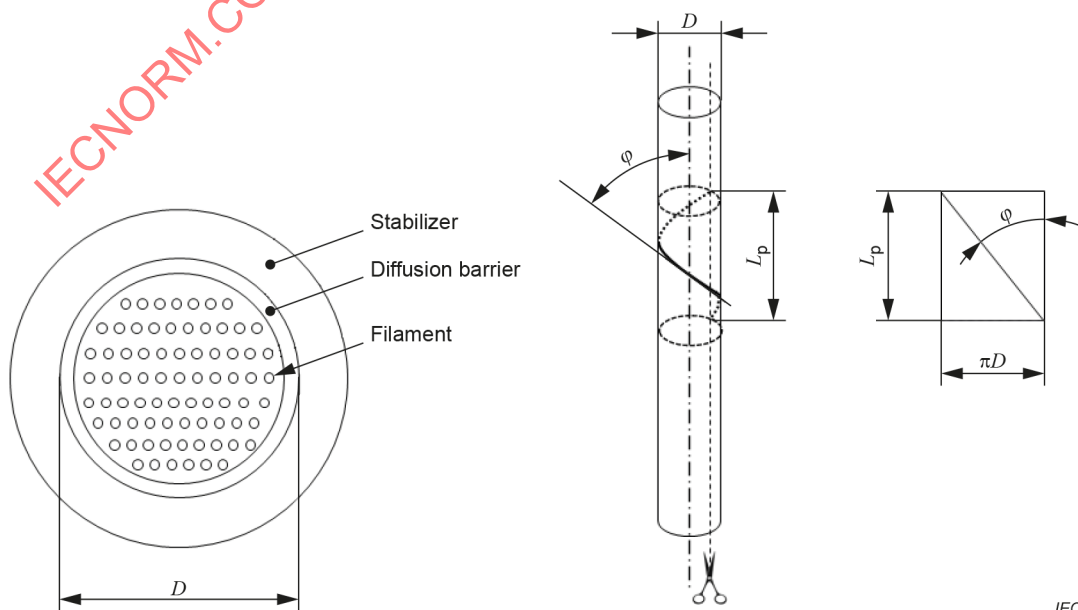
The twist pitch is calculated by Formula (B.1):

$$L_p = \frac{\pi D}{\tan(\varphi)} \quad (\text{B.1})$$

where

$\varphi$  is the helix angle (rad);

$D$  is the diameter of the wire after removal of the Cu matrix (or diffusion barrier) (mm).



IEC

Figure B.1 – Principle demonstration for image processing method

It is recommended to measure the helix angle at two orientations of the specimen, which are rotated 90° in correction to the centre line of the specimen. This is necessary to exclude measurement error due to ovality of the specimen and for rectangular specimens. The twist pitch would in such a case be:  $L_p = 0,5 (L_p(x\text{-axis}) + L_p(y\text{-axis}))$ .

## **B.2 Measurement procedure**

### **B.2.1 Specimen dissolution**

For specimen without barrier, the etching process shall be done in accordance with A.2.1. For the external stabilizer type Nb-Sn/Cu wire, the specimen shall be prepared in accordance with 7.4, steps a) and b). The copper matrix shall be dissolved in nitric acid until the filament bundles in twist or the barrier seam – in case of the external barrier Nb-Sn/Cu wire – are recognizable. The specimen length shall be sufficient to enable specimen handling and to ensure an accurate angle measurement in the full scope of the microscope used. Label the specimen and put it straight in a beaker or cylinder filled with nitric acid.

Use personal protective equipment and a fume hood while handling the specimen.

### **B.2.2 Cleaning and drying**

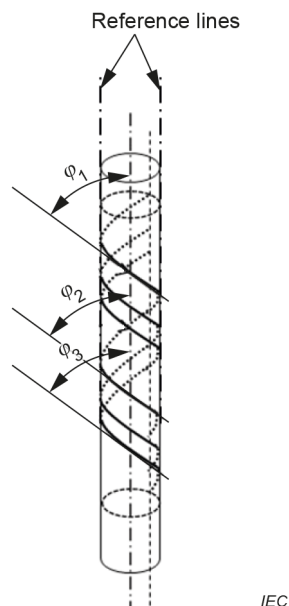
Take the specimen out and wash repeatedly with running water for at least two minutes. In addition, after each dipping of the specimen in nitric acid, the specimen shall be rinsed well in distilled water and dried. After the barrier becomes visible, rinse the specimen in a distilled-water-filled graduated cylinder or in running water, then dehydrate with anhydrous ethanol and dry with hot air, oven or a non-marking tissue.

### **B.2.3 Photo taking**

Straighten the specimen and place it under a metallurgical microscope or on the stage of a scanning electron microscope (SEM). Photograph the surface of the specimen. If the microscope is capable of distance measurement, measure and record the diameter ( $D$ ) at the etched section in this process or use related image analysis software to determine the specimen diameter. If not, measure the diameter by micrometer afterwards. It is beneficial to execute the measurement multiple times and determine the diameter ( $D$ ) at the etched section by averaging the measured values.

### **B.2.4 Measuring the helix angle**

Process the photo by image analysis software. Draw two reference lines parallel to the centre line of the specimen at both edges of the specimen in the etched section (as shown in Figure B.2). Draw lines along the trail of twisting near the centre line and measure at least three helix angles ( $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$ ). Average these results to reduce random errors in the final result.



**Figure B.2 – Measurement of helix angle**

### **B.2.5 Result and rounding method**

Calculate  $L_p$  by Formula (B.1). The result shall be rounded to one decimal.

NOTE The measurement can be performed with multiple specimens, ideally more than 10 specimens, or multiple measurements with one specimen, hopefully more than ten times.

### **B.3 Uncertainty of measurement**

The target relative expanded standard uncertainty (RSU) of measurement shall not exceed 7 % ( $k = 2$ ). Details of the uncertainty evaluation are described in Clause D.3.

### **B.4 Test report**

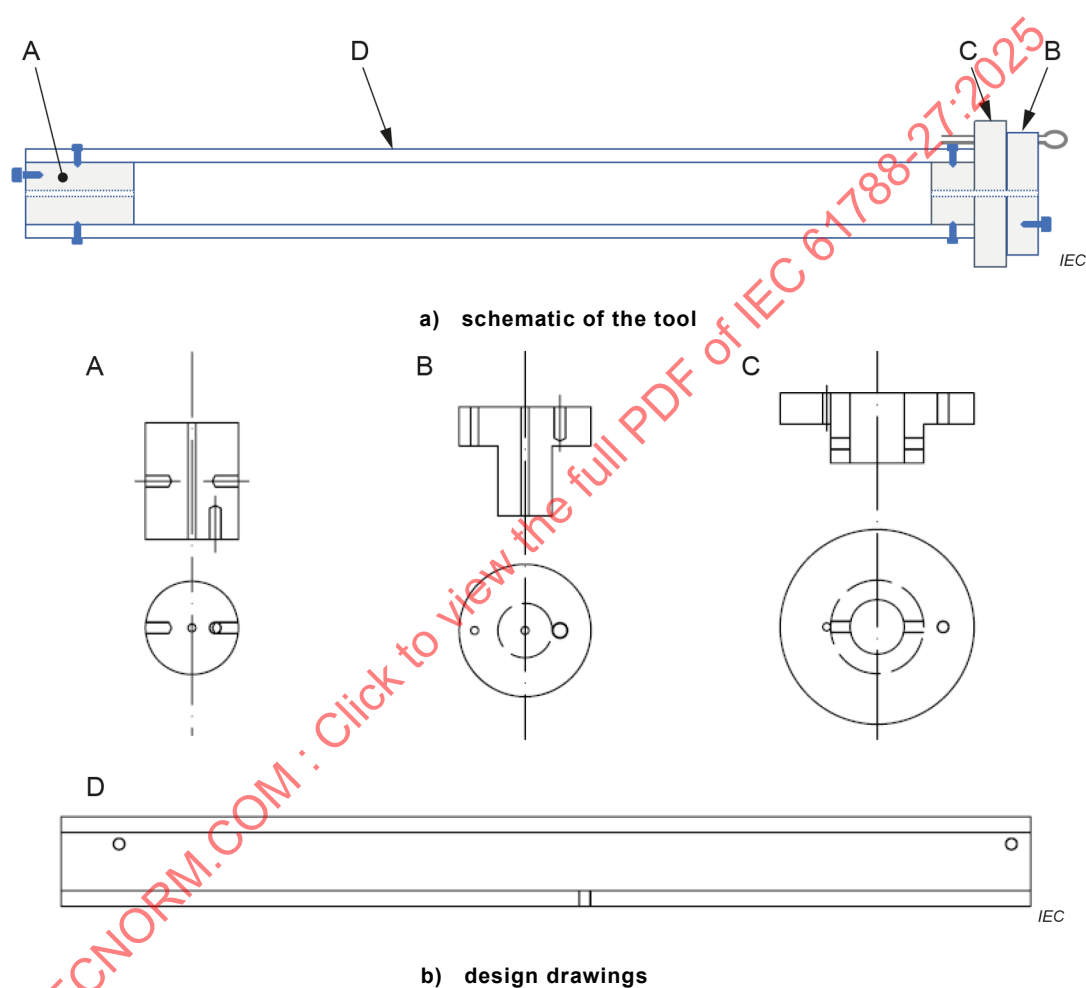
See Clause 11.

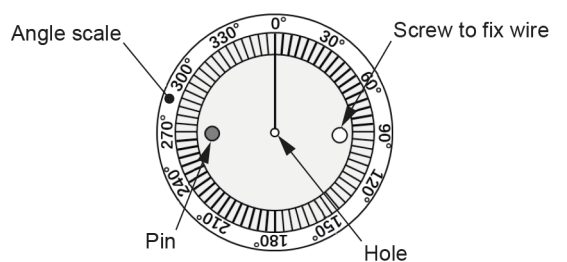
## Annex C (informative)

### A typical design of the auxiliary tool for twist pitch measurement by the untwisting method

#### C.1 Apparatus of twist angle measurement

One example of the auxiliary tool required for the twist pitch measurement is shown in Figure C.1.





c) details of Part C

#### Key

- A calliper
- B rotating knob
- C disc with angle scale
- D slideway

Figure C.1 – A typical design of the auxiliary tool for twist pitch measurement

### C.2 Measurement procedure

Figure C.2 to Figure C.7 show procedures of measuring the twist pitch. Requirements are given in Clause 8.

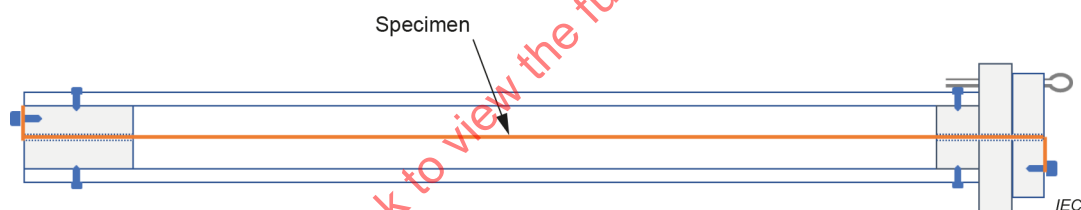


Figure C.2 – Specimen fixing

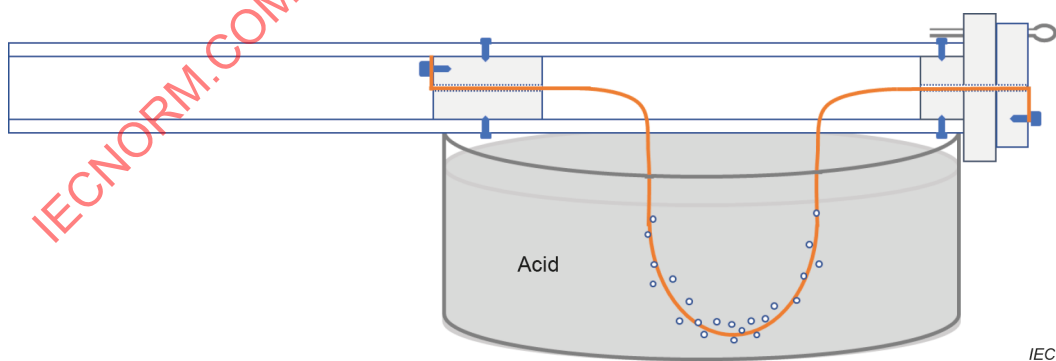


Figure C.3 – Specimen bending and dissolution

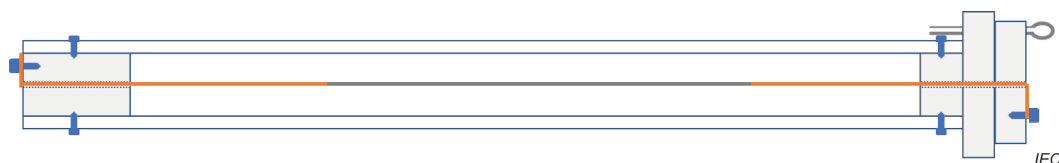
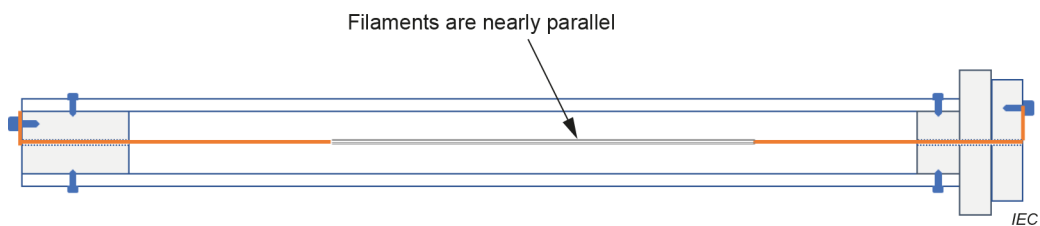
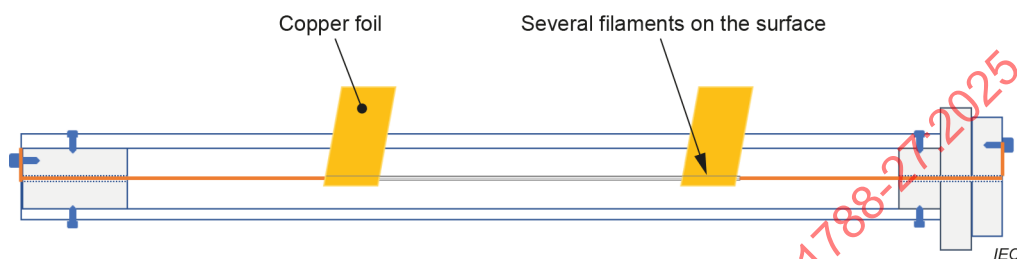


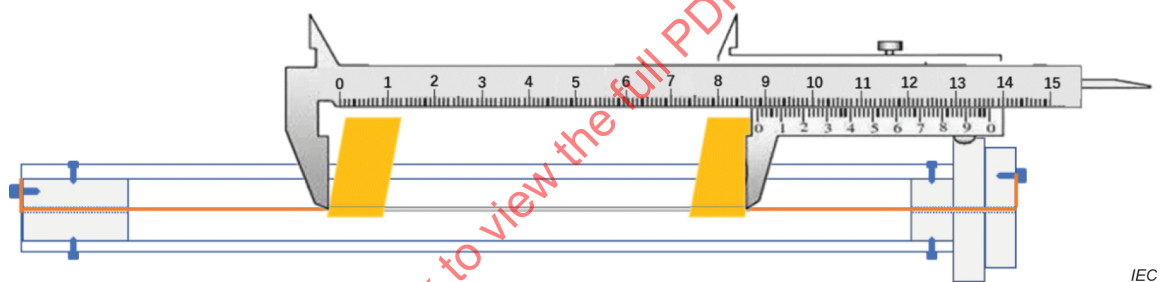
Figure C.4 – Back to the initial state



**Figure C.5 – Rotate the knob to untwist filaments**



**Figure C.6 – Judge the parallelism of filaments**



**Figure C.7 – Measure the distance**

## Annex D (informative)

### Uncertainty evaluation

#### D.1 Untwisting method

##### D.1.1 Mathematical model

As given by Formula (1), the twist pitch is calculated using Formula (D.1):

$$L_p = \frac{l}{\theta/360} \quad (D.1)$$

where  $L_p$  is the twist pitch,  $l$  is the length of the dissolved zone, and  $\theta$  is the untwist angle.

The combined standard uncertainty  $u(L_p)$  for this measurement method can be obtained from Formula (D.2):

$$u(L_p) = \sqrt{c_1^2 u(l)^2 + c_2^2 u(\theta)^2} \quad (D.2)$$

where  $u(L_p)$  is the combined standard uncertainty in twist pitch measured by the present method, and the sensitivity coefficients  $c_1$  and  $c_2$  can be obtained from the partial derivation of Formula (D.1):

$$c_1 = \frac{\partial L_p}{\partial l} = \frac{360}{\theta} \quad (D.3)$$

$$c_2 = \frac{\partial L_p}{\partial \theta} = -\frac{360 \times l}{\theta^2} \quad (D.4)$$

#### D.1.2 Measurement uncertainty in twist pitch $L_p$ for Nb-Ti/Cu

##### D.1.2.1 Specimen identification

The parameters of the Nb-Ti/Cu specimen used for uncertainty evaluation are as follows.

- Product type: Nb-Ti/Cu composite superconducting wire.
- Outer diameter: 0,73 mm.
- Nominal copper to non-copper volume ratio: 2,35.
- Average filament diameter:  $\sim 7,8 \mu\text{m}$ .
- Number of filaments:  $\sim 2\,630$ .

**D.1.2.2 Combined standard uncertainty in each variable****D.1.2.2.1 Length of dissolved zone  $l$** 

The contributing factors are as follows.

- a) The specimen was measured 10 times, and the results are given in Table D.1. The type A uncertainty is the standard deviation, calculated as 0,1 mm.

**Table D.1 – Measurement results of dissolved length  $l$  (Nb-Ti/Cu)**

| Measurement | $l$<br>(mm) |
|-------------|-------------|
| 1           | 128,18      |
| 2           | 128,40      |
| 3           | 128,08      |
| 4           | 128,44      |
| 5           | 128,94      |
| 6           | 129,04      |
| 7           | 128,66      |
| 8           | 128,52      |
| 9           | 128,46      |
| 10          | 128,38      |

- b) The accuracy of the calliper is 0,02 mm, thus the uncertainty contributed is 0,01 mm.
- c) Assuming the error due to unclear dissolved zone boundary is 0,5 mm, the uncertainty contribution is 0,29 mm.
- d) Since distance rather than length is measured, there is error from the fixing structure of the tool, which is estimated to be 0,5 mm, so the uncertainty contribution is 0,29 mm.

In summary, the combined standard uncertainty in dissolved length  $l$  is the square root of the sum of squares of the four terms, which is 0,419 mm.

**D.1.2.2.2 Untwist angle  $\theta$** 

The contributing factors are as follows.

- a) The specimen was measured 10 times, and the results are given in Table D.2. The type A uncertainty is the standard deviation, calculated as 9,09°.

**Table D.2 – Measurement results of untwist angle  $\theta$  (Nb-Ti/Cu)**

| Measurement | $\theta$<br>(°) |
|-------------|-----------------|
| 1           | 3 270           |
| 2           | 3 260           |
| 3           | 3 230           |
| 4           | 3 270           |
| 5           | 3 280           |
| 6           | 3 330           |
| 7           | 3 290           |
| 8           | 3 310           |
| 9           | 3 250           |
| 10          | 3 270           |

- b) The accuracy of angle is  $5^\circ$ , thus the uncertainty contributed is  $2,9^\circ$ .
- c) The error due to parallelism observation is  $20^\circ$ , thus the uncertainty contributed is  $11,5^\circ$ .
- d) The error due to possible bend and torsion of the specimen is within  $10^\circ$ , thus the introduced uncertainty is  $5,8^\circ$ .

In summary, the combined standard uncertainty in angle  $u_c(\theta)$  is  $16,052^\circ$ .

#### **D.1.2.3 Combined standard uncertainty in $L_p$**

Substituting  $\bar{l} = 128,51$  mm and  $\bar{\theta} = 3\ 276^\circ$  into Formulae (D.3) and (D.4), the two sensitivity coefficients can be obtained as  $c_1 = 0,110$  and  $c_2 = -0,004$ .

The combined standard uncertainty in  $L_p$  is calculated by Formula (D.2).  $u_c(L_p)$  is 0,083 mm.

#### **D.1.2.4 Measurement result of $L_p$**

The  $L_p$  value calculated by Formula (D.1) is 14,12 mm. Taking the cover factor  $k = 2$ , the expanded uncertainty  $U$  is 0,17 mm, and the relative expanded standard uncertainty (RSU) is 1,18 %. Therefore, the measurement result is expressed as  $L_p = (14,12 \pm 0,17)$  mm.

### **D.1.3 Measurement uncertainty in twist pitch $L_p$ for Nb-Sn/Cu**

#### **D.1.3.1 Specimen identification**

The parameters of the test wire used to evaluate the uncertainty of the method are as follows.

- Product type: Nb-Sn/Cu composite superconducting wire.
- Outer diameter: 0,82 mm.
- Nominal copper to non-copper volume ratio: 1,0.
- Average filament diameter:  $\sim 6,0$   $\mu\text{m}$ .
- Number of filaments:  $\sim 3\ 040$ .

#### **D.1.3.2 Combined standard uncertainty in each variable**

##### **D.1.3.2.1 Length of dissolved zone $l$**

The contributing factors are as follows:

- a) The specimen was measured 10 times, and the results are given in Table D.3. The type A uncertainty is the standard deviation, calculated as 0,19 mm.

**Table D.3 – Measurement results of dissolved length  $l$  (Nb-Sn/Cu)**

| Measurement | $l$<br>(mm) |
|-------------|-------------|
| 1           | 139,90      |
| 2           | 139,04      |
| 3           | 138,64      |
| 4           | 138,30      |
| 5           | 138,10      |
| 6           | 139,00      |
| 7           | 138,10      |
| 8           | 138,10      |
| 9           | 138,12      |
| 10          | 138,30      |

- b) The accuracy of the calliper is 0,02 mm, thus the uncertainty contributed is 0,01 mm.
- c) Assuming the error due to unclear dissolved zone boundary is 1 mm, the uncertainty contribution is 0,58 mm.
- d) Since distance rather than length is measured, there is error from the fixing structure of the tool, which is estimated to be 0,5 mm, so the uncertainty contribution is 0,29 mm.

In summary, the combined standard uncertainty in dissolved length  $l$  is the square root of the sum of squares of the four terms, which is 0,672 mm.

#### **D.1.3.2.2 Untwisted angle $\theta$**

The contributing factors are as follows.

- a) The specimen was measured 10 times, and the results are given in Table D.4. The type A uncertainty is the standard deviation, calculated as 20,11°.

**Table D.4 – Measurement results of untwisted angle  $\theta$  (Nb-Sn/Cu)**

| Measurement | $\theta$<br>(°) |
|-------------|-----------------|
| 1           | 3 210           |
| 2           | 3 200           |
| 3           | 3 250           |
| 4           | 3 150           |
| 5           | 3 270           |
| 6           | 3 090           |
| 7           | 3 150           |
| 8           | 3 270           |
| 9           | 3 270           |
| 10          | 3 155           |

- b) The accuracy of angle is 5°, thus the uncertainty contributed is 2,9°.
- c) The error due to parallelism observation is 20°, thus the uncertainty contributed is 11,5°.
- d) The error due to possible bend and torsion of the specimen is within 10°, thus the introduced uncertainty is 5,8°.

In summary, the combined standard uncertainty in angle  $u_c(\theta)$  is 24,072°.

### D.1.3.3 Combined standard uncertainty in $L_p$

Substituting  $\bar{l} = 138,56$  mm and  $\bar{\theta} = 3\ 202^\circ$  into Formulae (D.3) and (D.4), the two sensitivity coefficients can be obtained as  $c_1 = 0,112$  and  $c_2 = -0,005$ .

The combined standard uncertainty in  $L_p$  is calculated by Formula (D.2).  $u_c(L_p)$  is 0,14 mm.

### D.1.3.4 Measurement result of $L_p$

The  $L_p$  value calculated by Formula (D.1) is 15,58 mm. Taking the cover factor  $k = 2$ , the expanded uncertainty  $U$  is 0,28 mm, and the relative expanded standard uncertainty (RSU) is 1,76 %. The standard deviation  $\sigma$ , the uncertainty  $u_c(L_p)$ , the expanded uncertainty  $U$  ( $k = 2$ ) and the relative expanded standard uncertainty (RSU) are listed in Table D.7 and Table D.8. Therefore, the measurement result is expressed as  $L_p = (15,58 \pm 0,28)$  mm.

### D.1.4 Round robin test

A round robin test (RRT) was conducted in 2019. Four institutions in China (UA, UB, UC and UD) participated in this RRT. 10 Nb-Ti/Cu and 10 Nb-Sn/Cu specimens cut from the stably twisted zone of composite superconducting wires were distributed to each participant. The results of the RRT are shown in Table D.5 and Table D.6. The average value of twist pitch  $\bar{L}_p$ , the standard deviations  $\sigma$ , the uncertainty  $u_c(L_p)$  and the expanded uncertainty  $U$  obtained are listed in Table D.7 and Table D.8.

It is observed that the confidence intervals  $L_p \pm U$  of the participant institutions overlap with each other. This indicates that the measurement results among them show consistency.

**Table D.5 – RRT results of Nb-Ti/Cu specimen**

| UA    |               | UB    |               | UC    |               | UD    |               |
|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|
| No.   | $L_p$<br>(mm) | No.   | $L_p$<br>(mm) | No.   | $L_p$<br>(mm) | No.   | $L_p$<br>(mm) |
| NT-1  | 14,04         | NT-11 | 14,13         | NT-21 | 14,01         | NT-31 | 14,27         |
| NT-2  | 14,03         | NT-12 | 13,97         | NT-22 | 13,98         | NT-32 | 14,14         |
| NT-3  | 14,10         | NT-13 | 14,04         | NT-23 | 14,11         | NT-33 | 14,19         |
| NT-4  | 14,08         | NT-14 | 14,04         | NT-24 | 14,04         | NT-34 | 14,27         |
| NT-5  | 13,99         | NT-15 | 13,88         | NT-25 | 13,98         | NT-35 | 14,29         |
| NT-6  | 13,97         | NT-16 | 14,23         | NT-26 | 13,91         | NT-36 | 14,23         |
| NT-7  | 14,11         | NT-17 | 14,16         | NT-27 | 14,03         | NT-37 | 14,19         |
| NT-8  | 14,11         | NT-18 | 14,33         | NT-28 | 14,04         | NT-38 | 14,16         |
| NT-9  | 13,99         | NT-19 | 14,13         | NT-29 | 13,98         | NT-39 | 14,16         |
| NT-10 | 14,09         | NT-20 | 14,28         | NT-30 | 14,11         | NT-40 | 14,26         |

**Table D.6 – RRT results of Nb-Sn/Cu specimen**

| UA    |               | UB    |               | UC    |               | UD    |               |
|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|
| No.   | $L_p$<br>(mm) | No.   | $L_p$<br>(mm) | No.   | $L_p$<br>(mm) | No.   | $L_p$<br>(mm) |
| IT-1  | 15,19         | IT-11 | 15,35         | IT-21 | 15,35         | IT-31 | 15,76         |
| IT-2  | 15,56         | IT-12 | 15,66         | IT-22 | 15,97         | IT-32 | 15,71         |
| IT-3  | 15,79         | IT-13 | 15,79         | IT-23 | 15,21         | IT-33 | 15,83         |
| IT-4  | 15,80         | IT-14 | 15,31         | IT-24 | 15,58         | IT-34 | 15,47         |
| IT-5  | 15,19         | IT-15 | 15,29         | IT-25 | 16,08         | IT-35 | 15,98         |
| IT-6  | 15,42         | IT-16 | 15,52         | IT-26 | 15,28         | IT-36 | 15,44         |
| IT-7  | 15,84         | IT-17 | 15,23         | IT-27 | 16,04         | IT-37 | 15,90         |
| IT-8  | 15,76         | IT-18 | 15,45         | IT-28 | 16,04         | IT-38 | 15,52         |
| IT-9  | 15,58         | IT-19 | 15,64         | IT-29 | 15,47         | IT-39 | 15,59         |
| IT-10 | 15,52         | IT-20 | 15,86         | IT-30 | 15,86         | IT-40 | 16,03         |

**Table D.7 – Measurement results and uncertainties of each institution for Nb-Ti/Cu specimen**

| Institution | $\bar{L}_p$<br>(mm) | $\sigma$<br>(mm) | $u(L_p)$<br>(mm) | $U$<br>(mm) | RSU<br>(%) |
|-------------|---------------------|------------------|------------------|-------------|------------|
| UA          | 14,05               | 0,05             | 0,017            | 0,03        | 0,21       |
| UB          | 14,12               | 0,14             | 0,044            | 0,09        | 0,64       |
| UC          | 14,02               | 0,06             | 0,019            | 0,04        | 0,29       |
| UD          | 14,22               | 0,055            | 0,017            | 0,04        | 0,28       |

**Table D.8 – Measurement results and uncertainties of each institution for Nb-Sn/Cu specimen**

| Institution | $\bar{L}_p$<br>(mm) | $\sigma$<br>(mm) | $u(L_p)$<br>(mm) | $U$<br>(mm) | RSU<br>(%) |
|-------------|---------------------|------------------|------------------|-------------|------------|
| UA          | 15,57               | 0,24             | 0,076            | 0,15        | 0,96       |
| UB          | 15,51               | 0,22             | 0,070            | 0,14        | 0,90       |
| UC          | 15,69               | 0,34             | 0,108            | 0,22        | 1,40       |
| UD          | 15,72               | 0,21             | 0,067            | 0,13        | 0,83       |

It is clear that the relative expanded standard uncertainty (RSU) obtained in this RRT is much lower than the theoretical evaluation shown in D.1.2.4 and D.1.3.4. Therefore, the target value of 2 % ( $k = 2$ ) specified in Clause 10 is appropriate.

#### D.1.5 Other influences of uncertainty

The additional twist or torsion before test or during the measurement can reduce the repeatability and increase the uncertainty.

## D.2 Direct measurement method

### D.2.1 Mathematical model

The twist pitch of Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu composite superconducting wires measured with the direct measurement method is formally given by Formula (D.5):

$$L_p = \frac{L_n}{n} \quad (\text{D.5})$$

where

$L_p$  is the length of twist pitch (mm);

$L_n$  is the length of  $n$  twist pitches (mm);

$n$  is the measured number of twist pitches.

### D.2.2 Procedures of standard uncertainty evaluation

The combined standard uncertainty of the twist pitch  $L_p$  of Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu composite superconducting wires with the direct measurement method is obtained by Formula (D.6):

$$u_c(L_p) = \sqrt{u_A^2(L_p) + u_B^2(L_p)} \quad (\text{D.6})$$

where

$u_A(L_p)$  is the type A standard uncertainty of  $L_p$ ;

$u_B(L_p)$  is the type B standard uncertainty of  $L_p$ .

The type A standard uncertainty  $u_A(L_p)$  is evaluated from the standard deviation of the values  $L_p$  calculated from a set of measurements.

The type B standard uncertainty  $u_B(L_p)$  is formally given by Formula (D.7):

$$u_B(L_p) = \sqrt{c_1^2 u_B^2(L_n) + c_2^2 u_B^2(n)} \quad (\text{D.7})$$

where  $c_1$  and  $c_2$  are sensitivity coefficients given by Formulae (D.8) and (D.9) using the average value of  $L_n$ .

$$c_1 = \frac{\partial L_p}{\partial L_n} = \frac{1}{n} \quad (\text{D.8})$$

$$c_2 = \frac{\partial L_p}{\partial n} = -\frac{L_n}{n^2} \quad (\text{D.9})$$

In the following subclauses, measurement of  $L_n$  and  $n$  is conducted for each of  $m$  specimens. Let  $L_{ni}$  and  $n_i$  denote the measured values of  $L_n$  and  $n$ , respectively, for the  $i$ -th specimen ( $i = 1 - m$ ). The twist pitch of the  $i$ -th specimen, denoted by  $L_{pi}$ , is calculated from  $L_{ni}$  and  $n_i$  according to Formula (D.5). The final measurement result of the twist pitch of the superconducting wire is given by averaging  $L_{pi}$  over the  $m$  specimens as

$$L_p = \bar{L}_p = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m L_{pi} \quad (\text{D.10})$$

### D.2.3 Specimen identification

The parameters of the Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu specimens used for uncertainty evaluation are shown in D.1.2.1 and D.1.3.1.

### D.2.4 Evaluation of each standard uncertainty component

#### D.2.4.1 Type A standard uncertainty

The length  $L_{ni}$  of four twist pitches ( $n = 4$ ) for 10 specimens of Nb-Ti/Cu composite superconducting wires was measured with the direct measurement method, and converted into the twist pitch  $L_{pi}$  as shown in Table D.9. The standard deviation of  $L_{pi}$  is 0,185 2 mm, and then type A uncertainty of  $L_p$  is calculated as 0,058 5 mm.

**Table D.9 – Measured twist pitches for Nb-Ti/Cu specimen**

| Measurement | $L_{pi}$<br>(mm) |
|-------------|------------------|
| 1           | 14,22            |
| 2           | 13,73            |
| 3           | 13,64            |
| 4           | 13,92            |
| 5           | 13,88            |
| 6           | 13,97            |
| 7           | 13,76            |
| 8           | 13,67            |
| 9           | 14,08            |
| 10          | 13,80            |
| Average     | 13,87            |

#### D.2.4.2 Type B standard uncertainty

##### D.2.4.2.1 Length $L_n$

The type B uncertainty of the length  $L_n$  is calculated as follows.

- The accuracy of the calliper is 0,02 mm, thus the type B uncertainty is 0,011 5 mm.
- The error due to the boundary is 0,5 mm, thus the type B uncertainty is 0,288 7 mm.
- The error due to the width of mark is 0,3 mm, thus the type B uncertainty is 0,173 2 mm.

In summary, the uncertainty  $u_B(L_n)$  in length  $L_{ni}$  is 0,336 9 mm.

#### D.2.4.2.2 Measured number of twist pitch $n$

The maximum error due to the parallelism when measuring length is about  $5^\circ$  ( $\Delta n = 5^\circ/360^\circ$ ), thus the type B uncertainty  $u_B(n)$  in twist pitch measured number is 0,008 0.

#### D.2.4.2.3 Uncertainty of type B parameters

The following result was obtained using Formula (D.7) and the sensitivity coefficients with Formulae (D.8) and (D.9) using the average value  $\bar{L}_n$ .

$$u_B(L_p) = \sqrt{c_1^2 u_B^2(\bar{L}_n) + c_2^2 u_B^2(n)} = \sqrt{0,25^2 \times 0,3369^2 + (-3,467)^2 \times 0,0080^2} = 0,0887 \text{ mm}$$

#### D.2.5 Evaluation results of combined standard uncertainty in twist pitch $L_p$

The combined standard uncertainty was evaluated for the Nb-Ti/Cu composite superconducting wire with the following measurement data:

$L_n$  is given by 55,48 mm;

$n$  is given by 4;

$L_p = 13,87$  mm.

The combined standard uncertainty of the twist pitch  $L_p$  was obtained with the type A and the type B uncertainties using Formula (D.6).

$$u_c(L_p) = \sqrt{u_A^2(L_p) + u_B^2(L_p)} = \sqrt{0,0585^2 + 0,0887^2} = 0,1063 \text{ mm}$$

#### D.2.6 Expanded uncertainty in twist pitch $L_p$

The  $L_p$  average value is 13,87 mm. Taking the cover factor  $k = 2$ , the expanded uncertainty  $U$  is 0,21 mm, and the relative uncertainty is 1,5 %. Therefore, the measurement result is expressed as  $L_p = (13,87 \pm 0,21)$  mm.

#### D.2.7 Round robin test

A round robin test (RRT) for the direct measurement method was conducted in 2021. Six institutions in USA, Korea, Germany and Japan (DA, DB, DC, DD, DE and DF) participated for measurement of the Nb-Ti/Cu specimen and four institutions in USA and Japan (DA, DD, DE and DF) performed measurement of the Nb-Sn/Cu specimen. These specimens as shown in D.2.3 were distributed to each institution.

The measurement results of the twist pitch  $L_p$  are shown in Table D.10 for Nb-Ti/Cu specimens and Table D.11 for Nb-Sn/Cu specimens as the converted values  $L_{pi}$  of the twist pitch. The standard deviation  $\sigma$ , the uncertainty  $u(L_p)$ , the expanded uncertainty  $U$  ( $k = 2$ ) and the relative expanded standard uncertainty (RSU) are listed in Table D.12 and Table D.13.

It is observed that the confidence intervals  $L_p \pm U$  of the participant institutions overlap with each other. This indicates that the measurement results among them show consistency.

**Table D.10 – RRT results of Nb-Ti/Cu specimen**

| DA    |                  | DB    |                  | DC    |                  | DD    |                  | DE    |                  | DF    |                  |
|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|
| No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) |
| NT-1  | 14,0             | NT-11 | 13,5             | NT-21 | 14,07            | NT-31 | 14,3             | NT-41 | 14,0             | NT-51 | 14,22            |
| NT-2  | 14,7             | NT-12 | 14,0             | NT-22 | 14,01            | NT-32 | 14,0             | NT-42 | 14,7             | NT-52 | 13,73            |
| NT-3  | 15,0             | NT-13 | 14,0             | NT-23 | 14,08            | NT-33 | 14,0             | NT-43 | 14,5             | NT-53 | 13,64            |
| NT-4  | 16,0             | NT-14 | 13,7             | NT-24 | 14,04            | NT-34 | 14,0             | NT-44 | 14,7             | NT-54 | 13,92            |
| NT-5  | 12,8             | NT-15 | 14,0             | NT-25 | 14,04            | NT-35 | 14,1             | NT-45 | 14,2             | NT-55 | 13,88            |
| NT-6  | 14,0             | NT-16 | 14,0             | NT-26 | 14,06            | NT-36 | 14,0             | NT-46 | 13,9             | NT-56 | 13,97            |
| NT-7  | 13,9             | NT-17 | 14,0             | NT-27 | 14,06            | NT-37 | 14,0             | NT-47 | 14,3             | NT-57 | 13,76            |
| NT-8  | 14,0             | NT-18 | 13,5             | NT-28 | 14,08            | NT-38 | 14,0             | NT-48 | 14,4             | NT-58 | 13,67            |
| NT-9  | 14,3             | NT-19 | 13,5             | NT-29 | 14,00            | NT-39 | 14,1             | NT-49 | 13,9             | NT-59 | 14,08            |
| NT-10 | 13,8             | NT-20 | 14,0             | NT-30 | 14,04            | NT-40 | 14,3             | NT-50 | 14,0             | NT-60 | 13,80            |

**Table D.11 – RRT results of Nb-Sn/Cu specimen**

| DA    |                  | DD    |                  | DE    |                  | DF    |                  |
|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|
| No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) |
| NS-1  | 16,3             | NS-11 | 16,0             | NS-21 | 16,5             | NS-31 | 16,32            |
| NS-2  | 15,7             | NS-12 | 16,0             | NS-22 | 16,2             | NS-32 | 16,10            |
| NS-3  | 15,7             | NS-13 | 16,0             | NS-23 | 16,3             | NS-33 | 16,36            |
| NS-4  | 15,7             | NS-14 | 16,0             | NS-24 | 16,6             | NS-34 | 16,36            |
| NS-5  | 16,0             | NS-15 | 16,0             | NS-25 | 16,3             | NS-35 | 16,21            |
| NS-6  | 16,0             | NS-16 | 16,3             | NS-26 | 16,5             | NS-36 | 16,56            |
| NS-7  | 15,5             | NS-17 | 16,3             | NS-27 | 16,5             | NS-37 | 16,27            |
| NS-8  | 16,0             | NS-18 | 16,3             | NS-28 | 16,4             | NS-38 | 16,42            |
| NS-9  | 16,5             | NS-19 | 16,0             | NS-29 | 16,5             | NS-39 | 15,88            |
| NS-10 | 16,0             | NS-20 | 16,0             | NS-30 | 16,3             | NS-40 | 16,33            |

**Table D.12 – Measurement results and uncertainties of each institution for Nb-Ti/Cu specimen**

| Institution | $L_p$<br>(mm) | $\sigma$<br>(mm) | $u(L_p)$<br>(mm) | $U$<br>(mm) | RSU<br>(%) |
|-------------|---------------|------------------|------------------|-------------|------------|
| DA          | 14,25         | 0,85             | 0,27             | 0,54        | 3,79       |
| DB          | 13,8          | 0,24             | 0,076            | 0,15        | 1,10       |
| DC          | 14,05         | 0,027            | 0,0085           | 0,02        | 0,12       |
| DD          | 14,1          | 0,123            | 0,039            | 0,08        | 0,55       |
| DE          | 14,3          | 0,31             | 0,098            | 0,20        | 1,37       |
| DF          | 13,87         | 0,185            | 0,059            | 0,12        | 0,85       |

**Table D.13 – Measurement results and uncertainties of each institution for Nb-Sn/Cu specimen**

| Institutions | $L_p$<br>(mm) | $\sigma$<br>(mm) | $u_A(L_p)$<br>(mm) | $U$<br>(mm) | RSU<br>(%) |
|--------------|---------------|------------------|--------------------|-------------|------------|
| DA           | 15,9          | 0,302 6          | 0,095 7            | 0,19        | 1,20       |
| DD           | 16,1          | 0,144 9          | 0,045 8            | 0,09        | 0,57       |
| DE           | 16,4          | 0,128 7          | 0,040 7            | 0,08        | 0,50       |
| DF           | 16,3          | 0,186 2          | 0,058 9            | 0,12        | 0,72       |

### D.3 Image processing method

#### D.3.1 Mathematical model

The twist pitch of Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu composite superconducting wires measured with the image processing method is obtained by Formula (D.11):

$$L_p = \frac{\pi D}{\tan \varphi} \quad (D.11)$$

where

$L_p$  is the length of twist pitch (mm);

$D$  is the diameter of the wire after removal of the Cu matrix (or diffusion barrier) (mm).

$\varphi$  is the helix angle (rad).

#### D.3.2 Procedures of standard uncertainty evaluation

The combined standard uncertainty of the twist pitch  $L_p$  of Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu composite superconducting wires with the image processing method is obtained by Formula (D.12):

$$u_c(L_p) = \sqrt{u_A^2(L_p) + u_B^2(L_p)} \quad (D.12)$$

where

$u_A(L_p)$  is the type A standard uncertainty of  $L_p$ ;

$u_B(L_p)$  is the type B standard uncertainty of  $L_p$ .

The type A standard uncertainty  $u_A(L_p)$  is evaluated from the standard deviation of the values  $L_p$  calculated from a set of measurements.

NOTE The type A uncertainty  $u_A(L_p)$  can also be calculated by combining  $u_A(D)$  and  $u_A(\varphi)$  according to the law of propagation of uncertainty with due consideration to the correlation between  $D$  and  $\varphi$  (see ISO/IEC Guide 98-3:2008, Clause H.2).

The type B standard uncertainty  $u_B(L_p)$  is formally given with Formula (D.13):

$$u_B(L_p) = \sqrt{c_1^2 u_B^2(D) + c_2^2 u_B^2(\varphi)} \quad (D.13)$$

where  $c_1$  and  $c_2$  are sensitivity coefficients given by Formulae (D.14) and (D.15) using the average values of  $D$  and  $\varphi$ :

$$c_1 = \frac{\partial L_p}{\partial D} = \frac{\pi}{\tan \varphi} \quad (D.14)$$

$$c_2 = \frac{\partial L_p}{\partial \varphi} = -\pi D \csc^2 \varphi. \quad (D.15)$$

In the following subclauses, measurement of  $D$  and  $\varphi$  is conducted for each of  $n$  specimens. Let  $D_i$  and  $\varphi_i$  denote the measured values of  $D$  and  $\varphi$ , respectively, for the  $i$ -th specimen ( $i = 1 - n$ ). The twist pitch of the  $i$ -th specimen, denoted by  $L_{pi}$ , is calculated from  $D_i$  and  $\varphi_i$  according to Formula (D.11). The final measurement result of the twist pitch of the superconducting wire is given by averaging  $L_{pi}$  over the  $n$  specimens as

$$L_p = \bar{L}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{pi} \quad (D.16)$$

### D.3.3 Specimen identification

The parameters of the Nb-Ti/Cu and Nb-Sn/Cu specimens used for uncertainty evaluation are shown in D.1.2.1 and D.1.3.1.

### D.3.4 Evaluation of each standard uncertainty component

#### D.3.4.1 Type A standard uncertainty

The diameter  $D_i$  and the helix angle  $\varphi_i$  for 10 times of Nb-Sn/Cu composite superconducting wires were measured with the image processing method and converted into the twist pitch  $L_{pi}$  using Formula (D.11) as shown in Table D.14. The standard deviation of  $L_{pi}$  is 0,166 9 mm, and then the type A uncertainty  $u_A(L_p)$  is calculated as 0,052 78 mm.

**Table D.14 – Measured diameter ( $D_i$ ), helix angle ( $\varphi_i$ ) and obtained twist pitch ( $L_{pi}$ ) for Nb-Sn/Cu specimen**

| No.     | $D_i$<br>(mm) | $\varphi_i$<br>(°) | $\varphi_i$<br>(rad) | $L_{pi}$<br>(mm) |
|---------|---------------|--------------------|----------------------|------------------|
| 1       | 0,612         | 6,623              | 0,116                | 16,56            |
| 2       | 0,612         | 6,598              | 0,115                | 16,61            |
| 3       | 0,607         | 6,728              | 0,117                | 16,16            |
| 4       | 0,608         | 6,756              | 0,118                | 16,14            |
| 5       | 0,605         | 6,670              | 0,116                | 16,24            |
| 6       | 0,604         | 6,671              | 0,116                | 16,22            |
| 7       | 0,607         | 6,650              | 0,116                | 16,35            |
| 8       | 0,604         | 6,628              | 0,116                | 16,32            |
| 9       | 0,603         | 6,604              | 0,115                | 16,36            |
| 10      | 0,602         | 6,531              | 0,114                | 16,52            |
| average | 0,606         | 6,646              | 0,116                | 16,35            |

#### D.3.4.2 Type B standard uncertainty

##### D.3.4.2.1 Diameter $D$

The type B uncertainty of the diameter  $D$  is calculated as follows.

- The accuracy of microscope is 0,001 mm, thus the uncertainty is 0,000 58 mm.
- The error due to the diameter deformation by twisting is 0,010 mm, thus the uncertainty contribution is 0,005 77 mm.

The combined uncertainty  $u_B(D)$  is calculated as 0,005 8 mm.

As the sensitivity coefficient  $c_1$  is calculated as 26,962,  $c_1 u_B(D)$  is 0,156 4 mm.

##### D.3.4.2.2 Helix angle $\varphi$

The type B uncertainty of the helix angle  $\varphi$  is calculated as follows.

- The accuracy by software is 0,001°, thus the uncertainty is 0,000 58°.
- The error due to the reference line is 0,050°, thus the uncertainty is 0,028 87°.
- The error due to the width of line is 0,010°, thus the uncertainty is 0,005 77°.

The combined uncertainty  $u_B(\varphi)$  in the helix angle is 0,029 45° (0,000 514 rad).

As the sensitivity factor  $c_2$  is calculated as –142,13 mm,  $c_2 u_B(\varphi)$  is –0,073 05 mm.

##### D.3.4.2.3 Combined standard uncertainty of type B parameters

The combined type B standard uncertainty is evaluated according to Formula (D.12) as

$$u_B(L_p) = \sqrt{c_1^2 u_B^2(D_i) + c_2^2 u_B^2(\varphi_i)} = \sqrt{0,156\,4^2 + (-0,073\,05)^2} = 0,172\,6\text{ mm}$$

### D.3.5 Evaluation results of combined standard uncertainty in twist pitch $L_p$

The combined standard uncertainty of the averaged twist pitch  $L_p$  was obtained using Formula (D.11) as

$$u_c(L_p) = \sqrt{u_A^2(L_p) + u_B^2(L_p)} = \sqrt{0,052\,8^2 + 0,172\,6^2} = 0,180\,5\text{ mm}$$

### D.3.6 Expanded uncertainty in twist pitch $L_p$

The  $L_p$  average value is 16,35 mm. Taking the cover factor  $k = 2$ , the expanded uncertainty  $U$  is 0,36 mm, and the relative uncertainty is 2,2 %. Therefore, the measurement result is expressed as  $L_p = (16,35 \pm 0,36)$  mm.

### D.3.7 Round robin test

A round robin test (RRT) for the image processing method was conducted in 2021. Four institutions in Germany, Switzerland, Italy and Japan (IA, IB, IC and IE) participated for measurement of the Nb-Ti/Cu specimen and five institutions in Germany, Switzerland, Italy, Korea and Japan (IA, IB, IC, ID and IE) performed measurement of the Nb-Sn/Cu specimen. These specimens shown in D.3.3 were distributed to each institution.

The measurement results of the twist pitch  $L_{pi}$  are shown in Table D.15 for Nb-Ti/Cu specimens and Table D.16 for Nb-Sn/Cu specimens as the converted values  $L_{pi}$  of the twist pitch. The standard deviation  $\sigma$ , the uncertainty  $u(L_p)$  and the expanded uncertainty  $U$  are listed in Table D.17 and Table D.18.

It is observed that the confidence intervals  $L_p \pm U$  of the participant institutions overlap with each other. This indicates that the measurement results among them show consistency.

**Table D.15 – RRT results of Nb-Ti/Cu specimen**

| IA    |                  | IB    |                  | IC    |                  | IE    |                  |
|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|
| No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) |
| NT-1  | 15,6             | NT-11 | 15,61            | NT-21 | 16,63            | NT-31 | 14,5             |
| NT-2  | 14,9             | NT-12 | 15,16            | NT-22 | 13,99            | NT-32 | 13,5             |
| NT-3  | 14,2             | NT-13 | 17,42            | NT-23 | 15,95            | NT-33 | 15,2             |
| NT-4  | 14,5             | NT-14 | 15,87            | NT-24 | 16,10            | NT-34 | 14,4             |
| NT-5  | 14,0             | NT-15 | 16,28            | NT-25 | 14,84            | NT-35 | 16,4             |
| NT-6  | 16,0             | NT-16 | 15,51            | NT-26 | 14,66            | NT-36 | 15,8             |
| NT-7  | 16,1             | NT-17 | 20,93            | NT-27 | 14,54            | NT-37 | 15,4             |
| NT-8  | 15,4             | NT-18 | 15,60            | NT-28 | 15,25            | NT-38 | 16,1             |
| NT-9  | 15,9             | NT-19 | 15,96            | NT-29 | 15,42            | NT-39 | 16,7             |
| NT-10 | 15,2             | NT-20 | 15,44            | NT-30 | 16,40            | NT-40 | 13,8             |

**Table D.16 – RRT results of Nb-Sn/Cu specimen**

| IA    |                  | IB    |                  | IC    |                  | ID    |                  | IE    |                  |
|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|
| No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) | No.   | $L_{pi}$<br>(mm) |
| NS-1  | 17,2             | NS-11 | 16,39            | NS-21 | 15,43            | NS-31 | 16,56            | NS-41 | 17,0             |
| NS-2  | 17,6             | NS-12 | 16,36            | NS-22 | 15,82            | NS-32 | 16,61            | NS-42 | 15,5             |
| NS-3  | 17,0             | NS-13 | 17,80            | NS-23 | 15,14            | NS-33 | 16,16            | NS-43 | 16,3             |
| NS-4  | 17,4             | NS-14 | 20,10            | NS-24 | 15,52            | NS-34 | 16,14            | NS-44 | 16,4             |
| NS-5  | 16,6             | NS-15 | 17,82            | NS-25 | 17,08            | NS-35 | 16,24            | NS-45 | 18,0             |
| NS-6  | 16,9             | NS-16 | 18,20            | NS-26 | 17,02            | NS-36 | 16,22            | NS-46 | 16,9             |
| NS-7  | 17,1             | NS-17 | 14,98            | NS-27 | 16,16            | NS-37 | 16,35            | NS-47 | 17,2             |
| NS-8  | 16,5             | NS-18 | 18,32            | NS-28 | 15,75            | NS-38 | 16,32            | NS-48 | 21,2             |
| NS-9  | 17,4             | NS-19 | 17,35            | NS-29 | 15,18            | NS-39 | 16,36            | NS-49 | 15,9             |
| NS-10 | 16,0             | NS-20 | 15,99            | NS-30 | –                | NS-40 | 16,52            | NS-50 | 16,4             |

**Table D.17 – Measurement results and uncertainties of each institution for Nb-Ti/Cu specimen**

| Institution | $L_p$<br>(mm) | $\sigma$<br>(mm) | $u(L_p)$<br>(mm) | $U$<br>(mm) | RSU<br>(%) |
|-------------|---------------|------------------|------------------|-------------|------------|
| IA          | 15,2          | 0,76             | 0,24             | 0,48        | 3,16       |
| IB          | 16,38         | 1,72             | 0,54             | 1,08        | 6,59       |
| IC          | 15,38         | 0,88             | 0,28             | 0,56        | 3,64       |
| IE          | 15,2          | 1,10             | 0,35             | 0,70        | 4,61       |

**Table D.18 – Measurement results and uncertainties of each institution for Nb-Sn/Cu specimen**

| Institution | $L_p$<br>(mm) | $\sigma$<br>(mm) | $u(L_p)$<br>(mm) | $U$<br>(mm) | RSU<br>(%) |
|-------------|---------------|------------------|------------------|-------------|------------|
| IA          | 17,0          | 0,49             | 0,155            | 0,31        | 1,82       |
| IB          | 17,33         | 1,45             | 0,46             | 0,92        | 5,31       |
| IC          | 15,90         | 0,72             | 0,24             | 0,48        | 3,02       |
| ID          | 16,25         | 0,28             | 0,089            | 0,18        | 1,10       |
| IE          | 17,1          | 1,63             | 0,52             | 1,04        | 6,08       |

## Bibliography

- [1] Liu Fang, Long Feng, Gao Huixian, Chen Chao, Liu Bo, Wu Yu, Liu Huajun, Comparison and Analysis of Twist Pitch Length Test Methods for ITER Nb<sub>3</sub>Sn and NbTi Strands, *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(9): 2095-2099
  - [2] IEC 60050-815, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 815: Superconductivity* (available at <https://www.electropedia.org>)
- 

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-27:2025

## SOMMAIRE

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| AVANT-PROPOS .....                                                                                                                                    | 41 |
| INTRODUCTION.....                                                                                                                                     | 43 |
| 1 Domaine d'application .....                                                                                                                         | 44 |
| 2 Références normatives .....                                                                                                                         | 44 |
| 3 Termes et définitions .....                                                                                                                         | 44 |
| 4 Principe .....                                                                                                                                      | 45 |
| 5 Réactifs et matériaux auxiliaires .....                                                                                                             | 46 |
| 6 Appareils et outils .....                                                                                                                           | 46 |
| 7 Préparation de l'éprouvette.....                                                                                                                    | 46 |
| 7.1 Exigences .....                                                                                                                                   | 46 |
| 7.2 Nettoyage .....                                                                                                                                   | 46 |
| 7.3 Séchage .....                                                                                                                                     | 46 |
| 7.4 Élimination de la matrice de cuivre et ponçage de la barrière (s'applique aux éprouvettes Nb-Sn/Cu de type stabilisateur externe uniquement)..... | 47 |
| 8 Procédure de mesure .....                                                                                                                           | 47 |
| 8.1 Fixation de l'éprouvette .....                                                                                                                    | 47 |
| 8.2 Dissolution de l'éprouvette .....                                                                                                                 | 47 |
| 8.3 Nettoyage et séchage .....                                                                                                                        | 47 |
| 8.4 Mesurage.....                                                                                                                                     | 48 |
| 9 Calcul des résultats .....                                                                                                                          | 48 |
| 10 Incertitude de mesure .....                                                                                                                        | 49 |
| 11 Rapport d'essai .....                                                                                                                              | 49 |
| 11.1 Éprouvette .....                                                                                                                                 | 49 |
| 11.2 Résultats .....                                                                                                                                  | 49 |
| Annexe A (normative) Mesurage – Méthode de mesure directe.....                                                                                        | 50 |
| A.1 Méthode.....                                                                                                                                      | 50 |
| A.2 Procédure de mesure.....                                                                                                                          | 50 |
| A.2.1 Dissolution de l'éprouvette.....                                                                                                                | 50 |
| A.2.2 Nettoyage et séchage .....                                                                                                                      | 50 |
| A.2.3 Mesurage .....                                                                                                                                  | 51 |
| A.3 Incertitude de mesure .....                                                                                                                       | 51 |
| A.4 Rapport d'essai .....                                                                                                                             | 51 |
| Annexe B (normative) Mesurage – Méthode de traitement d'image .....                                                                                   | 52 |
| B.1 Méthode.....                                                                                                                                      | 52 |
| B.2 Procédure de mesure.....                                                                                                                          | 53 |
| B.2.1 Dissolution de l'éprouvette.....                                                                                                                | 53 |
| B.2.2 Nettoyage et séchage .....                                                                                                                      | 53 |
| B.2.3 Prise de photographies .....                                                                                                                    | 54 |
| B.2.4 Mesurage de l'angle d'hélice.....                                                                                                               | 54 |
| B.2.5 Résultat et méthode d'arrondissement .....                                                                                                      | 54 |
| B.3 Incertitude de mesure .....                                                                                                                       | 54 |
| B.4 Rapport d'essai.....                                                                                                                              | 54 |
| Annexe C (informative) Conception type de l'outil auxiliaire pour le mesurage du pas de torsade par la méthode de détorsadage .....                   | 55 |
| C.1 Appareil de mesure de l'angle de torsade .....                                                                                                    | 55 |
| C.2 Procédure de mesure.....                                                                                                                          | 56 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Annexe D (informative) Évaluation de l'incertitude .....                                                             | 58 |
| D.1 Méthode de détorsadage .....                                                                                     | 58 |
| D.1.1 Modèle mathématique .....                                                                                      | 58 |
| D.1.2 Incertitude de mesure du pas de torsade $L_p$ pour Nb-Ti/Cu .....                                              | 58 |
| D.1.3 Incertitude de mesure du pas de torsade $L_p$ pour Nb-Sn/Cu .....                                              | 60 |
| D.1.4 Essai interlaboratoire .....                                                                                   | 62 |
| D.1.5 Autres influences d'incertitude .....                                                                          | 63 |
| D.2 Méthode de mesure directe .....                                                                                  | 64 |
| D.2.1 Modèle mathématique .....                                                                                      | 64 |
| D.2.2 Procédures d'évaluation de l'incertitude type .....                                                            | 64 |
| D.2.3 Identification de l'éprouvette .....                                                                           | 65 |
| D.2.4 Évaluation de chaque composante d'incertitude type .....                                                       | 65 |
| D.2.5 Résultats d'évaluation de l'incertitude type composée du pas de torsade $L_p$ .....                            | 66 |
| D.2.6 Incertitude élargie du pas de torsade $L_p$ .....                                                              | 66 |
| D.2.7 Essai interlaboratoire .....                                                                                   | 66 |
| D.3 Méthode de traitement d'image .....                                                                              | 68 |
| D.3.1 Modèle mathématique .....                                                                                      | 68 |
| D.3.2 Procédures d'évaluation de l'incertitude type .....                                                            | 68 |
| D.3.3 Identification de l'éprouvette .....                                                                           | 69 |
| D.3.4 Évaluation de chaque composante d'incertitude type .....                                                       | 69 |
| D.3.5 Résultats d'évaluation de l'incertitude type composée du pas de torsade $L_p$ .....                            | 71 |
| D.3.6 Incertitude élargie du pas de torsade $L_p$ .....                                                              | 71 |
| D.3.7 Essai interlaboratoire .....                                                                                   | 71 |
| Bibliographie .....                                                                                                  | 73 |
| Figure 1 – Démonstration de principe .....                                                                           | 45 |
| Figure B.1 – Démonstration de principe de la méthode de traitement d'image .....                                     | 53 |
| Figure B.2 – Mesurage de l'angle d'hélice .....                                                                      | 54 |
| Figure C.1 – Conception type de l'outil auxiliaire pour le mesurage du pas de torsade .....                          | 56 |
| Figure C.2 – Fixation de l'éprouvette .....                                                                          | 56 |
| Figure C.3 – Flexion et dissolution de l'éprouvette .....                                                            | 56 |
| Figure C.4 – Retour à l'état initial .....                                                                           | 56 |
| Figure C.5 – Faire tourner le bouton pour détorsader les filaments .....                                             | 57 |
| Figure C.6 – Jugement du parallélisme des filaments .....                                                            | 57 |
| Figure C.7 – Mesurage de la distance .....                                                                           | 57 |
| Tableau D.1 – Résultats de mesurage de la longueur dissoute $l$ (Nb-Ti/Cu) .....                                     | 59 |
| Tableau D.2 – Résultats de mesurage de l'angle de détorsade $\theta$ (Nb-Ti/Cu) .....                                | 59 |
| Tableau D.3 – Résultats de mesurage de la longueur dissoute $l$ (Nb-Sn/Cu) .....                                     | 61 |
| Tableau D.4 – Résultats de mesurage de l'angle détorsadé $\theta$ (Nb-Sn/Cu) .....                                   | 61 |
| Tableau D.5 – Résultats RRT de l'éprouvette Nb-Ti/Cu .....                                                           | 62 |
| Tableau D.6 – Résultats RRT de l'éprouvette Nb-Sn/Cu .....                                                           | 63 |
| Tableau D.7 – Résultats de mesurage et incertitudes de mesure de chaque institution pour l'éprouvette Nb-Ti/Cu ..... | 63 |

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau D.8 – Résultats de mesurage et incertitudes de mesure de chaque institution pour l'éprouvette Nb-Sn/Cu .....                            | 63 |
| Tableau D.9 – Pas de torsade mesurés de l'éprouvette Nb-Ti/Cu .....                                                                             | 65 |
| Tableau D.10 – Résultats RRT de l'éprouvette Nb-Ti/Cu .....                                                                                     | 67 |
| Tableau D.11 – Résultats RRT de l'éprouvette Nb-Sn/Cu .....                                                                                     | 67 |
| Tableau D.12 – Résultats de mesurage et incertitudes de mesure de chaque institution pour l'éprouvette Nb-Ti/Cu .....                           | 67 |
| Tableau D.13 – Résultats de mesurage et incertitudes de mesure de chaque institution pour l'éprouvette Nb-Sn/Cu .....                           | 68 |
| Tableau D.14 – Diamètre mesuré ( $D_i$ ), angle d'hélice ( $\varphi_i$ ) et pas de torsade obtenu ( $L_{pi}$ ) pour l'éprouvette Nb-Sn/Cu ..... | 70 |
| Tableau D.15 – Résultats RRT de l'éprouvette Nb-Ti/Cu .....                                                                                     | 71 |
| Tableau D.16 – Résultats RRT de l'éprouvette Nb-Sn/Cu .....                                                                                     | 72 |
| Tableau D.17 – Résultats de mesurage et incertitudes de mesure de chaque institution pour l'éprouvette Nb-Ti/Cu .....                           | 72 |
| Tableau D.18 – Résultats de mesurage et incertitudes de mesure de chaque institution pour l'éprouvette Nb-Sn/Cu .....                           | 72 |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-27:2025

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## SUPRACONDUCTIVITÉ –

**Partie 27: Mesurage du pas de torsade de fils supraconducteurs  
pratiques – Mesurage du pas de torsade des composites  
supraconducteurs Nb-Ti/Cu et Nb-Sn/Cu**

## AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique 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. À 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'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de brevet revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 61788-27 a été établie par le comité d'études 90 de l'IEC: Supraconductivité. Il s'agit d'une Norme internationale.

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

| Projet      | Rapport de vote |
|-------------|-----------------|
| 90/532/FDIS | 90/540/RVD      |

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à son approbation.

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous [www.iec.ch/members\\_experts/refdocs](http://www.iec.ch/members_experts/refdocs). Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous [www.iec.ch/publications](http://www.iec.ch/publications).

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61788, publiées sous le titre général *Supraconductivité*, se trouve 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 [webstore.iec.ch](http://webstore.iec.ch) dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-27:2025

## INTRODUCTION

Le torsadage des supraconducteurs à filaments multiples est une étape importante dans le développement de fils avec des pertes en courant alternatif à un niveau acceptable pour les applications en courant alternatif. Le pas de torsade nécessaire dépend de l'architecture du fil, de la densité de courant critique, du matériau de matrice et de facteurs externes tels que la température, la fréquence et le champ magnétique appliqué.

Par conséquent, le pas de torsade est un paramètre très important dans la conception et l'application des fils supraconducteurs composites, qui est souvent examiné au cours de la dernière étape de la fabrication. En raison des différentes architectures des différents composites supraconducteurs, il convient d'adopter des méthodes d'essai appropriées pour des architectures spécifiques.

Le présent document spécifie la méthode de détorsadage pour mesurer le pas de torsade des composites supraconducteurs Nb-Ti/Cu et Nb-Sn/Cu [1]<sup>1</sup>. En tant que méthodes complémentaires, la méthode de mesure directe et la méthode de traitement d'image [1] sont respectivement spécifiées à l'Annexe A et à l'Annexe B.

---

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

## SUPRACONDUCTIVITÉ –

### Partie 27: Mesurage du pas de torsade de fils supraconducteurs pratiques – Mesurage du pas de torsade des composites supraconducteurs Nb-Ti/Cu et Nb-Sn/Cu

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61788 spécifie une méthode d'essai pour le mesurage du pas de torsade des composites supraconducteurs Nb-Ti et Nb-Sn/Cu par une méthode de détorsadage.

La méthode d'essai s'applique aux fils supraconducteurs composites Nb-Ti/Cu et Nb-Sn/Cu à structure monolithique, de section ronde d'un diamètre compris entre 0,2 mm et 2 mm ou de section rectangulaire dont la surface est équivalente à celle des fils à section ronde. Ces fils possèdent un diamètre de filament compris entre 6 µm et 200 µm, un pas de torsade compris entre 5 mm et 50 mm, et une matrice de cuivre ou d'alliage de cuivre. Le présent document utilise l'acide nitrique pour éliminer la matrice (cuivre ou alliage de cuivre), de sorte que la surface du fil supraconducteur composite puisse être revêtue d'un matériau dissoluble par l'acide nitrique.

Même si l'incertitude peut augmenter, la méthode peut s'appliquer aux fils supraconducteurs composites Nb-Ti/Cu ou Nb-Sn/Cu lorsque les paramètres de section, de diamètre de filament et de pas de torsade sont en dehors des limites.

Il est prévu que la méthode d'essai spécifiée dans le présent document s'applique à d'autres types de fils supraconducteurs composites après quelques modifications appropriées.

#### 2 Références normatives

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

##### 3.1

##### **torsade**

ensemble de spires formées par un filament autour de l'axe du fil central

[SOURCE: IEC 60050-815:2015 [2], 815-13-46, modifié – Dans la définition, "ou un brin" a été supprimé et "conducteur" a été remplacé par "fil central".]

### 3.2

#### sens de torsade

sens d'un filament en torsade

Note 1 à l'article: Il existe deux types de sens de torsade: torsade en Z (parfois appelée torsade à droite) lorsque le filament ou le brin est torsadé dans le sens horaire et torsade en S (parfois appelée torsade à gauche) lorsque le filament ou le brin est torsadé dans le sens antihoraire.

### 3.3

#### pas de torsade

$L_p$

longueur, mesurée dans la direction axiale, au bout de laquelle un filament revient pour la première fois à sa position relative d'origine dans un fil supraconducteur torsadé

[SOURCE: IEC 60050-815:2015 [2], 815-13-47, modifié – Dans la définition, "ou un brin" a été supprimé et "conducteur" a été remplacé par "fil supraconducteur".]

### 3.4

#### angle de torsade

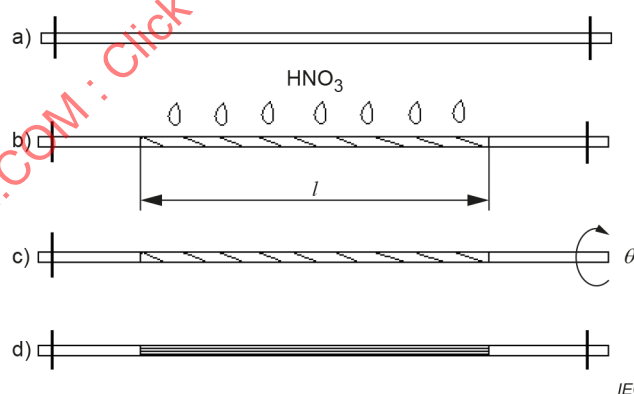
#### angle de détorsade

$\theta$

angle auquel tous les filaments d'un fil supraconducteur torsadé reviennent à leur position axiale parallèle d'origine lors du processus de détorsadage

## 4 Principe

Un fil supraconducteur à basse température est généralement composé de dizaines, voire de milliers de filaments supraconducteurs intégrés dans une matrice de cuivre et d'alliage de cuivre. Après avoir torsadé le fil supraconducteur, les filaments internes sont également torsadés de façon régulière avec un pas de torsade spécifique. Le présent document spécifie une méthode de détorsadage pour mesurer le pas de torsade (voir la Figure 1).



**Figure 1 – Démonstration de principe**

La méthode de détorsadage peut être brièvement décrite comme suit.

- Fixer les deux extrémités de l'éprouvette (Figure 1a).
- Éliminer la matrice de cuivre ou d'alliage de cuivre dans la partie centrale de l'éprouvette à l'aide d'une solution de  $\text{HNO}_3$  (Figure 1b).
- Mesurer la longueur de la zone dissoute (notée  $l$ , voir l'explication au 8.4);
- Tourner une extrémité du fil afin de le détorsader jusqu'à ce que les filaments de la zone dissoute soient parallèles (Figure 1c et Figure 1d). Enregistrer l'angle de rotation (noté  $\theta$ ).
- Calculer le pas de torsade  $L_p$  en utilisant  $l$  et  $\theta$  (voir les Formules (1) et (2)).

Les deux autres méthodes normatives, la méthode de mesure directe et la méthode de traitement d'image, sont spécifiées à l'Annexe A et à l'Annexe B, qui sont des alternatives équivalentes.

## 5 Réactifs et matériaux auxiliaires

Les réactifs suivants doivent être préparés pour la préparation des éprouvettes:

- détergent et dégraissant;
- éthanol anhydre;
- solution d'acide nitrique (une concentration en pourcentage de masse de 40 % à 65 % est recommandée).

Des gants en caoutchouc et des pinces résistantes à l'acide doivent être utilisés lors de la manipulation de la solution d'acide.

Les matériaux et outils auxiliaires suivants doivent être préparés pour la préparation des éprouvettes:

- papier de verre fin de maille 300 à 800 (s'applique aux éprouvettes Nb-Sn/Cu uniquement).

## 6 Appareils et outils

Les appareils et outils exigés pour le mesurage doivent inclure les éléments suivants:

- un outil auxiliaire pour le mesurage du pas de torsade, qui possède une graduation angulaire d'une exactitude de 5° ou mieux (un exemple est donné à l'Annexe C);
- une hotte à aspiration;
- un pied à coulisse (exactitude de 0,02 mm ou mieux);
- une étuve ou un séchoir.

## 7 Préparation de l'éprouvette

### 7.1 Exigences

La méthode de détorsadage doit être utilisée pour des pas de torsade compris entre 5 mm et 50 mm afin d'assurer une exactitude suffisante de la mesure. La longueur de l'éprouvette doit être supérieure à six fois le pas de torsade nominal.

L'éprouvette ne doit pas présenter de torsion ni de flexion.

### 7.2 Nettoyage

Un détergent et un dégraissant doivent être utilisés pour éliminer les taches d'huile et autres contaminations de l'éprouvette. L'éprouvette doit ensuite être rincée à plusieurs reprises à l'eau courante, puis déshydratée à l'éthanol anhydre.

### 7.3 Séchage

Après le nettoyage, l'éprouvette doit être complètement séchée d'une manière appropriée, par exemple par séchage à l'air chaud ou placée dans une étuve (60 °C à 70 °C).

#### **7.4 Élimination de la matrice de cuivre et ponçage de la barrière (s'applique aux éprouvettes Nb-Sn/Cu de type stabilisateur externe uniquement)**

Certains fils Nb-Sn/Cu possèdent une barrière de diffusion externe Nb ou Ta pour inhiber la réaction de diffusion entre la matrice Cu-Sn et le stabilisateur de cuivre externe. Cette barrière est insoluble dans l'acide nitrique. Lorsque le stabilisateur de cuivre externe est dissous, cette barrière empêche le cuivre interne d'être corrodé par l'acide nitrique. Par conséquent, la barrière doit être éliminée. Les étapes suivantes sont recommandées pour l'élimination de la barrière. Ces étapes ne s'appliquent pas aux fils à barrière distribuée.

- a) Élimination de la matrice de cuivre: immerger l'éprouvette Nb-Sn/Cu dans une solution d'acide nitrique et laisser le récipient dans une hotte à aspiration pendant environ 15 min jusqu'à ce que la gaine de cuivre de l'éprouvette soit complètement dissoute. Extraire l'éprouvette à l'aide de pinces résistantes à l'acide, la rincer à l'eau courante, puis la déshydrater avec de l'éthanol anhydre et la sécher.

Pour des raisons de sécurité, porter des manches longues, un pantalon et des gants en caoutchouc afin d'éviter les projections d'acide nitrique sur la peau.

- b) Examen de la surface de la barrière pour détecter une couture: si la barrière présente une couture, examiner la surface de la barrière, qui suit la position du filament au-dessous. Si une couture est clairement visible, l'éprouvette ne nécessite aucune autre préparation.
- c) Ponçage de la barrière: à l'aide d'un papier de verre fin, poncer uniformément la section de mesure jusqu'à ce que le rouge cuivré interne soit complètement exposé.

Utiliser une hotte à aspiration lors du ponçage.

- d) Nettoyage et séchage: Nettoyer et sécher l'éprouvette conformément au 7.2 et au 7.3, respectivement.

### **8 Procédure de mesure**

#### **8.1 Fixation de l'éprouvette**

Si nécessaire, pour les éprouvettes Nb-Sn/Cu avec barrière de diffusion externe, la barrière doit être éliminée à l'avance conformément au 7.4. Les deux extrémités de l'éprouvette doivent être serrées ou pressées étroitement sur l'outil auxiliaire afin de redresser l'éprouvette. Pendant le processus de fixation, aucune déformation, aucune flexion ni aucune autre action susceptible de compromettre les résultats de mesurage n'est admise.

#### **8.2 Dissolution de l'éprouvette**

Immerger la partie centrale de l'éprouvette, environ deux tiers de la longueur totale, dans une solution d'acide nitrique et l'y maintenir pendant environ 30 min. Cela peut être réalisé en poussant le curseur de l'outil auxiliaire vers le centre, ce qui permet de plier simultanément l'éprouvette. Les détails sont donnés à l'Annexe C.

Extraire la partie dissoute et observer les filaments internes. S'il reste des résidus de cuivre ou des filaments collés, ou si la limite de la zone dissoute n'est pas claire, immerger à nouveau la partie dans la solution d'acide nitrique. S'assurer que la position de l'éprouvette par rapport à la surface de l'acide nitrique ne varie pas, de sorte que les limites de la zone de dissolution soient aussi claires que possible.

Porter un équipement de protection individuelle et utiliser une hotte à aspiration lors de la manipulation de l'éprouvette.

#### **8.3 Nettoyage et séchage**

Lorsque tous les filaments internes sont complètement dispersés sans aucun résidu de cuivre, extraire la partie dissoute, l'ensemble de l'éprouvette étant toujours fixé sur l'outil auxiliaire. Nettoyer et sécher l'éprouvette conformément au 7.2 et au 7.3, respectivement.

## 8.4 Mesurage

Remettre l'éprouvette dans l'outil auxiliaire à l'état initial, à l'horizontale et sans flexion, puis observer le sens de torsade. Tout en fixant la position axiale de l'éprouvette, faire tourner l'une de ses extrémités dans le sens opposé afin de la détorsader. Pendant ce temps, observer attentivement les filaments ou la couture de la barrière, et interrompre la rotation lorsque l'ensemble des filaments ou la couture de la barrière est pratiquement parallèle à l'axe du fil.

Insérer deux morceaux de plaque mince, comme des feuilles de cuivre, d'environ 0,5 mm d'épaisseur et de 10 mm à 30 mm de largeur. Les deux morceaux de plaque sont superposés, sans aucun filament entre eux. Ils sont tous deux appliqués afin de prélever plusieurs filaments. L'un d'entre eux est maintenu au début de la zone dissoute, tandis que l'autre glisse vers la fin de la zone. Régler simultanément l'angle jusqu'à ce que les filaments prélevés soient complètement détorsadés; ces filaments sont désormais parallèles à l'axe du fil de l'éprouvette. En variante, si une couture est visible sur la barrière, utiliser l'appareil pour détorsader le fil jusqu'à ce que la couture soit parallèle à l'axe du fil.

Enregistrer l'angle total de rotation, c'est-à-dire l'angle de torsade  $\theta$ . Il est recommandé de répéter l'étape précédente plusieurs fois afin d'améliorer l'exactitude de mesure.

Mesurer la longueur des filaments prélevés à l'aide d'un pied à coulisse, en utilisant les feuilles de cuivre pour marquer les limites. Il est recommandé d'effectuer plusieurs mesurages afin d'améliorer l'exactitude de mesure. Noter que, selon la définition du pas de torsade,  $l$  est la longueur à l'état torsadé. Toutefois, comme la limite de la zone dissoute est difficile à identifier, ce compromis est justifié. D'une part, un outil auxiliaire approprié peut être conçu pour fixer la position des deux extrémités de l'éprouvette (voir l'Annexe C), de sorte que la distance de la partie dissoute reste inchangée. D'autre part, le processus de détorsadage ne peut pas assurer que tous les filaments soient complètement parallèles. Ainsi, seule la longueur ou la distance des filaments prélevés est mesurée. L'incertitude introduite est prise en compte dans l'évaluation de l'incertitude (Annexe D).

Pour une autre méthode de dissolution, l'éprouvette est dissoute, nettoyée et séchée à l'avance, puis fixée à l'outil pour le mesurage. Dans ce cas, l'éprouvette dissoute ne doit être torsadée ni avant ni pendant la fixation.

## 9 Calcul des résultats

Le pas de torsade doit être calculé et arrondi à une décimale à l'aide des Formules (1) et (2):

$$L_p = \frac{l}{n} \quad (1)$$

$$n = \frac{\theta}{360} \quad (2)$$

où

$L_p$  est le pas de torsade (mm);

$l$  est la longueur de la zone dissoute (mm);

$n$  est le nombre de spires;

$\theta$  est l'angle de détorsade (°).

## 10 Incertitude de mesure

Le pas de torsade est obtenu en mesurant la longueur de la zone dissoute  $l$  et l'angle de détorsade  $\theta$ . L'incertitude type élargie (RSU, *Relative Standard Uncertainty*) relative cible de la mesure ne doit pas dépasser 2 % ( $k = 2$ ). Les détails de l'évaluation de l'incertitude sont décrits à l'Article D.1.

## 11 Rapport d'essai

### 11.1 Éprouvette

Les informations suivantes concernant l'éprouvette doivent être consignées:

- a) type et classification du fil;
- b) identification de l'éprouvette;
- c) dimension (diamètre, longueur et largeur).

Les informations suivantes concernant l'éprouvette doivent, si possible, être consignées:

- d) fabricant;
- e) procédé de fabrication;
- f) numéro de lot;
- g) rapport nominal du volume de cuivre sur le volume hors cuivre;
- h) diamètre nominal d'un filament;
- i) nombre de filaments;
- j) photographie de la section.

### 11.2 Résultats

Les informations suivantes doivent être consignées:

- a) pas de torsade de chaque éprouvette;
- b) sens de torsade;
- c) méthode.

Les informations suivantes doivent, si nécessaire, être consignées:

- d) incertitude.

## **Annex A** (normative)

### **Mesurage – Méthode de mesure directe**

#### **A.1 Méthode**

La présente Annexe A décrit la méthode de mesure directe du pas de torsade. Elle s'applique aux fils supraconducteurs composites Nb-Ti/Cu et Nb-Sn/Cu de forme ronde ou rectangulaire et avec ou sans barrière de diffusion Nb ou Ta autour du faisceau de filaments supraconducteurs situé le plus à l'extérieur. Il est recommandé de l'appliquer pour des pas de torsade compris entre 5 mm et 100 mm, avec une reproductibilité et une exactitude élevées. Cette méthode peut également être utilisée lorsque le pas de torsade est supérieur à 100 mm, mais l'incertitude augmente pour les pas de torsade plus longs, par exemple pour un pas de torsade inférieur ou égal à 300 mm. Il est possible d'appliquer cette méthode aux fils Nb-Sn/Cu de type stabilisateur externe (avec barrière externe) sans élimination de la barrière lorsque les contours des filaments situés au-dessous sont visibles, ou lorsqu'une couture est visible sur la barrière après attaque de la gaine extérieure en cuivre.

#### **A.2 Procédure de mesure**

##### **A.2.1 Dissolution de l'éprouvette**

Découper une éprouvette d'une longueur nettement supérieure au pas de torsade nominal (pour des pas de torsade compris entre 50 mm et 100 mm, une longueur d'éprouvette de 300 mm est recommandée) à l'aide d'une paire de pinces propre, et coller une étiquette d'identification de l'éprouvette à une extrémité.

Essuyer l'éprouvette à l'aide de gaze imbibée d'éthanol anhydre en utilisant des gants propres.

Immerger l'éprouvette dans une solution d'acide nitrique à l'intérieur d'un cylindre gradué (par exemple, 100 ml) en laissant l'extrémité collée à l'extérieur. Il est important que la longueur immergée soit supérieure à 1,5 fois le pas de torsade prévu.

Porter un équipement de protection individuelle et utiliser une hotte à aspiration lors de la manipulation de l'éprouvette.

Préparer un cylindre gradué de même taille rempli d'eau distillée pour rincer l'éprouvette.

Dissoudre la gaine de cuivre, puis confirmer l'attaque de la gaine de cuivre, de sorte que les filaments situés le plus à l'extérieur commencent à être visibles le long de la circonférence de l'éprouvette. Le retrait du métal attaqué doit être aussi faible que possible afin d'assurer une détermination exacte du pas de torsade. Pour assurer ce degré d'attaque, l'attaque de l'éprouvette doit être continuellement contrôlée par examen visuel. Pour les fils Nb-Sn/Cu de type stabilisateur externe (avec barrière externe), l'éprouvette doit être préparée conformément au 7.4, étapes a) et b).

##### **A.2.2 Nettoyage et séchage**

Extraire l'éprouvette de la solution, puis la placer dans le cylindre gradué rempli d'eau distillée afin de bien la rincer, ou la rincer rapidement à l'eau courante.

Après rinçage, sécher complètement l'éprouvette en utilisant de l'éthanol anhydre et de l'air chaud, une étuve ou un tissu non marquant.

### A.2.3 Mesurage

Suivre et marquer un ou plusieurs filaments visibles le long de l'axe du fil à l'aide d'un marqueur permanent. Cela peut être réalisé en utilisant un microscope optique, si nécessaire. Pour les fils Nb-Sn/Cu de type stabilisateurs externes avec une couture de barrière, la couture elle-même doit être utilisée comme guide visuel. Aucun marquage sur l'éprouvette n'est nécessaire.

Mesurer la longueur d'un ou de quelques pas de torsade à l'aide d'une règle ou d'un pied à coulisse.

Calculer le pas de torsade en divisant la longueur mesurée par le nombre de pas de torsade marqués.

$$L_p = \frac{L_n}{n} \quad (\text{A.1})$$

où

$L_p$  est le pas de torsade;

$L_n$  est la longueur de  $n$  pas de torsade;

$n$  est le nombre mesuré de pas de torsade.

NOTE Le mesurage peut être effectué avec plusieurs éprouvettes, dans l'idéal plus de 10 éprouvettes, ou plusieurs mesurages avec une seule éprouvette, dans l'idéal plus de 10 mesurages.

### A.3 Incertitude de mesure

L'incertitude type élargie (RSU) relative cible de la mesure ne doit pas dépasser 5 % ( $k = 2$ ). Les détails de l'évaluation de l'incertitude sont décrits à l'Article D.2.

### A.4 Rapport d'essai

Voir l'Article 11.

## Annex B (normative)

### Mesurage – Méthode de traitement d'image

#### B.1 Méthode

La présente Annexe B décrit la méthode de traitement d'image pour mesurer le pas de torsade. Elle s'applique aux fils supraconducteurs composites Nb-Ti/Cu et Nb-Sn/Cu de forme ronde ou rectangulaire et avec ou sans barrière de diffusion Nb ou Ta autour du faisceau de filaments supraconducteurs situé le plus à l'extérieur. Il est recommandé de l'appliquer pour des pas de torsade compris entre 5 mm et 300 mm. Cette méthode peut être utilisée lorsque le pas de torsade est supérieur à 50 mm, mais l'incertitude augmente pour les pas de torsade plus longs. La méthode présente une incertitude plus élevée lorsque le pas de torsade augmente, car l'incertitude de la lecture de l'angle augmente avec le pas de torsade. Le schéma est représenté à la Figure B.1. Cette méthode est particulièrement avantageuse pour les éprouvettes avec un nombre élevé de filaments, les éprouvettes avec un très faible diamètre de fil et les éprouvettes avec une barrière Nb ou Ta autour du paquet de filaments. L'éprouvette doit être maintenue droite tout au long du processus de mesure. Le mesurage doit être effectué sur des photographies (par exemple, photographies par microscope électronique à balayage (MEB), photographies métallographiques, etc.). Il est judicieux d'utiliser une photographie de la surface de l'éprouvette avec une grande profondeur de champ afin de déterminer l'hélice du pas de torsade. Ici, l'angle d'hélice des filaments et le diamètre du fil sur la photographie après élimination de la matrice Cu (ou de la barrière de diffusion, dans le cas d'un fil Nb-Sn/Cu de type stabilisateur externe) sont nécessaires pour déterminer le pas de torsade.

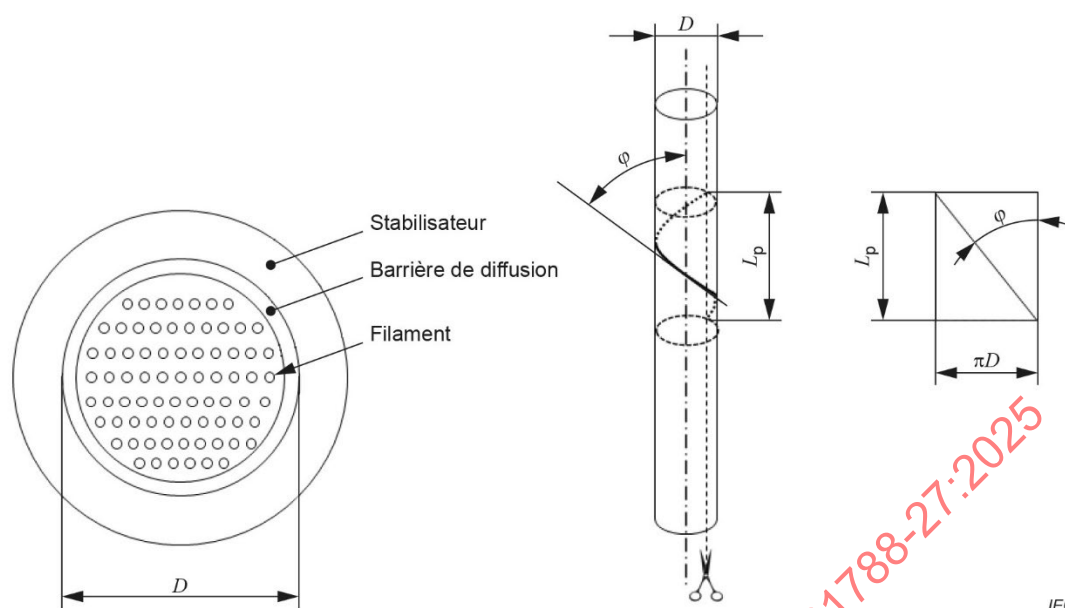
Le pas de torsade est calculé par la Formule (B.1):

$$L_p = \frac{\pi D}{\tan(\varphi)} \quad (\text{B.1})$$

où

$\varphi$  est l'angle d'hélice (rad),

$D$  est le diamètre du fil après élimination de la matrice Cu (ou barrière de diffusion) (mm).



**Figure B.1 – Démonstration de principe de la méthode de traitement d'image**

Il est recommandé de mesurer l'angle d'hélice dans deux orientations de l'éprouvette, tournées de 90° par rapport à l'axe de l'éprouvette. Cela est nécessaire pour exclure l'erreur de mesure due à l'ovalisation de l'éprouvette et pour les éprouvettes rectangulaires. Dans ce cas, le pas de torsade est:  $L_p = 0,5 (L_p(\text{axe } x) + L_p(\text{axe } y))$ .

## B.2 Procédure de mesure

### B.2.1 Dissolution de l'éprouvette

Pour les éprouvettes sans barrière, le processus d'attaque doit être effectué conformément au A.2.1. Pour les fils Nb-Sn/Cu de type stabilisateur externe, l'éprouvette doit être préparée conformément au 7.4, étapes a) et b). La matrice de cuivre doit être dissoute dans de l'acide nitrique jusqu'à ce que les faisceaux de filaments en torsade ou la couture de la barrière (dans le cas d'un fil Nb-Sn/Cu avec barrière externe) soient reconnaissables. La longueur de l'éprouvette doit être suffisante pour permettre la manipulation de l'éprouvette et pour assurer une mesure exacte de l'angle dans le champ complet du microscope utilisé. Étiqueter l'éprouvette et la placer, droite, dans un bécier ou un cylindre rempli d'acide nitrique.

Porter un équipement de protection individuelle et utiliser une hotte à aspiration lors de la manipulation de l'éprouvette.

### B.2.2 Nettoyage et séchage

Extraire l'éprouvette et la laver à plusieurs reprises à l'eau courante pendant au moins 2 min. En outre, après chaque immersion de l'éprouvette dans l'acide nitrique, celle-ci doit être bien rincée à l'eau distillée et séchée. Lorsque la barrière devient visible, rincer l'éprouvette dans un cylindre gradué rempli d'eau distillée ou à l'eau courante, puis la déshydrater avec de l'éthanol anhydre et la sécher à l'air chaud, dans une étuve ou à l'aide d'un tissu non marquant.

### B.2.3 Prise de photographies

Redresser l'éprouvette et la placer sous un microscope métallurgique ou sur la platine d'un microscope électronique à balayage (MEB). Photographier la surface de l'éprouvette. Si le microscope est capable de mesurer la distance, mesurer et enregistrer le diamètre ( $D$ ) au niveau de la section attaquée lors de ce processus ou utiliser le logiciel d'analyse d'image correspondant pour déterminer le diamètre de l'éprouvette. Dans le cas contraire, mesurer le diamètre au micromètre ultérieurement. Il est judicieux d'effectuer le mesurage plusieurs fois et de déterminer le diamètre ( $D$ ) au niveau de la section attaquée en établissant la moyenne des valeurs mesurées.

### B.2.4 Mesurage de l'angle d'hélice

Traiter la photo à l'aide d'un logiciel d'analyse d'image. Tracer deux lignes de référence parallèles à l'axe de l'éprouvette au niveau des deux bords de l'éprouvette sur la section attaquée (comme cela est représenté à la Figure B.2). Tracer des lignes le long de la torsade à proximité de l'axe et mesurer au moins trois angles d'hélice  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$ . Établir la moyenne de ces résultats afin de réduire les erreurs aléatoires dans le résultat final.

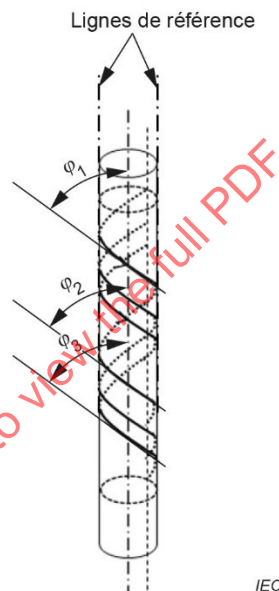


Figure B.2 – Mesurage de l'angle d'hélice

### B.2.5 Résultat et méthode d'arrondissement

Calculer  $L_p$  à l'aide de la Formule (B.1). Le résultat doit être arrondi à une décimale.

NOTE Le mesurage peut être effectué avec plusieurs éprouvettes, dans l'idéal plus de 10 éprouvettes, ou plusieurs mesurages avec une seule éprouvette, dans l'idéal plus de 10 mesurages.

## B.3 Incertitude de mesure

L'incertitude type élargie (RSU) relative cible de la mesure ne doit pas dépasser 7 % ( $k = 2$ ). Les détails de l'évaluation de l'incertitude sont décrits à l'Article D.3.

## B.4 Rapport d'essai

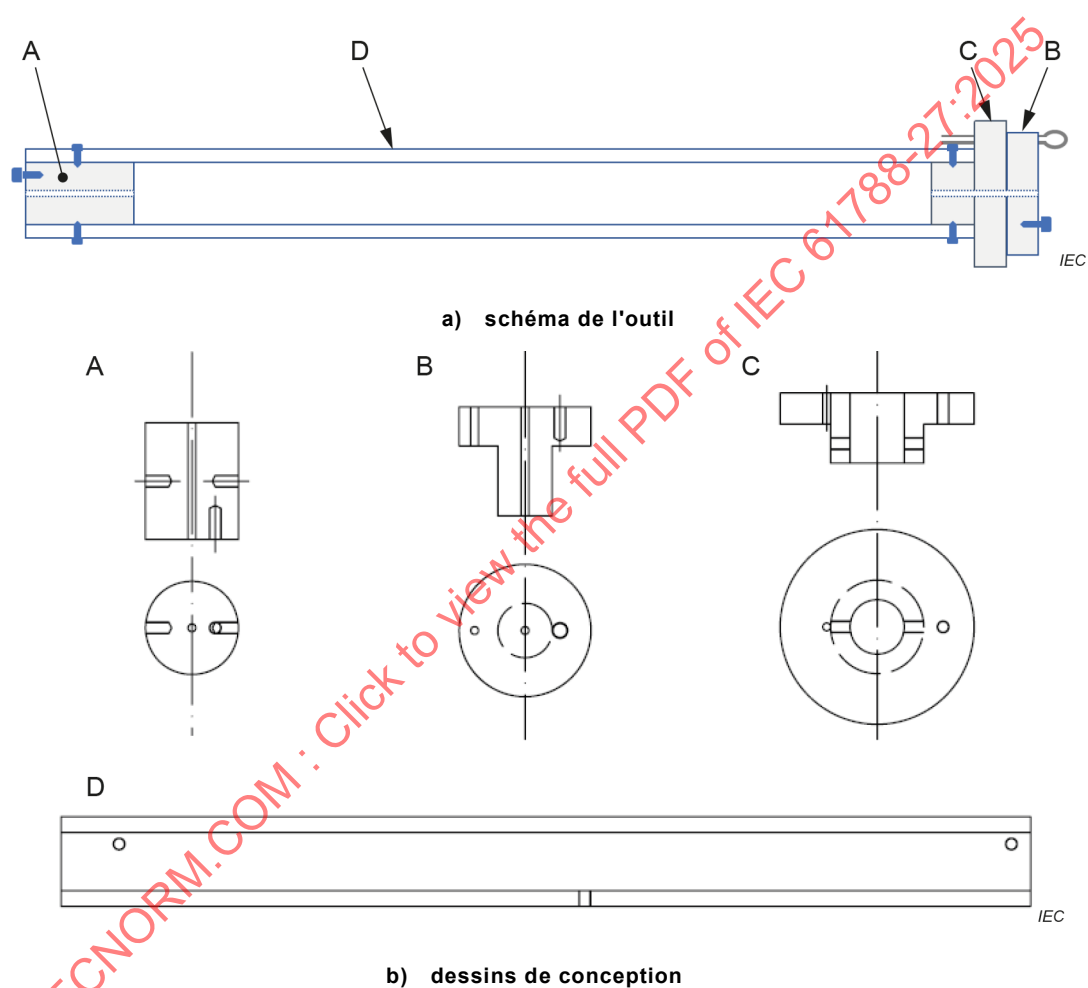
Voir l'Article 11.

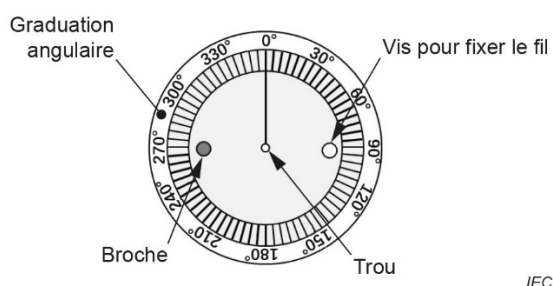
## Annex C (informative)

### Conception type de l'outil auxiliaire pour le mesurage du pas de torsade par la méthode de détorsadage

#### C.1 Appareil de mesure de l'angle de torsade

Un exemple d'outil auxiliaire exigé pour le mesurage du pas de torsade est donné à la Figure C.1.





IEC

c) détails de la partie C

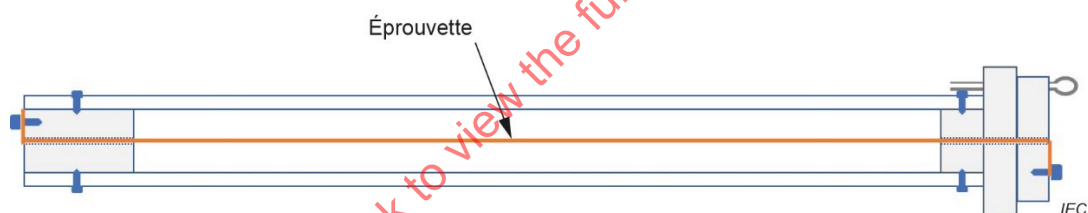
### Légende

- A pied à coulisse
- B bouton tournant
- C disque avec graduation angulaire
- D glissière

**Figure C.1 – Conception type de l'outil auxiliaire pour le mesurage du pas de torsade**

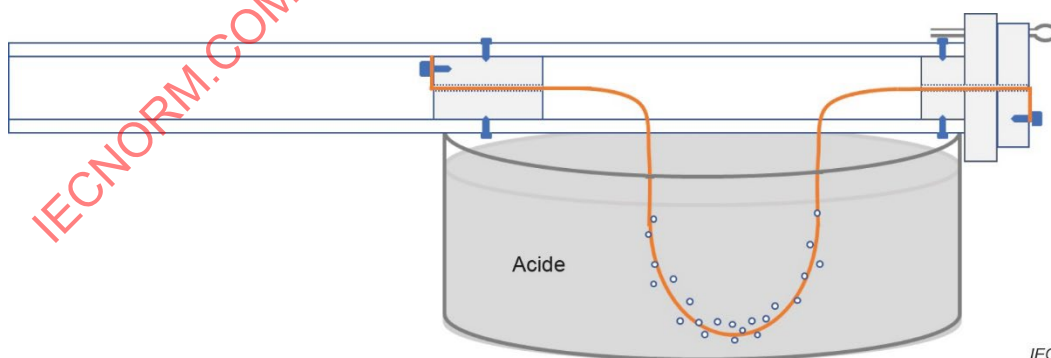
## C.2 Procédure de mesure

Les procédures de mesure du pas de torsade sont représentées de la Figure C.2 à la Figure C.7. Les exigences sont données à l'Article 8.



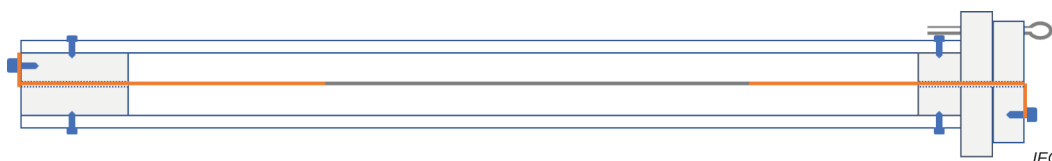
IEC

**Figure C.2 – Fixation de l'éprouvette**



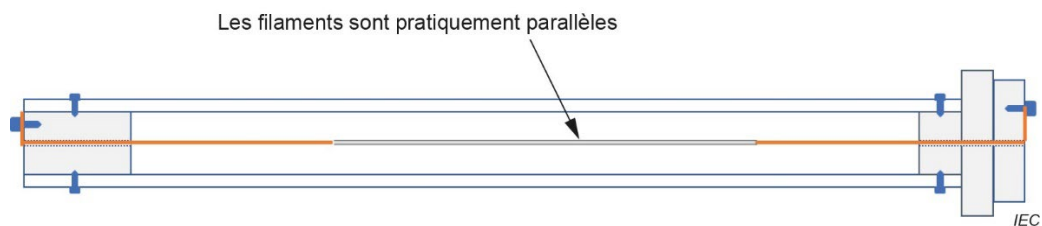
IEC

**Figure C.3 – Flexion et dissolution de l'éprouvette**

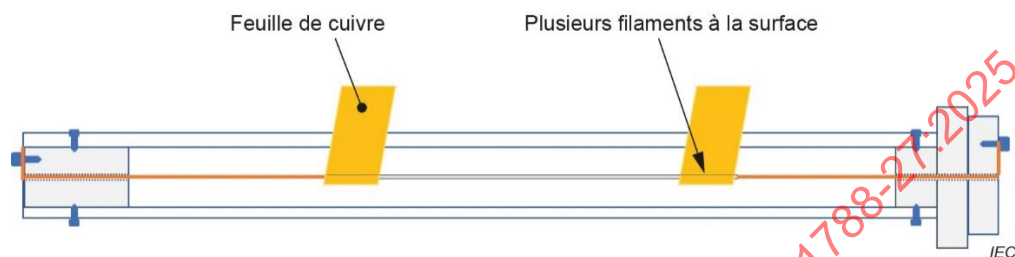


IEC

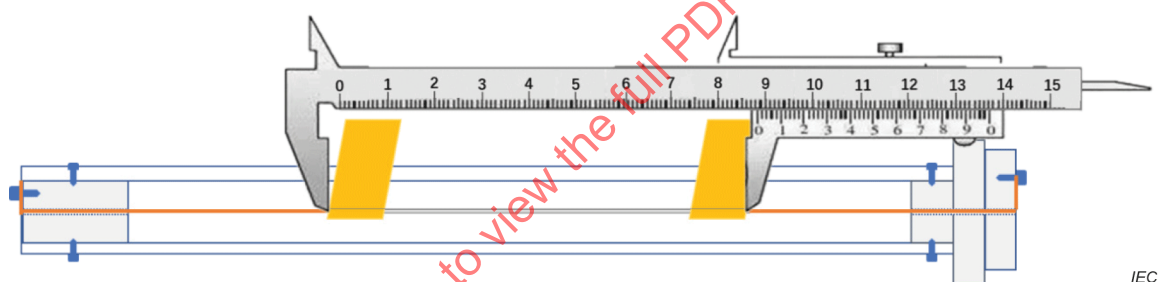
**Figure C.4 – Retour à l'état initial**



**Figure C.5 – Faire tourner le bouton pour détorsader les filaments**



**Figure C.6 – Jugement du parallélisme des filaments**



**Figure C.7 – Mesurage de la distance**

## Annex D (informative)

### Évaluation de l'incertitude

#### D.1 Méthode de détorsadage

##### D.1.1 Modèle mathématique

Selon la Formule (1), le pas de torsade est calculé par la Formule (D.1):

$$L_p = \frac{l}{\theta/360} \quad (D.1)$$

où  $L_p$  est le pas de torsade,  $l$  est la longueur de la zone dissoute et  $\theta$  est l'angle de détorsade.

L'incertitude type composée  $u(L_p)$  pour cette méthode de mesure peut être obtenue par la Formule (D.2):

$$u(L_p) = \sqrt{c_1^2 u(l)^2 + c_2^2 u(\theta)^2} \quad (D.2)$$

où  $u(L_p)$  est l'incertitude type composée du pas de torsade mesurée par la présente méthode, et les coefficients de sensibilité  $c_1$  et  $c_2$  peuvent être obtenus par la dérivation partielle de la Formule (D.1):

$$c_1 = \frac{\partial L_p}{\partial l} = \frac{360}{\theta} \quad (D.3)$$

$$c_2 = \frac{\partial L_p}{\partial \theta} = -\frac{360 \times l}{\theta^2} \quad (D.4)$$

#### D.1.2 Incertitude de mesure du pas de torsade $L_p$ pour Nb-Ti/Cu

##### D.1.2.1 Identification de l'éprouvette

Les paramètres de l'éprouvette Nb-Ti/Cu utilisés pour l'évaluation de l'incertitude sont les suivants.

- Type de produit: fil supraconducteur composite Nb-Ti/Cu.
- Diamètre extérieur: 0,73 mm.
- Rapport nominal du volume de cuivre sur le volume hors cuivre: 2,35.
- Diamètre moyen d'un filament:  $\sim 7,8 \mu\text{m}$ .
- Nombre de filaments:  $\sim 2\,630$ .

### D.1.2.2 Incertitude type composée de chaque variable

#### D.1.2.2.1 Longueur de la zone dissoute $l$

Les facteurs contributifs sont les suivants.

- a) L'éprouvette a été mesurée 10 fois, et les résultats sont donnés dans le Tableau D.1. L'incertitude de type A correspond à l'écart-type, calculé à 0,1 mm.

**Tableau D.1 – Résultats de mesurage de la longueur dissoute  $l$  (Nb-Ti/Cu)**

| Mesurage | $l$<br>(mm) |
|----------|-------------|
| 1        | 128,18      |
| 2        | 128,40      |
| 3        | 128,08      |
| 4        | 128,44      |
| 5        | 128,94      |
| 6        | 129,04      |
| 7        | 128,66      |
| 8        | 128,52      |
| 9        | 128,46      |
| 10       | 128,38      |

- b) L'exactitude du pied à coulisse est de 0,02 mm, la contribution à l'incertitude est donc de 0,01 mm.
- c) En prenant pour hypothèse que l'erreur due au manque de clarté de la limite de la zone dissoute est de 0,5 mm, la contribution à l'incertitude est de 0,29 mm.
- d) La distance étant mesurée plutôt que la longueur, la structure de fixation de l'outil entraîne une erreur qui est estimée à 0,5 mm, de sorte que la contribution à l'incertitude est de 0,29 mm.

En résumé, l'incertitude type composée de la longueur dissoute  $l$  est la racine carrée de la somme des carrés des quatre termes, soit 0,419 mm.

#### D.1.2.2.2 Angle de détorsade $\theta$

Les facteurs contributifs sont les suivants.

- a) L'éprouvette a été mesurée 10 fois, et les résultats sont donnés dans le Tableau D.2. L'incertitude de type A correspond à l'écart-type, calculé à 9,09°.

**Tableau D.2 – Résultats de mesurage de l'angle de détorsade  $\theta$  (Nb-Ti/Cu)**

| Mesurage | $\theta$<br>(°) |
|----------|-----------------|
| 1        | 3 270           |
| 2        | 3 260           |
| 3        | 3 230           |
| 4        | 3 270           |
| 5        | 3 280           |
| 6        | 3 330           |
| 7        | 3 290           |
| 8        | 3 310           |
| 9        | 3 250           |
| 10       | 3 270           |

- b) L'exactitude de l'angle est de  $5^\circ$ , la contribution à l'incertitude est donc de  $2,9^\circ$ .
- c) L'erreur due à l'observation du parallélisme est de  $20^\circ$ , la contribution à l'incertitude est donc de  $11,5^\circ$ .
- d) L'erreur due à une éventuelle flexion ou torsion de l'éprouvette est de l'ordre de  $10^\circ$ , l'incertitude introduite est donc de  $5,8^\circ$ .

En résumé, l'incertitude type composée de l'angle  $u_c(\theta)$  est de  $16,052^\circ$ .

#### D.1.2.3 Incertitude type composée de $L_p$

En substituant  $\bar{l} = 128,51 \text{ mm}$  et  $\bar{\theta} = 3\,276^\circ$  dans les Formules (D.3) et (D.4)), les deux coefficients de sensibilité peuvent être obtenus tels que  $c_1 = 0,110$  et  $c_2 = -0,004$ .

L'incertitude type composée de  $L_p$  est calculée par la Formule (D.2).  $u_c(L_p)$  est de  $0,083 \text{ mm}$ .

#### D.1.2.4 Résultat de mesure de $L_p$

La valeur  $L_p$  calculée par la Formule (D.1) est de  $14,12 \text{ mm}$ . En prenant le facteur de couverture  $k = 2$ , l'incertitude élargie  $U$  est de  $0,17 \text{ mm}$ , et l'incertitude type élargie relative est de  $1,18 \%$ . Le résultat de mesure est donc exprimé par  $L_p = (14,12 \pm 0,17) \text{ mm}$ .

### D.1.3 Incertitude de mesure du pas de torsade $L_p$ pour Nb-Sn/Cu

#### D.1.3.1 Identification de l'éprouvette

Les paramètres du fil d'essai utilisés pour évaluer l'incertitude de la méthode sont les suivants.

- Type de produit: fil supraconducteur composite Nb-Sn/Cu.
- Diamètre extérieur:  $0,82 \text{ mm}$ .
- Rapport nominal du volume de cuivre sur le volume hors cuivre:  $1,0$ .
- Diamètre moyen d'un filament:  $\sim 6,0 \mu\text{m}$ .
- Nombre de filaments:  $\sim 3\,040$ .

#### D.1.3.2 Incertitude type composée de chaque variable

##### D.1.3.2.1 Longueur de la zone dissoute $l$

Les facteurs contributifs sont les suivants:

- a) l'éprouvette a été mesurée 10 fois, et les résultats sont donnés dans le Tableau D.3. L'incertitude de type A correspond à l'écart-type, calculé à  $0,19 \text{ mm}$ ;