

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Superconductivity –

Part 18: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test of Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2223 and Bi-2212 composite superconductors

Supraconductivité –

Partie 18: Mesure des propriétés mécaniques – Essai de traction à température ambiante des supraconducteurs composites Bi-2223 et Bi-2212 avec gaine Ag et/ou en alliage d'Ag

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-18:2013



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2013 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

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

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables you to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...).

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) on-line.

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

Liens utiles:

Recherche de publications CEI - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI 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.

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) en ligne.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Superconductivity –

Part 18: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test of Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2223 and Bi-2212 composite superconductors

Supraconductivité –

Partie 18: Mesure des propriétés mécaniques – Essai de traction à température ambiante des supraconducteurs composites Bi-2223 et Bi-2212 avec gaine Ag et/ou en alliage d'Ag

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

W

ICS 29.050

ISBN 978-2-8322-1051-2

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

CONTENTS

1	Scope.....	7
2	Normative references	7
3	Terms and definitions	7
4	Principle	9
5	Apparatus.....	9
5.1	General	9
5.2	Testing machine	9
5.3	Extensometer	9
6	Specimen preparation.....	9
6.1	General	9
6.2	Length of specimen	10
6.3	Removing insulation	10
6.4	Determination of cross-sectional area (S_0)	10
7	Testing conditions	10
7.1	Specimen gripping.....	10
7.2	Setting of extensometer.....	10
7.3	Testing speed.....	10
7.4	Test.....	10
8	Calculation of results	12
8.1	Modulus of elasticity (E)	12
8.2	0,2 % proof strength ($R_{p0,2}$)	13
8.3	Tensile stress at specified strains (R_A).....	13
8.4	Fracture strength (R_f).....	14
9	Uncertainty of measurement.....	14
10	Test report.....	14
10.1	Specimen	14
10.2	Results.....	15
10.3	Test conditions.....	15
	Annex A (informative) Additional information relating to Clauses 1 to 14	16
	Annex B (informative) Uncertainty considerations	26
	Annex C (informative) Specific examples related to evaluation of uncertainties for Ag/Bi-2223 and Ag/Bi-2212 wires	30
	Figure 1 – Typical stress-strain curve and definition of modulus of elasticity and 0,2 % proof strengths of an externally laminated Ag/Bi-2223 wire by brass foil	11
	Figure 2 – Typical stress-strain curve of an Ag/Bi-2223 wire where the 0,2 % proof strengths could not be determined and definition of tensile stresses at specified strains	12
	Figure A.1 – Low mass Siam twin type extensometer with a gauge length of ~ 12,3 mm (total mass ~ 0,5 g).....	16
	Figure A.2 – Low mass double extensometer with a gauge length of ~ 25,6 mm (total mass ~ 3 g).....	17
	Figure A.3 – An example of the extensometer provided with balance weight and vertical specimen axis	18
	Figure A.4 – Original raw data of an Ag/Bi-2223 wire measurement in form of load and displacement graph.....	19

Figure A.5 – Typical stress versus strain of an Ag/Bi-2223 wire up to the elastic limit corresponding to the transition region from elastic to plastic deformation (point G) 20

Figure C.1 – Measured stress versus strain curve for Bi-2223 wire 31

Table A.1 – Results of relative standard uncertainty values achieved on different Ag/Bi-2223 wires during the international round robin tests 23

Table A.2 – Selected data for F test for E_0 of Sample E bare wire 24

Table A.3 – Results of F-test for the variations of E_0 of four kinds of Bi-2223 wires 24

Table B.1 – Output signals from two nominally identical extensometers 27

Table B.2 – Mean values of two output signals 27

Table B.3 – Experimental standard deviations of two output signals 27

Table B.4 – Standard uncertainties of two output signals 27

Table B.5 – Coefficient of variations of two output signals 28

Table C.1. – Load cell specifications according to manufacturer's data sheet 32

Table C.2 – Uncertainties from various factors for stress measurement 33

Table C.3 – Uncertainties with respect to measurement of strain measurement 35

Table C.4 – Summary of evaluated uncertainties caused by various factors 35

Table C.5 – Results of uncertainty evaluation for the modulus of elasticity ($E_0 = 86,1$ GPa) as a function of initial cross head rate 36

Table C.6 – Uncertainties from various factors for stress measurement 37

Table C.7 – Results of uncertainty evaluation for the stress ($R = 42,5$ MPa) as a function of initial strain rate 37

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-18:2013

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –**Part 18: Mechanical properties measurement –
Room temperature tensile test of Ag- and/or Ag alloy-sheathed
Bi-2223 and Bi-2212 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 should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61788-18 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
90/326/FDIS	90/327/RVD

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

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

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 publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-18:2013

INTRODUCTION

Several types of composite superconductors have now been commercialised. Especially, high temperature superconductors such as Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2223 (Ag/Bi-2223) and Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2212 (Ag/Bi-2212) wires are now manufactured in industrial scale. Commercial composite superconductors have a high current density and a small cross-sectional area. The major applications of composite superconductors are to build electrical power devices and superconducting magnets. While the magnet is being manufactured, complicated stresses/strains are applied to its windings and, while it is being energized, a large electromagnetic force is applied to the superconducting wires because of its high current density. It is therefore indispensable to determine the mechanical properties of the superconductive wires from which the windings are made.

The Ag/Bi-2223 and Ag/Bi-2212 superconductive composite wires fabricated by the powder-in-tube method are composed of a number of oxide filaments with silver and silver alloy as a stabilizer and supporter. In the case that the external reinforcement of Ag/Bi-2223 and Ag/Bi-2212 wires by using thin stainless or Cu alloy foils has been adopted in order to resist the large electromagnet force, this standard shall be also applied.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-18:2013

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 18: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test of Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2223 and Bi-2212 composite superconductors

1 Scope

This International Standard specifies a test method detailing the tensile test procedures to be carried out on Ag/Bi-2223 and Ag/Bi-2212 superconductive composite wires at room temperature.

This test is used to measure the modulus of elasticity and to determine the 0,2 % proof strength.

When the 0,2 % proof strength could not be determined due to earlier failure, the stress level at apparent strains of 0,05 %, 0,1 %, 0,15 %, 0,2 %, 0,25 % with increment of 0,05 % is measured.

The values for elastic limit, fracture strength, percentage elongation after fracture and the fitted type of 0,2 % proof strength serve only as a reference (see Clauses A.4, A.5, A.6 and A.10).

The sample covered by this test procedure should have a round or rectangular cross-section with an area of 0,3 mm² to 2,0 mm² (corresponding to the tape-shaped wires with width of 2,0 mm to 5,0 mm and thickness of 0,16 mm to 0,4 mm).

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050 (all parts), *International Electrotechnical Vocabulary* (available at <<http://www.electropedia.org>>)

ISO 376, *Metallic materials – Calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines*

ISO 6892-1, *Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature*

ISO 7500-1, *Metallic materials – Verification of static uniaxial testing machines – Part 1: Tension/compression testing machines – Verification and calibration of the force-measuring system*

ISO 9513, *Metallic materials – Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, terms and definitions given in IEC 60050-815 and ISO 6892-1, as well as the following terms and definitions apply.

3.1

tensile stress

R

tensile force divided by the original cross-sectional area at any moment during the test

3.2

tensile strain

A

displacement increment divided by initial gauge length of extensometers at any moment during the test

3.3

extensometer gauge length

L_G

length of the parallel portion of the test piece used for the measurement of displacement by means of an extensometer

3.4

distance between grips

L_o

length between grips that hold a test specimen in position before the test is started

3.5

modulus of elasticity

E

gradient of the straight portion of the stress-strain curve in the elastic deformation region

SEE: Figure 1.

Note 1 to entry: It can be determined differently depending upon the adopted procedures:

- a) one from the initial loading curve by zero offset line expressed as E_0 ,
- b) the other one given by the slope of line during the elastic unloading, expressed as E_U .

3.6

0,2 % proof strength

$R_{p0,2}$

stress value when the superconductive composite wire yields by 0,2 %

SEE: Figure 1.

Note 1 to entry: The designated stress, $R_{p0,2-0}$ or $R_{p0,2-U}$ corresponds to point A or B obtained from the initial loading or unloading curves in Figure 1, respectively. This strength is regarded as a representative 0,2 % proof strength of the composite.

3.7

tensile stress at specified strains

R_A

tensile stress corresponding to different specified strain (A)

3.8

fracture strength

R_f

tensile stress at the fracture

Note 1 to entry: In most cases, the fracture strength is defined as tensile stress corresponding to the maximum testing force

3.9

tensile stress at elastic limit

R_{el}

tensile stress at elastic limit corresponding to transition instant from elastic to plastic deformation

3.10

tensile strain at elastic limit

A_{el}

strain at elastic limit

Note 1 to entry: The stress R_{el} and the corresponding strain A_{el} refer to point G in Figure A.5, respectively and are regarded as the transition point from elastic to plastic deformation.

4 Principle

The test consists of straining a test piece by a tensile force, generally to fracture, in principle for the purpose of determining the mechanical properties defined in Clause 3.

Depending on the employed strain measuring method, however, the quantities determined by the present test should be limited. When using the conventional single extensometer system, the determination of E_U and $R_{p0,2-U}$ is recommended. On the other hand, all quantities described here can be determined by using double extensometer system, because of its capability to compensate the bending effects of the specimen thereby guaranteeing a proper determination of the modulus of elasticity.

5 Apparatus

5.1 General

The test machine and the extensometers shall conform to ISO 7500-1 and ISO 9513, respectively. The calibration shall obey ISO 376. The special requirements of this standard are presented here.

5.2 Testing machine

A tensile machine control system that provides a constant crosshead speed shall be used. Grips shall have a structure and strength appropriate for the test specimen and shall be constructed to provide a firm connection with the tensile machine. The faces of the grips shall be filed or knurled, or otherwise roughened, so that the test specimen will not slip during the test. Gripping may be a screw type, or pneumatically or hydraulically actuated.

5.3 Extensometer

The mass of the extensometer shall be 30 g or less, so as not to affect the mechanical properties of superconductive composite wires. The mass of the extensometers shall be balanced symmetrically around the wire to avoid any non-alignment force. Care shall be taken to prevent bending moments from being applied to the test specimen (see Clauses A.2 and A.3).

6 Specimen preparation

6.1 General

When a test specimen sampled from a bobbin needs to be straightened, a method that affects the material as little as possible shall be used. Care shall be taken to prevent bending or pre-loading when the specimen is handled manually.

6.2 Length of specimen

The length of the test specimen shall be the sum of the inward distance between grips and both grip lengths. The inward distance between the grips shall be 60 mm or more, as requested for the installation of the extensometer.

6.3 Removing insulation

If the test specimen surface is coated with an insulating material, the coatings shall be removed. Either a chemical or mechanical method shall be used with care taken in removing the coating so as not to damage the specimen surface (see Clause A.7).

6.4 Determination of cross-sectional area (S_0)

A micrometer or other dimension-measuring apparatus shall be used to obtain the cross-sectional area of the specimen after the insulation coating has been removed. The cross-sectional area of tape-shaped wires shall be obtained from the product of its thickness and width. Corrections to be made for the corners of the cross-sectional area shall be determined through consultation among the parties concerned (see Clause A.8). In addition, in the cases of lens-shaped wires, measurement of width and thickness by photograph may also be done. Mean value of middle and edge thickness shall be used for wires with varying thickness along its width to minimize mismatch effect on its cross-sectional area. The cross-sectional area of a round wire shall be calculated using the arithmetic mean of the two orthogonal diameters.

7 Testing conditions

7.1 Specimen gripping

When the test specimen is going to be mounted on the grips of the tensile machine, the test specimen and tensile loading axis shall be aligned to be in a straight line. Sand paper may be inserted as a cushioning material to prevent the gripped surfaces of the specimen from slipping and fracturing (see Clause A.9). During mounting of the sample, bending or deformation shall be prevented.

7.2 Setting of extensometer

When mounting the extensometer, care shall be taken to prevent the test specimen from being deformed like in the case of indentation due to extensometers' sharp edges which might cause an earlier fracture of the specimen. The extensometer shall be mounted at the centre between the grips, aligning the measurement direction with the specimen axis direction.

During mounting care should be taken not to pre-load the specimen. After installation, loading shall be physically set to zero.

In the case where a double extensometer system is used, it shall be mounted symmetrically around the cross-section to allow averaging of the strain to compensate the bending effects.

7.3 Testing speed

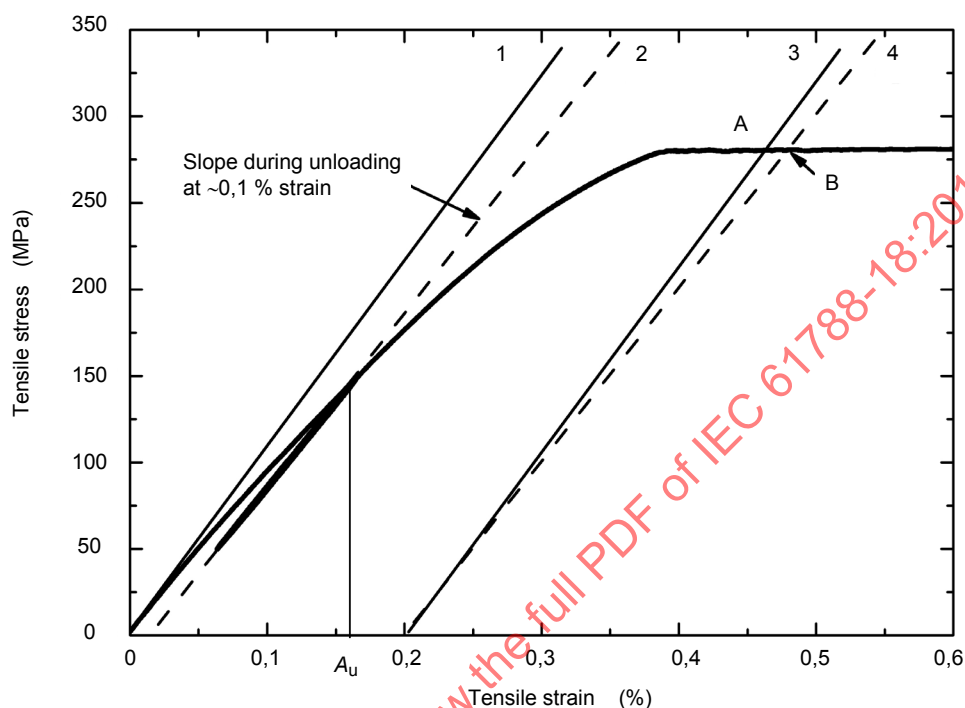
The tensile tests shall be performed with displacement control. The machine crosshead speed is recommended to be set between 0,1 mm/min and 0,5 mm/min.

7.4 Test

Following this procedure, the tensile machine shall be started after the crosshead speed has been set to the specified level. The strain and stress calculated from the output signals of the extensometer and the load cell respectively shall be plotted on the abscissa and ordinate of the diagram as shown in Figure 1 and Figure 2. When the total strain has reached a value of approximately 0,1 % (point A_u), the tensile stress shall be reduced by 30 % to 40 %. Then, the

load shall be increased again to the previous level and the test shall be continued to the point where the specimen is fractured.

Prior to the start of any material test program it is advisable to check the complete test equipment using similar size wires of known elastic properties (see Clause A.13).

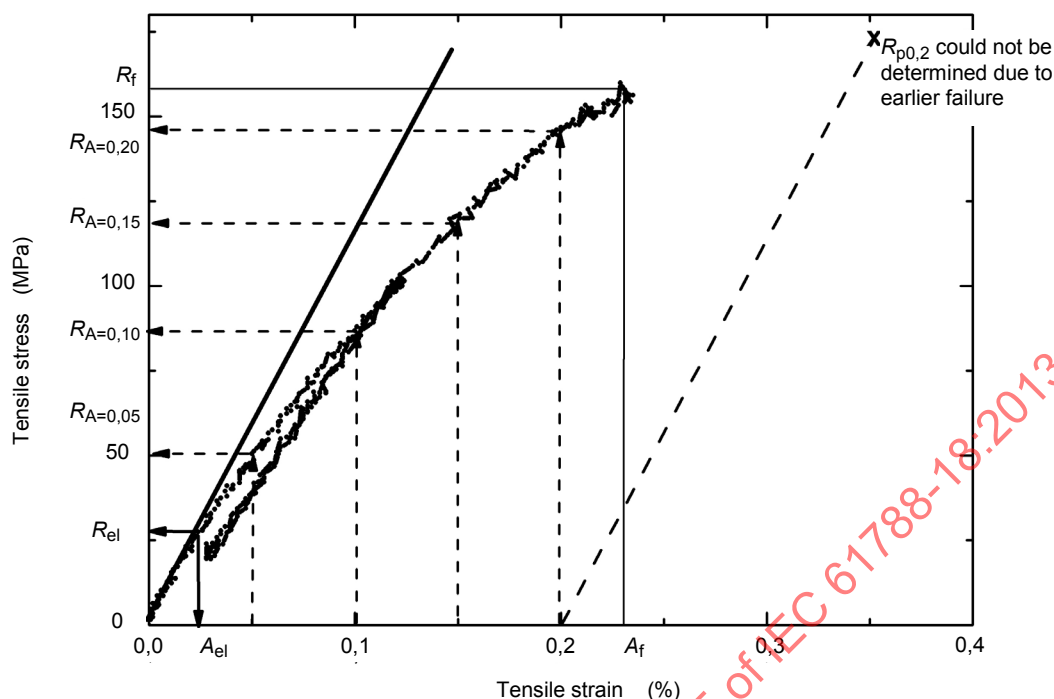


IEC 2164/13

- 1 Straight line drawn from the initial loading curve (zero offset line)
- 2 Straight line drawn from the unloading curve
- 3 0,2 % offset line drawn from the initial loading curve by parallel shifting
- 4 0,2 % offset line drawn from the unloading curve by parallel shifting
- A 0,2% proof strength obtained by the offset line 3
- B 0,2% proof strength obtained by the offset line 4

NOTE The slope of the initial loading curve decreases usually with increasing strain. Then, two straight lines can be drawn from the 0,2 % offset point on the abscissa to obtain 0,2 % proof strength of the composite. Point A is obtained from the initial loading curve, and Point B is obtained from the unloading curve.

Figure 1 – Typical stress-strain curve and definition of modulus of elasticity and 0,2 % proof strengths of an Ag/Bi-2223 wire externally laminated by brass foil



IEC 2165/13

NOTE In cases where the 0,2 % offset proof strength could not be determined due to earlier failure of the wires, the tensile stresses at specified strains such as 0,05 %, 0,10 %, 0,15 %, and 0,20 % with an increment of 0,05 % are measured. In addition, the fracture strength, R_f and the percentage elongation to fracture A_f were derived from the stress-strain curve.

Figure 2 – Typical stress-strain curve of an Ag/Bi-2223 wire where the 0,2 % proof strengths could not be determined and definition of tensile stresses at specified strains

8 Calculation of results

8.1 Modulus of elasticity (E)

Modulus of elasticity shall be calculated in general using the following equation and the straight portion of the initial loading curve and of the unloading one. Appropriate software for data evaluation, with the function of enlargement of the stress strain graph especially around the region where the deviation from linearity is expected, should be used for post analyses of the plotted data (see Clause A.12).

$$E = \Delta F / (S_0 \Delta A) \quad (1)$$

where

E is the modulus of elasticity;

ΔF is the increment of the corresponding force;

ΔA is the increment of strain corresponding to ΔF ;

S_0 is the original cross – sectional area of the test specimen.

Since the unloading process is carried out at the strain indicated by the point A_U in Figure 1, the same equation (1) is used for both the unloading modulus (E_U) and the initial loading one (E_0).

It is recommended to measure the unloading curve at the starting point A_U , where A_U is recommended to be approximately 0,1 %.

After the test, the results shall be examined using the ratio E_0/E_U . The ratio shall satisfy the condition as given in condition (2) in which $\Delta = 0,3$ (see Clause A.11).

$$1 - \Delta < \frac{E_0}{E_U} < 1 + \Delta \quad (2)$$

If it does not satisfy the condition (2), the test is judged not to be valid. Then the test shall be repeated after checking the experimental procedure according to the present test method.

It is recommended to achieve the unloading – reloading procedure as follows: When the loading curve reaches the strain of $A_U = 0,10$ %, the stress is reduced by 30 % to 40 % and then the wire is reloaded.

The slope of the unloading curves shall be obtained in the linear portion between the stress where the unloading started and the stress which is generally 90 % referring to the onset of the unloading stress.

8.2 0,2 % proof strength ($R_{p0,2}$)

The 0,2 % proof strength of the composite shall be determined in two ways, from the initial loading part and the unloading/reloading part of the stress-strain curve as shown in Figure 1.

The 0,2 % proof strength under loading $R_{p0,2-L}$ shall be determined as follows: the initial linear portion of the loading line of the stress-strain curve is moved parallel to 0,2 % along the strain axis (0,2 % offset line under loading) and the point A at which this linear line intersects the stress-strain curve shall be defined as the 0,2 % proof strength under initial loading.

The 0,2 % proof strength under unloading $R_{p0,2-U}$ shall be determined as follows: the linear portion of the unloading line is moved parallel to the 0,2 % offset strain point. The intersection of this line with the stress-strain curve determines the point B that shall be defined as the 0,2 % proof strength under unloading. Depending on the unloading line (4 in Figure 1) 0,2 % proof strength ($R_{p0,2-U}$) is determined.

Each 0,2 % proof strength shall be calculated using equation (3) given below:

$$R_{p0,2-i} = F_i / S_0 \quad (3)$$

where

$R_{p0,2-i}$ is the 0,2 % proof strength (MPa) at each point;

F_i is the force (N) at each point;

S_0 is the original cross-sectional area (in square millimetres) of the test specimen;

further, $i = 0$ at 0 % and $i = U$ at 0,1 %.

8.3 Tensile stress at specified strains (R_A)

On the other hand, when the 0,2 % proof strength could not be determined due to earlier failure, then the stress level at strains of 0,05 %, 0,1 %, 0,15 %, 0,2 %, 0,25 % with increment of 0,05 % strength is measured (see Figure 2).

8.4 Fracture strength (R_f)

Tensile strength R_f shall be the maximum force divided by the original cross-sectional area of the wire before loading (see Clause A.6).

9 Uncertainty of measurement

Unless otherwise specified, measurements shall be carried out in a temperature that can range from 280 K to 310 K. A force measuring cell with relative standard uncertainty less than 0,1 %, valid between zero and the maximum force capacity of load cell, shall be used. The extensometers should have relative standard uncertainty of strain less than 0,05 %. The displacement measuring transducer (e.g. LVDT [linear variable differential transformer]) used for the calibration should have relative standard uncertainty less than 0,01 %.

The relative standard uncertainty values of measured moduli of elasticity E_0 and E_U , tensile stresses at specified strains R_A and the proof strengths $R_{p0,2}$ currently achieved with respect to the International Round Robin Test of 8 representative research laboratories are given in Table A.1 (see Clause A.11).

The relative standard uncertainty corresponding to the number of samples tested shall be calculated using equation (4) given below:

$$U_{RSU}(N) = \overline{COV} / \sqrt{N} \quad (4)$$

where

$U_{RSU}(N)$ is the relative standard uncertainty,

N is the number of samples tested

$\overline{COV}$ is the averaged coefficient of variation for all data tested.

According to the international round robin test (see [4] and [5] of Clause A.14), the relative standard uncertainty corresponding to the number of sample tested can be calculated by using equation (4). For example, the uncertainty was 1,8 % for E_0 for the test data of $N = 18$ in the case of sample E bare after the qualification check. Similarly, the uncertainty was 1,5 % for E_U ($N = 18$). For two bare BSSCO wires, $R_{p0,2}$ was not possible to assess. But for metallic foils laminated 3 ply Ag/Bi-2223 wires, 1,4 % for $R_{p0,2}$ ($N = 9$) were reported. Further uncertainties in the range of 1,0 % to 2,7 % were reported for the stresses at specified strains R_A ($N = 16$).

10 Test report

10.1 Specimen

- Name of the manufacturer of the specimen
- Classification and/or symbol
- Lot number

The following information shall be reported if possible.

- Raw materials and their chemical composition
- Cross-sectional shape and dimension of the tape-shaped wire
- Number of filaments
- Non-superconductor to superconductor ratio

10.2 Results

Results of the following mechanical properties shall be reported.

- a) Modulus of elasticity (E_0 and E_U with A_U)
- b) 0,2 % proof strengths ($R_{p0,2-0}$ and $R_{p0,2-U}$)
- c) Tensile stress (R_A) at strains of 0,1 %, 0,15 %, 0,2 %, 0,25 % with increment of 0,05 %

The following information shall be reported as an option upon requirement.

- d) Percentage elongation to fracture (A_f) derived from the stress-strain curves and the location of the fracture (i. e. within the extensometer or at the grips)
- e) Tensile strength (R_f)

The following information shall be reported if possible.

- f) Coefficient of curve fit function obtained with an exponential function (see Clause A.5)
- g) Tensile stress at elastic limit (R_{el})
- h) Tensile strain at elastic limit (A_{el})

10.3 Test conditions

The following information shall be reported as necessary.

- a) Crosshead speed
- b) Distance between grips
- c) Temperature
- d) Manufacturer and model of testing machine
- e) Manufacturer and model of extensometer
- f) Gripping method

Annex A (informative)

Additional information relating to Clauses 1 to 14

A.1 General

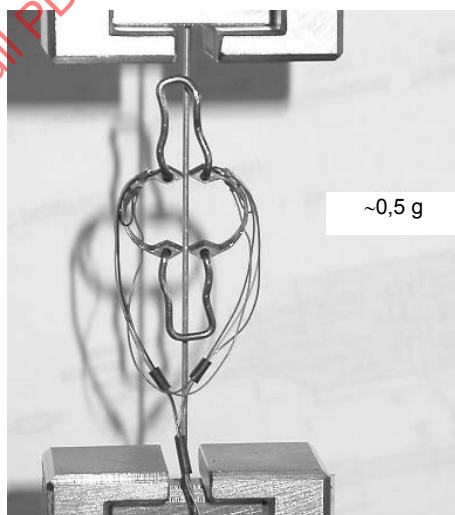
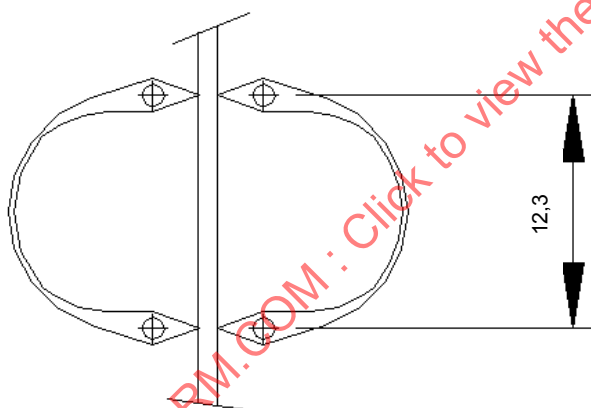
This annex gives reference information on the variable factors that can seriously affect the tensile test methods, together with some precautions to be observed when using the standard.

A.2 Extensometer

A.2.1 Double extensometer

In the international RRT for Ag/Bi-2223 wires, a double extensometer system consisting of two single extensometers were generally used to record two signals to be averaged by software or one signal already averaged by the extensometer system itself. The mass of the low-mass double extensometers shall be 5 g or less [1]¹.

In Figure A.1 and Figure A.2, a typical advanced low-mass double extensometer is shown.



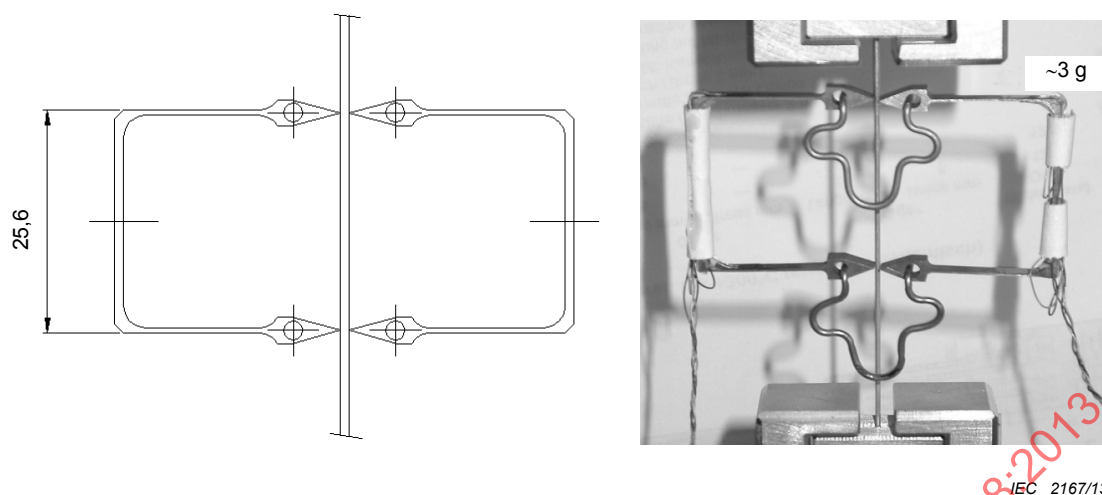
IEC 2166/13

Dimensions in millimetres

NOTE The two extensometers are wired together into a single type extensometer, thus averaging the two displacement records electrically.

**Figure A.1 – Low mass Siam twin type extensometer
with a gauge length of ~ 12,3 mm (total mass ~ 0,5 g)**

¹ Numbers in square brackets refer to the reference documents in Clause A.14 of this annex.



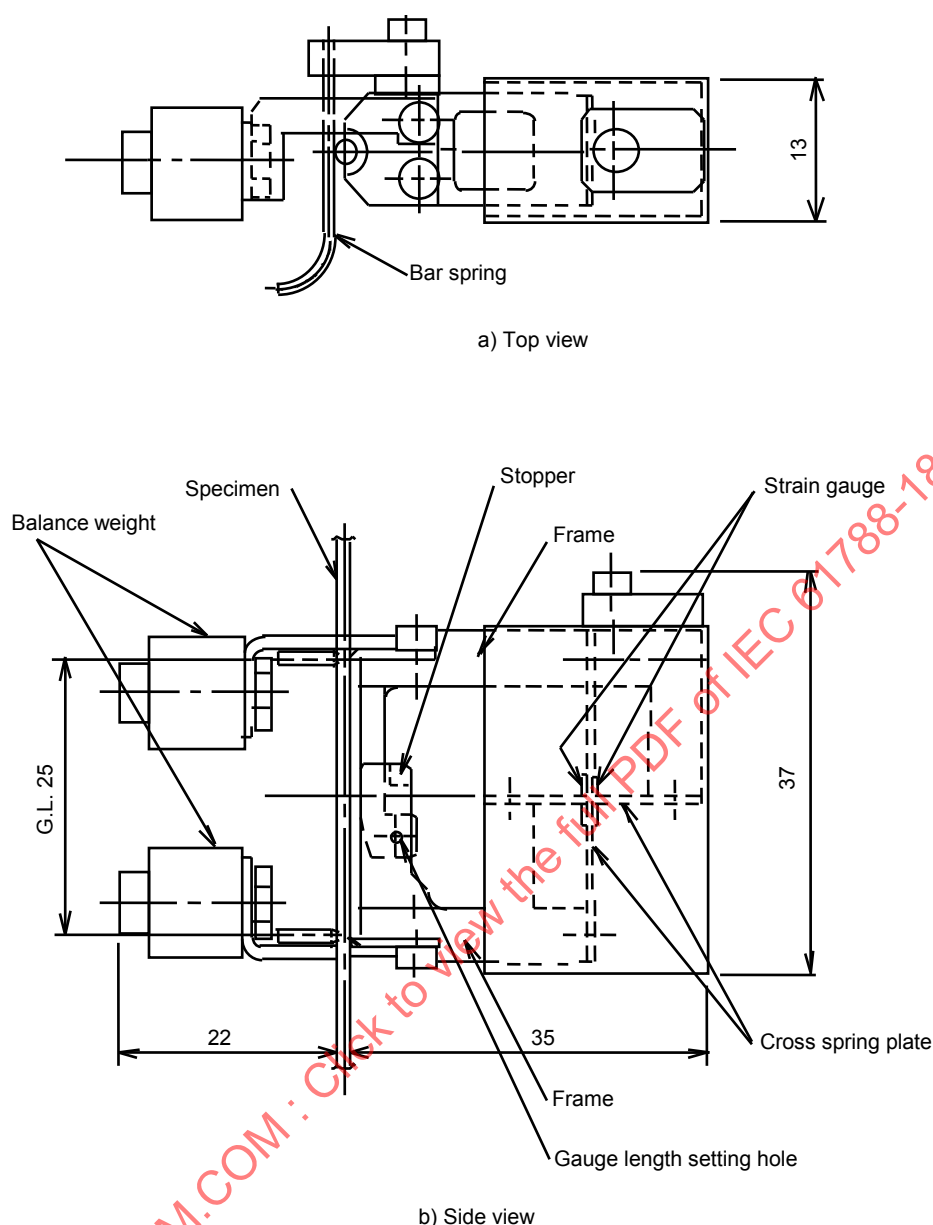
Dimensions in millimetres

Each of the two extensometers is a single type extensometer, the averaging should be carried out by software.

**Figure A.2 – Low mass double extensometer with
a gauge length of ~ 25,6 mm (total mass ~ 3 g)**

A.2.2 Single extensometer

Figure A.3 shows a single extensometer with a total weight of 31 g together with a balance weight, which was used to establish International Standard IEC 61788-6.



IEC 2168/13

Dimensions in millimetres

Figure A.3 – An example of the extensometer provided with balance weight and vertical specimen axis

A.3 Requirements of high resolution extensometers

From Figure A.4 the requirements for such extensometers can be derived. In order to meet the target that the recorded values obtained from the raw data should have a low relative standard uncertainty in particular between 0 % strain and 0,01 % strain, the total displacement in this range shall be $2,5 \mu\text{m}$ for the case of 25 mm gauge length or $1,2 \mu\text{m}$ for 12 mm gauge length. In fact, the signals should be acquired with a signal to noise ratio around 100 times better to ensure stable records within the required strain range. The calibration factor for a 12 mm gauge length extensometer is usually 10 V per 1 mm displacement. The peak-to-peak voltage of the signal should be around 1 mV to ensure this low relative standard uncertainty. Using state-of-the-art signal conditioners, shielded and twisted cables, and high resolution data acquisition systems of greater than 16 bit resolution, it is thus possible to ensure this demand [1]. Figure A.4 shows the

original raw data of an Ag/Bi-2223 wire measurement in the form of load and displacement graph. To achieve a low scatter of data as shown below, it is necessary to have a high signal to noise ratio enabling to resolve the curve well below the 1 μm range [2,3].

To obtain a zero offset gradient with a sufficient low relative standard uncertainty, which allows an assessment for the modulus of elasticity, it is prerequisite to use high resolution extensometers with extremely high signal to noise ratio.

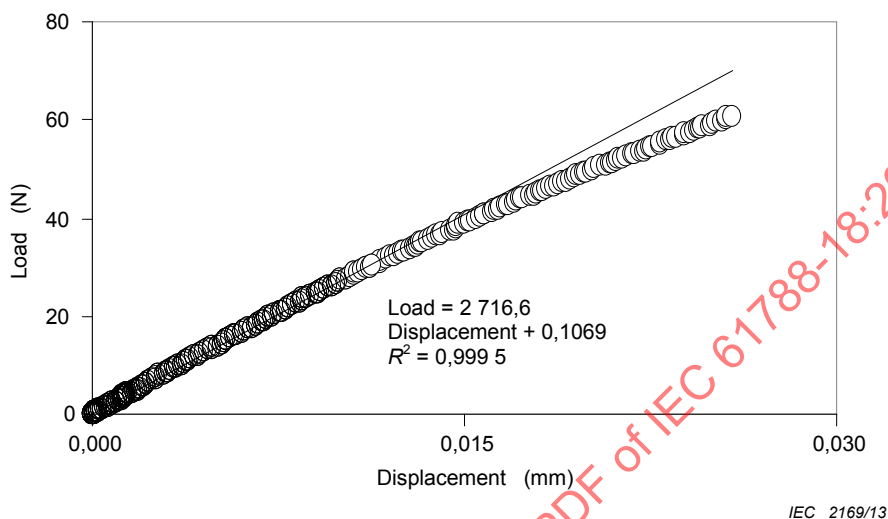


Figure A.4 – Original raw data of an Ag/Bi-2223 wire measurement in form of load and displacement graph

A.4 Elastic limit

A.4.1 Tensile stress at elastic limit (R_{el})

The tensile stress at elastic limit corresponding to the transition of elastic to plastic deformation shall be calculated in general using the following equation (see Figure A.5).

$$R_{el} = F_{el}/S_0 \quad (\text{A.1})$$

where

R_{el} is the tensile stress (MPa) at the transition from elastic to plastic deformation;

F_{el} is the force (N) at the transition from elastic to plastic deformation.

A.4.2 Tensile strain at elastic limit (A_{el})

The strain at elastic limit (see Figure A.5) referred to the stress R_{el} is defined as follows:

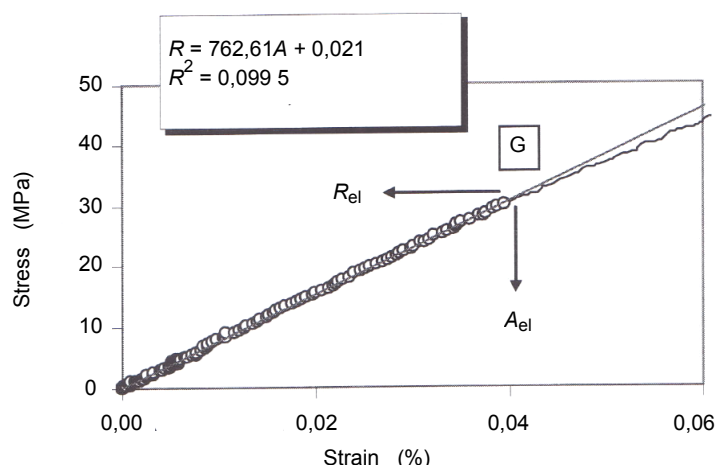
$$\Delta A_{total} = A_{max} - A_0 \quad (\text{A.2})$$

where

ΔA_{total} is the total strain increment referring to zero offset strain which corresponds to strain where the transition from elastic to plastic deformation occurs;

A_{max} the observed value of strain referred to the stress R_{el} ;

A_0 : the zero offset strain.



The plots (large circles) show the region of the initial straight portion of the record. The linear 1st order regression analysis gives the modulus of elasticity E ($E_0 = 76$ GPa) and the measure of linearity as square of regression coefficient. The value of computed 76 GPa is the result of the regression line analysis, where the origin has been determined to have an offset in the ordinate owing to the plot scatter. In addition, the square of regression coefficient should be greater than 0,99 to ensure the linearity. The stress R_{el} and the corresponding strain A_{el} correspond to the transition region of elastic plastic deformation. In particular, the value of R_{el} is an important quantity for the judgment of the determined E_0 . A low value of R_{el} (e.g. < 5 MPa) may indicate a higher uncertainty for the E_0 owing to the small portion of the linear region. The smaller linear range has an impact for the measurand E_0 towards high uncertainty due to the data scatter, and the uncertainty may trigger to repeat the measurement.

Figure A.5 – Typical stress versus strain of an Ag/Bi-2223 wire up to the elastic limit corresponding to the transition region from elastic to plastic deformation (point G)

A.5 Functional fitting of stress-strain curve and 0,2 % proof strength ($R_{p0,2-F}$)

In the case of Ag/Bi-2223 and Ag/Bi-2212 wires, the functional fitting method is applicable to determine the 0,2 % proof strength. Usually, the constituent material of silver sheath in the composite conductors has yielded during cooling from heat-treatment temperature to room temperature. The stress-strain curve, therefore, is curved from the beginning in the strict sense so that the evaluation of the initial modulus of elasticity becomes difficult. Furthermore, because of the non-straight form of the specimen due to the heat-treatment condition and pre-straining during its setting to the tensile testing machine, the stress-strain curve is bent concave or convex, hence, it is difficult to estimate the intrinsic zero strain point. The functional fitting method is effective in excluding such strain that is present in the experimental data. The stress-strain curves are approximated by the use of the following exponential function;

$$F/S_0 = a(\varepsilon - b)^n \quad (\text{A.3})$$

where F , S_0 and ε are load, cross section and strain obtained from the test, a , b and n are parameters obtained by non-linear least-mean-square-fitting. In order to avoid losing digits during calculation, ε is expressed in %. The upper bound of fitting is 0,5 % and the lower bound of fitting is increased until the three parameters converge.

The 0,2 % proof strength $R_{p0,2-F}$ of the composite due to yielding of the silver sheath components by function fitting method shall be determined as follows: the linear portion under unloading is to be moved parallel to the 0,2 % offset point with regard to the zero strain point defined by the parameter b . The intersection of this line with the fitted stress –strain curve determines the point B that shall be defined as the 0,2 % proof strength (Figure 1). Fit to the simplified equation of (A.3) by excluding the parameter b , neglects pre-strain and gives a larger proof stress value close to the $R_{p0,2-U}$. It is reported that the commercially available non-linear least-square-fitting software can produce results that are almost identical to the experimental data if the allowable error to be used is less than 0,1. However, the confirmation of coincidence between data points and the fitting curve shall be made.

A.6 Fracture strength (R_f)

In the case of Ag/Bi-2223 wire with small non-superconductor to superconductor volume ratio, premature fracture occurs at the grips giving rise to lower tensile strength and smaller percentage elongation after fracture. The tensile strength and percentage elongation after fracture are important not only to the scientific point of view describing the mechanical properties of composite material, but also useful to the test validity measurement. However, because the standard uncertainty is large and the strain region of interest for the wire is small, the values are just used as references.

The tensile strength at which the fracture occurs shall be calculated using the following equation.

$$R_f = F_f / S_0 \quad (\text{A.4})$$

where R_f is the tensile stress (MPa) at the fracture, F_f is the corresponding maximum force (N).

A.7 Removal of insulation / coating

Even though the coating can only affect the strength to only a small extent, it should still be removed from the surface of the test specimen using an appropriate organic solvent that would not damage the specimen. If the coating material is not dissolved by the organic solvent, a mechanical method should be used with care to prevent the silver sheath from being damaged. For example, tensile strength decreases by less than 3 % for a low-strength wire which has a high silver ratio greater than 3,5. The coating is not designed as a structural component. An analysis of measurement as a four-component composite, i.e. silver, its alloy, Bi-2223 or Bi-2212 filaments and insulating coating, is too complicated to conduct. Therefore, this test method covers the bare wire in order to maintain low relative standard uncertainty.

A.8 Cross-sectional area determination

In case a low relative standard uncertainty is required, the cross-sectional area may be obtained by correcting the radius of the corner of the rectangular wire finished by dies, or by correcting the less thickness at the edges of the wires finished by rolling. For rolling or Turk's-head finish, the radius of the corner and thickness are not controlled and for that reason, a correction is made using a microphotograph of the cross-section.

A.9 Gripping force

A weak gripping force results in slippage but a strong gripping force can break the gripped surface. Care should therefore be used when adjusting the gripping force. A cushioning material such as sand paper may be inserted to prevent the gripped surfaces of the specimen from slipping and fracturing.

A.10 Percentage elongation after fracture (A_f)

In composite wires there is a difference in strength between the silver sheath and superconducting filaments, and the wire is often deformed in waves by the shock of fracture. In such a case, it is difficult to find the elongation accurately after fracture using the butt method. Hence, the measurement of elongation after fracture shall serve only as a reference. The movement of the cross-head may be used to find the approximate value for elongation after fracture, instead of using the butt method. To use this method, the cross-head position at fracture must be recorded. The following equation is used to obtain the elongation after fracture using the butt method, given in percentage.

$$A_f = 100(L_u - L_g)/L_g \quad (A.5)$$

where

A_f is the percentage elongation after fracture;

L_g is the initial inward distance between grips;

L_u is the distance between grips after fracture.

A.11 Relative standard uncertainty

Owing to the nature of any measurement, the obtained test results showed a scatter in all cases. To assess the quality of the measured data the concept of uncertainty serves a sound basis for an independent judgment. In Annex B and C detailed information is supplied with respect to uncertainty of a measurand.

In case of Ag/Bi-2223 wire substantial experiences were gathered during the international round robin tests carried out with 7 research groups. In particular, the evaluation of obtained data supplied valuable information with respect to the modulus of elasticity determined at the initial loading line and from the unloading line at ~ 0,1 % strain. In general, the obtained modulus of elasticity results from the initial loading line has a larger scatter compared to the determined values from the unloading line. A comprehensive analysis of these data is given in reference [4] and shows that the ratio of E_0 and E_U varies from unity if all results are collected together. These variations can be described by using the simple relation $1 - \Delta < E_0/E_U < 1 + \Delta$, where Δ defines the quantity of the deviation from unity. To limit the scatter at the initial loading line and to delete disqualified data $\Delta = 0,3$ has been proven to be an adequate value to be used.

In Table A.1 the important quantities such as the modulus of elasticity obtained from initial loading line and unloading line at around 0,1 % strain, the 0,2 % proof strength, furthermore also tensile stresses at specified strains R_i are summarized. The standard uncertainties of these results show that the disqualification of the data beyond $\Delta = 0,3$ reduces the standard uncertainties by at least a factor of 2.

The scatter of experimental data obtained from RRT relates to the two contributions of the intra- and inter-laboratory. In order to make clear whether the data submitted from their respective laboratories belongs into the same population of all experimental data, the analysis of variance (F-test) was performed under the guidance of the text (GUM H.5.2.1, See 1 of Clause B.5). As a typical example, the experimental data on E_0 were analyzed and the results are listed in Table A.2. In order to make exact comparison among laboratories, it is necessary to fix the same number of data from each laboratory, 3 for instance. So, three data were chosen randomly from each laboratory when the number of data was equal to or larger than 3, but in case of data number less than 3, the data set from the laboratory was disregarded.

According to GUM guidance, the ratio of the inter-laboratory variance (s_a^2) and the intra-laboratory one (s_b^2) was calculated as $F_{\text{exp}} = s_a^2 / s_b^2$ and compared with the theoretical function, $F_{0,99}$. In case that the hypothesis of $F_{\text{exp}} < F_{0,99}$ holds, the major scattering originates from the intra-laboratory estimates.

In order to make the contribution quantitatively clear from either inter- or intra-laboratory, the symmetric data set was requested. So the data set are listed in Table A.3. By using the 3×5 symmetric data, F test was attempted for E_0 of sample E bare wire. By using the data set listed in Table A.3, the F distribution was calculated as $F_{\text{exp}} = 18$, while the theoretical $F_{0,99}(\nu_a, \nu_b)$ function for $\nu_a = 4$ and $\nu_b = 10$ is given as 6,0. The result of $F_{\text{exp}} > F_{0,99}$ indicates that the inter-laboratory estimate is larger than the intra-laboratory one.

The results of F test for E_0 of four kinds of Bi-2223 wire used in RRT carried out by 8 different research laboratories are summarized in Table A.1. It is clear from Table A.3 that the major scattering originates from the inter-laboratory estimate. In order to suppress the large standard

uncertainty, the result on the verification of the detailed experimental conditions has been reported [5]. While no indication could be made clear in the present analysis, the present results suggest a possible modification of the regulation of test procedure in the future.

Table A.1 – Results of relative standard uncertainty values achieved on different Ag/Bi-2223 wires during the international round robin tests

(a) Sample E bare									
Property	Dimension	All Data				Qualified Data			
		N	<x>	COV (%)	U _{RSU} (%)	N'	<x'>	COV (%)	U _{RSU} (%)
E ₀	GPa	20	83,7	27,0	6,0	18	76,7	7,5	1,7
E _U	GPa	20	79,1	6,2	1,3	18	78,9	6,5	1,5
R _{0,05}	MPa	20	38,5	9,9	2,2	18	37,5	6,6	1,5
R _{0,1}	MPa	20	69,3	6,1	1,3	18	68,5	5,2	1,2
R _{0,15}	MPa	20	95,3	5,7	1,2	18	94,1	5,4	1,2
R _{0,2}	MPa	19	117,8	4,9	1,1	17	117,2	4,9	1,2
R _{0,25}	MPa	16	133,7	5,0	1,2	15	133,6	5,2	1,3
R _{p0,2}	MPa	-	-		-	-	-		-
R _f	MPa	20	133,6	6,4	1,4	18	133,2	6,7	1,5
N: total number of tested wires, N': number of qualified wires, X: modulus of elasticity or proof strength, <x>: average for total wires, <x'>: average for qualified wires, COV: coefficient of variance (%), and U _{RSU} : relative standard uncertainty (%).									
(b) Sample S bare									
Property	Dimension	N	<x>	COV (%)	U _{RSU} (%)				
E ₀	GPa	16	87,7	7,8	1,9				
E _U	GPa	16	90,0	6,8	1,7				
R _{0,05}	MPa	16	42,4	7,1	1,7				
R _{0,1}	MPa	16	78,8	7,8	1,9				
R _{0,15}	MPa	16	110,2	5,7	1,4				
R _{0,2}	MPa	16	137,0	5,3	1,3				
R _{0,25}	MPa	15	159,5	5,3	1,3				
R _{p0,2}	MPa	-	-	-	-				
R _f	MPa	16	164,4	5,4	1,3				
(c) Sample S Brass 3ply									
Property	Dimension	N	<x>	COV (%)	U _{RSU} (%)				
E ₀	GPa	15	97,9	7,5	1,9				
E _U	GPa	15	95,1	6,4	1,6				
R _{0,05}	MPa	15	48,5	10,4	2,7				
R _{0,1}	MPa	15	91,5	5,8	1,5				
R _{0,15}	MPa	15	132,9	4,6	1,1				
R _{0,2}	MPa	15	171,0	4,1	1,0				
R _{0,25}	MPa	15	206,4	3,8	1,0				
R _{p0,2}	MPa	9	273,5	4,2	1,4				
R _f	MPa	12	264,4	4,5	1,3				

(d) Sample S SUS 3ply									
Property	Dimension	All Data				Qualified Data			
		N	$\langle x \rangle$	COV (%)	U_{RSU} (%)	N'	$\langle x' \rangle$	COV (%)	U_{RSU} (%)
E_0	GPa	16	115,2	25,8	6,4	14	105,3	12,2	3,2
E_U	GPa	16	106,6	8,2	2,0	14	104,7	7,0	1,8
$R_{0,05}$	MPa	16	54,4	18,0	4,5	14	51,3	10,4	2,7
$R_{0,1}$	MPa	16	99,6	9,8	2,4	14	96,7	6,3	1,6
$R_{0,15}$	MPa	16	141,4	7,6	1,9	14	138,4	5,3	1,4
$R_{0,2}$	MPa	16	179,3	5,6	1,4	14	176,6	4,2	1,1
$R_{0,25}$	MPa	16	215,5	4,0	1,0	14	213,8	3,7	1,0
$R_{p0,2}$	MPa	12	291,4	5,6	1,6	10	296,1	4,5	1,4
R_f	MPa	13	321,6	4,6	1,2	11	325,4	3,9	1,1

Consequently, the average value of relative standard uncertainty (U_{RSU}) for all samples is given by the equation

$$\overline{U_{RSU}} = \frac{\sum_{m=1}^{m=M} N'_m U_{RSUm}}{\sum_{m=1}^{m=M} N'_m} \quad (A6)$$

Where M indicates the number of different wires and the average number of samples is given,

$$\overline{N'} = \frac{\sum_{m=1}^{m=M} N'_m}{M} \quad (A7)$$

Then U_{RSU} was calculated from Table A.1 as 2,1 % for E_0 for $N' = 16$ as the average value for all samples after the qualification check. By using the same procedure, the U_{RSU} was evaluated for E_U , R_f and $R_{p0,20}$ and their results are presented in sub-clause 9 of the main text.

Table A.2 – Selected data for F test for E_0 of Sample E bare wire

	P1	P2	P3	P5	P6
E_{oj1}	77,8	71,4	72	73	82,0
E_{oj2}	76,9	74,2	72	73	89,2
E_{oj3}	78,2	74,2	77	71	89,2

Table A.3 – Results of F-test for the variations of E_0 of four kinds of Bi-2223 wires

Sample	F_{exp}		$F_{0,99}$	Major scattering sources
E bare	18	>	6,0	Among laboratories
S bare	2,8	<	7,6	Within laboratories
S Brass 3Ply	20	>	6,0	Among laboratories
S SUS 3Ply	4,9	<	8,0	Within laboratories

A.12 Determination of modulus of elasticity E_0

The determination of modulus of elasticity E_0 requires a data acquisition system allowing a low relative standard uncertainty at zero-offset regime of the stress-strain record. To ensure unbiased data, the recorded data of stress and strain should be evaluated according to the following standard procedure.

- Insert the strain-stress digital data of the record into two columns of standard spreadsheet calculation software (e. g. MS Excel). Here, the strain record is inserted in the first column and the stress data in the second column.
- Smooth the data using a ten term moving averaging procedure if the scatter is high.
- In a third column copy the stress data up to a value of at least 100 MPa.
- Draw a stress versus strain chart diagram using the records of first and third column up to 20 MPa.
- Determine the second order polynomial regression line and the square of the regression coefficient using the record.
- Repeat the above two steps by increasing the stress range stepwise. Plot the first order term and the square of the regression coefficient versus the maximum of the stress range. With increasing stress range, the square of the regression coefficient should approach unity ($>0,999$) and the first order terms should converge to a single value that is taken as E_0 .
- If the above procedure does not converge, a modified or alternate procedure is used.

A.13 Assessment on the reliability of the test equipment

The reliability of the test equipment, which comprises the tensile testing unit, the load cell and the used extensometer system, can be best analyzed with wires of similar sizes and known elastic properties. Around one mm diameter welding wires of the aluminium and pure commercial titanium have been approved to be the most suitable ones which cover the modulus of elasticity range between 70 GPa and 100 GPa. It is strongly recommended that the test laboratory should confirm the reliability of its tensile setup from time to time by measuring the elastic properties of these wires prior to any measurement task. These wires can be easily purchased from vendors. For these tests the wires should be handled in the same manner as described for the case with superconducting heat treated wires. The wires can be loaded and unloaded in elastic regime up to 100 MPa without affecting its elastic properties.

A.14 Reference documents

- [1] A. NYILAS. Strain sensing systems tailored for tensile measurement of fragile wires. *Supercond. Sci. Technol.*, (2005), 18, 409-415.
- [2] K. KATAGIRI, K. KASABA, M. HOJO, K. OSAMURA, M. SUGANO, A. KIMURA and T. OGATA. Tensile testing method of Cu/Nb₃Sn superconducting wires at room temperature. *Physica C*, 2001, 357-360, 1302-1305.
- [3] K. OSAMURA, A. NYILAS, M. THOENER, B. SEEBER, R. FLUEKIGER, Y. ILYIN, A. NIJHUIS, J. EKIN, C. CLICKNER, R. P. WALSH, V. TOPLOSKY, H. SHIN, K. KATAGIRI, S. OCHIAI, M. HOJO, Y. KUBO and K. MIYASHITA. International round robin test for mechanical properties of Nb₃Sn superconductive wires at room temperature. *Supercond. Sci. Technol.*, 2008, 21, 045006.
- [4] K. OSAMURA, K. P. WEISS, H. S. SHIN, K. KATAGIRI, S. OCHIAI, M. HOJO, M. SUGANO and K. OSHAWA. International round robin test for mechanical properties of BSCCO-2223 superconductive tapes at room temperature. *Cryogenics*. 2011, 51, 21-26.
- [5] K. OSAMURA, A. NYILAS, H. S. SHIN. Estimation of uncertainty with the modulus of elasticity measured by means of tensile test for BSCCO tapes. *Cryogenics*, 2010, 50, 660-665.

Annex B (informative)

Uncertainty considerations

B.1 Overview

In 1995, a number of international standard organizations, including IEC, decided to unify the use of statistical terms in their standards. It was decided to use the word “uncertainty” for all quantitative (associated with a number) statistical expressions and eliminate the quantitative use of “precision” and “accuracy.” The words “accuracy” and “precision” could still be used qualitatively. The terminology and methods of uncertainty evaluation are standardized in the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [1]².

It was left to each TC to decide if they were going to change existing and future standards to be consistent with the new unified approach. Such change is not easy and creates additional confusion, especially for those who are not familiar with statistics and the term uncertainty. At the June 2006 TC 90 meeting in Kyoto, it was decided to implement these changes in future standards.

Converting “accuracy” and “precision” numbers to the equivalent “uncertainty” numbers requires knowledge about the origins of the numbers. The coverage factor of the original number may have been 1, 2, 3, or some other number. A manufacturer’s specification that can sometimes be described by a rectangular distribution will lead to a conversion number of $1/\sqrt{3}$. The appropriate coverage factor was used when converting the original number to the equivalent standard uncertainty. The conversion process is not something that the user of the standard needs to address for compliance to TC 90 standards; it is only explained here to inform the user about how the numbers were changed in this process. The process of converting to uncertainty terminology does not alter the user’s need to evaluate their measurement uncertainty to determine if the criteria of the standard are met.

The procedures outlined in TC 90 measurement standards were designed to limit the uncertainty of any quantity that could influence the measurement, based on the Convener’s engineering judgment and propagation of error analysis. Where possible, the standards have simple limits for the influence of some quantities so that the user is not required to evaluate the uncertainty of such quantities. The overall uncertainty of a standard was then confirmed by an interlaboratory comparison.

B.2 Definitions

Statistical definitions can be found in three sources: the GUM, the International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM)[2], and the NIST Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results (NIST)[3]. Not all statistical terms used in this standard are explicitly defined in the GUM. For example, the terms “relative standard uncertainty” and “relative combined standard uncertainty” are used in the GUM (5.1.6, Annex J), but they are not formally defined in the GUM (see [3]).

B.3 Consideration of the uncertainty concept

Statistical evaluations in the past frequently used the coefficient of variation (COV) which is the ratio of the standard deviation and the mean (N.B. the COV is often called the relative standard deviation). Such evaluations have been used to assess the precision of the measurements and

² Figures in square brackets refer to the reference documents in Clause B.5 of this Annex.

give the closeness of repeated tests. The standard uncertainty (SU) depends more on the number of repeated tests and less on the mean than the COV and therefore in some cases gives a more realistic picture of the data scatter and test judgment. The example below shows a set of electronic drift and creep voltage measurements from two nominally identical extensometers using the same signal conditioner and data acquisition system. The $n = 10$ data pairs are taken randomly from the spreadsheet of 32 000 cells. Here, extensometer number one (E_1) is at zero offset position while extensometer number two (E_2) is deflected to 1 mm. The output signals are in terms of volts.

Table B.1 – Output signals from two nominally identical extensometers

Output signal V	
E_1	E_2
0,001 220 70	2,334 594 73
0,000 610 35	2,334 289 55
0,001 525 88	2,334 289 55
0,001 220 70	2,334 594 73
0,001 525 88	2,334 594 73
0,001 220 70	2,333 984 38
0,001 525 88	2,334 289 55
0,000 915 53	2,334 289 55
0,000 915 53	2,334 594 73
0,001 220 70	2,334 594 73

Table B.2 – Mean values of two output signals

Mean ($\bar{X}$) V	
E_1	E_2
0,001 190 19	2,334 411 62

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad [\text{V}] \quad (\text{B.1})$$

Table B.3 – Experimental standard deviations of two output signals

Experimental standard deviation (s) V	
E_1	E_2
0,000 303 48	0,000 213 381

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad [\text{V}] \quad (\text{B.2})$$

Table B.4 – Standard uncertainties of two output signals

Standard uncertainty (u) V	
E_1	E_2
0,000 095 97	0,000 067 48

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad [\text{V}] \quad (\text{B.3})$$

Table B.5 – Coefficient of variations of two output signals

Coefficient of variation (COV) %	
E_1	E_2
25,4982	0,0091

$$\text{COV} = \frac{s}{X} \quad (\text{B.4})$$

The standard uncertainty is very similar for the two extensometer deflections. In contrast the coefficient of variation COV is different by nearly a factor of 2 800 between the two data sets. This shows the advantage of using the standard uncertainty which is independent of the mean value.

B.4 Uncertainty evaluation example for TC 90 standards

The observed value of a measurement does not usually coincide with the true value of the measurand. The observed value may be considered as an estimate of the true value. The uncertainty is part of the "measurement error" which is an intrinsic part of any measurement. The magnitude of the uncertainty is both a measure of the metrological quality of the measurements and improves the knowledge about the measurement procedure. The result of any physical measurement consists of two parts: an estimate of the true value of the measurand and the uncertainty of this "best" estimate. The GUM, within this context, is a guide for a transparent, standardized documentation of the measurement procedure. One can attempt to measure the true value by measuring "the best estimate" and using uncertainty evaluations which can be considered as two types: Type A uncertainties (repeated measurements in the laboratory in general expressed in the form of Gaussian distributions) and Type B uncertainties (previous experiments, literature data, manufacturer's information, etc. often provided in the form of rectangular distributions).

The calculation of uncertainty using the GUM procedure is illustrated in the following example:

- The user must derive in the first step a mathematical measurement model in the form of identified measurand as a function of all input quantities. A simple example of such model is given for the uncertainty of a force, F_{LC} measurement using a load cell:

$$F_{LC} = W + d_W + d_R + d_{Re}$$

where W , d_W , d_R , and d_{Re} represent the weight of standard as expected, the manufacturer's data, repeated checks of standard weight/day and the reproducibility of checks at different days, respectively.

Here the input quantities are: the measured weight of standard weights using different balances (Type A), manufacturer's data (Type B), repeated test results using the digital electronic system (Type B), and reproducibility of the final values measured on different days (Type B).

- The user should identify the type of distribution for each input quantity (e.g. Gaussian distributions for Type A measurements and rectangular distributions for Type B measurements).
- Evaluate the standard uncertainty of the Type A measurements,

$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$ where, s is the experimental standard deviation and n is the total number of measured data points.

- d) Evaluate the standard uncertainties of the Type B measurements:

$$u_B = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot d_W^2 + \dots} \text{ where, } d_W \text{ is the range of rectangular distributed values.}$$

- e) Calculate the combined standard uncertainty for the measurand by combining all the standard uncertainties using the expression:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

In this case, it has been assumed that there is no correlation between input quantities. If the model equation has terms with products or quotients, the combined standard uncertainty is evaluated using partial derivatives and the relationship becomes more complex due to the sensitivity coefficients [4, 5].

- f) Optional – the combined standard uncertainty of the estimate of the referred measurand can be multiplied by a coverage factor (e. g. 1 for 68 % or 2 for 95 % or 3 for 99 %) to increase the probability that the measurand can be expected to lie within the interval.
- g) Report the result as the estimate of the measurand $\pm$ the expanded uncertainty, together with the unit of measurement, and, at a minimum, state the coverage factor used to compute the expanded uncertainty and the estimated coverage probability.

To facilitate the computation and standardize the procedure, use of appropriate certified commercial software is a straightforward method that reduces the amount of routine work [6, 7]. In particular, the indicated partial derivatives can be easily obtained when such a software tool is used. Further references for the guidelines of measurement uncertainties are given in [3, 8, and 9].

B.5 Reference documents of Annex B

- [1] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM 1995)
- [2] ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms* (VIM)
- [3] TAYLOR, B.N. and KUYATT, C.E. *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*. NIST Technical Note 1297, 1994 (Available at <<http://physics.nist.gov/Pubs/pdf.html>>)
- [4] KRAGTEN, J. Calculating standard deviations and confidence intervals with a universally applicable spreadsheet technique. *Analyst*, 1994, 119, 2161-2166
- [5] EURACHEM / CITAC Guide CG 4 Second edition:2000, *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*
- [6] [cited 2013-04-24] Available at <http://www.gum.dk/e-wb-home/gw_home.html>
- [7] [cited 2013-04-24] Available at <<http://www.isgmax.com/>>
- [8] CHURCHILL, E., HARRY, H.K., and COLLE, R., *Expression of the Uncertainties of Final Measurement Results*. NBS Special Publication 644 (1983)
- [9] JAB NOTE Edition 1:2003, *Estimation of Measurement Uncertainty (Electrical Testing / High Power Testing)*. [cited 2013-04-24] Available at <<http://www.jab.or.jp>>.

Annex C (informative)

Specific examples related to evaluation of uncertainties for Ag/Bi-2223 and Ag/Bi-2212 wires

C.1 Stress versus strain curve

Low strain region of typical stress vs strain curve for Ag/Bi-2223 wire is shown in Figure C.1. A linear relation between stress and strain was recognized to be held as given by Equation (C.1).

$$R(A) = E_0 A + r_0 \quad (C.1)$$

When applying the regression analysis, the following relation was obtained:

$$R = 861,5 \times A + 0,004 \quad (R^2 = 0,9996)$$

Thus, modulus of elasticity $E_0 = 861 \text{ MPa/\%}$ and $r_0 = 0,004 \text{ MPa}$ were evaluated. As shown in Figure C.1, the deviation r_0 was very small. The deviation can be minimized by more precise experimental procedure. So the contribution by the deviation was excluded from the present discussion.

In the practical experimental procedure, the load (P) is measured by using load cell and the stress (R) is obtained by dividing P by the cross sectional area ($s = t \times w$). Displacement (ΔL) of extensometers attached on the specimen is measured and divided by gauge length (L_G) to get strain (A) in unit of %. In the elastic region, a typical data set was numerically evaluated as $P = 24,6 \text{ N}$, $t = 0,216 \text{ mm}$, $w = 4,38 \text{ mm}$, $R = 26 \text{ MPa}$, $L_G = 25 \text{ mm}$, $\Delta L = 7,5 \times 10^{-3} \text{ mm}$, $A = 0,03 \text{ \%}$.

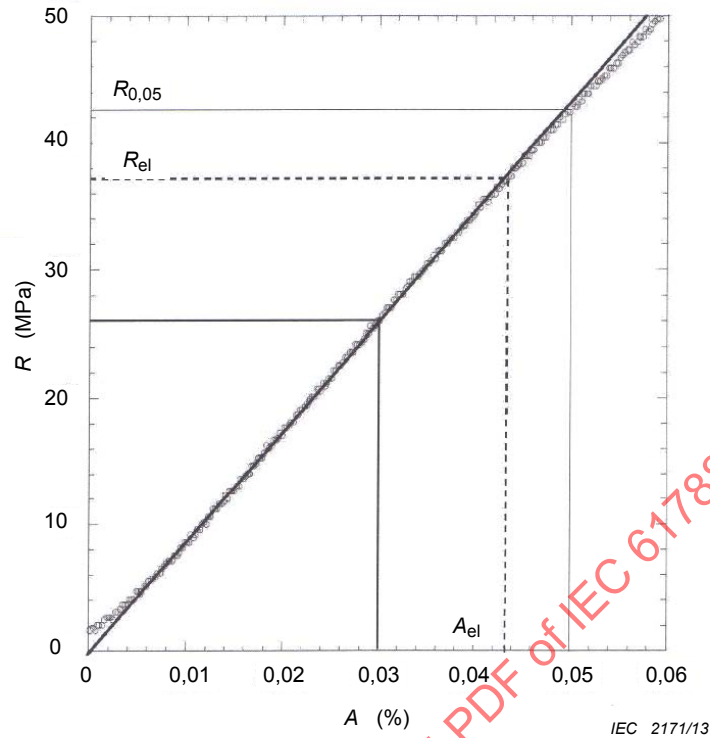


Figure C.1 – Measured stress versus strain curve for Bi-2223 wire

C.2 Uncertainty of the modulus of elasticity E_0

C.2.1 Equations

Here necessary quantities are defined for the present uncertainty analysis. The modulus of elasticity is given as stress divided by strain,

$$E_0 = \frac{R}{A} [\text{MPa} / \%] \quad (\text{C.2})$$

The corrected load is obtainable by comparing the measured value (P_{0m}) for the standard mass (P_0). The stress is then given dividing by the cross sectional area as given by the equation,

$$R = P \frac{P_0}{P_{0m}} \frac{1}{tw} [\text{MPa}] \quad (\text{C.3})$$

Strain is given by the deviation of the extensometer divided by the gauge length,

$$A = 100 \times \frac{\Delta L}{L_G} [\%] \quad (\text{C.4})$$

Therefore, the mathematical model to obtain modulus of elasticity is expressed as

$$E_0 = \frac{1}{100} \times P \frac{P_0}{P_{0m}} \frac{1}{tw} \frac{L_G}{\Delta L} [\text{MPa} / \%] \quad (\text{C.5})$$

Seven independent variables shall be taken into consideration in order to evaluate uncertainties relating to the modulus of elasticity;

$$E_0 = f(P, P_0, P_{0m}, t, w, \Delta L, L_G), \quad (C.6)$$

Combined standard uncertainty relating to stress measurement is given as,

$$u_R^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)^2 u_1^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial P_0} \right)^2 u_2^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial P_{0m}} \right)^2 u_3^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 u_4^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial w} \right)^2 u_5^2 \quad (C.7)$$

The combined one relating to strain measurement becomes as

$$u_A^2 = \left(\frac{\partial A}{\partial \Delta L} \right)^2 u_6^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial L_G} \right)^2 u_7^2 \quad (C.8)$$

Combining the above two equations, the total quantity of combined standard uncertainty is given by the equation,

$$u_c^2 = \left(\frac{\partial E_0}{\partial R} \right)^2 u_R^2 + \left(\frac{\partial E_0}{\partial A} \right)^2 u_A^2 \quad (C.9)$$

C.2.2 Stress measurement

Load is measured using the commercial load cell. The manufacturer offers generally technical data on accuracy and temperature dependence of load cell. Table C.1 is a typical data sheet.

Table C.1. – Load cell specifications according to manufacturer's data sheet

Load cell capacity, <i>N</i>	Accuracy class tension / compression %	Temperature coefficient of zero <i>S</i> %/K	Temperature coefficient of sensitivity <i>S</i> %/K	Creep for 30 minutes <i>S</i> %
1 000	0,25	0,25	0,07	0,07

a) Estimation of uncertainties on load measurements

Uncertainties were evaluated with respect to load measurement of $P = 24,6$ N as a given condition. Contributions to uncertainties from the temperature coefficient of zero point and from the creep were neglected because of their small influence. The major factors from load cell were the accuracy and the temperature dependence of sensitivity. Evaluated results are listed in sequence number, SN11 and SN12 of Table C.2.

Output from load cell with full scale (FS) of 1 kN is measured by using the digital volt meter (DVM) in the range of 5 V (FS). Specifications for the respective voltage range are reported to have resolution of 10 μ V and accuracy of 0,012 % + 2 %. The voltage to the load of 24,6 N was 0,123 V as shown in SN13.

Sampling rate of DVM was 60 ms. On the other hand, the initial cross head speed was selected $1,67 \times 10^{-3}$ mm/s for the distance (L_0) between grips of 100 mm. Then the sensitivity coefficient was given as follows,

$$\frac{dP}{dT} = \frac{dP}{dA} \frac{dA}{dt} = \frac{dP}{dA} \frac{100}{L_0} \frac{d\Delta L}{dt} = \frac{twE}{L_{CH}} \frac{d\Delta L}{dt} = 1,36 \text{ [N/s]} \quad (C.10)$$

which is given in SN14. All factors relating to load measurement were summed up by using the equation,

$$u_1 = \sqrt{c_{11}^2 a_{11}^2 / 3 + c_{12}^2 a_{12}^2 / 3 + c_{13}^2 a_{13}^2 / 3 + c_{14}^2 a_{14}^2 / 3} = 0,052 \text{ N} (0,21 \%) \quad (\text{C.11})$$

b) Uncertainty of the standard mass

In order to approve the 1 kN load cell, standard mass of 0,5 kN was used. When its accuracy was guaranteed to be 0,05 % by the manufacturer, the standard uncertainty was given as $u_2 = 0,14 \text{ N} (0,03 \%)$.

c) Uncertainties on measurement of standard mass

Uncertainties were evaluated with respect to the measurement load of $P_{om} = 500 \text{ N}$ as a given condition. The major factors from the load cell were the accuracy and the temperature dependence of sensitivity. Evaluated results are listed in SN31 and SN32 of Table C.2.

Output from load cell with 1 kN FS was measured by using DVM in the range of 5 V FS. Specifications for the respective voltage range were resolution of $10 \mu\text{V}$ and accuracy of $0,012 \% + 2 \%$. The corresponding voltage to the load of 500N is 2,5 V as given in SN33. After attaching the standard mass and waiting to a stationary state, the output of DVM was recorded. Then the standard uncertainty on the standard mass measurement was given as $u_3 = 2,14 \text{ N} (0,43 \%)$.

d) Uncertainties on wire thickness measurement

Uncertainties were evaluated with respect to thickness measurement of $t = 0,216 \text{ mm}$ as a given condition. The thickness was measured by using calliper rule with minimum scale of $2 \mu\text{m}$ and CTE of 20 ppm/K . The evaluated results are listed in SN41 and SN42 of Table C.2. Then the standard uncertainty for thickness measurement was listed as $u_4 = 5,77 \times 10^{-4} \text{ mm} (0,267 \%)$.

e) Uncertainties on wire width measurement

Uncertainties were evaluated with respect to the width measurement of $w = 4,38 \text{ mm}$ as a given condition. The width was measured by using slide calliper with minimum scale of $0,2 \text{ mm}$ and CTE of 20 ppm/K . The evaluated results are listed in SN51 and SN52 of Table C.2. The combined standard uncertainty for gauge length was given as $u_6 = 5,77 \times 10^{-2} \text{ mm} (1,31 \%)$.

Table C.2 – Uncertainties from various factors for stress measurement

SN	Factor	Sensitivity coefficient c_{ij}	Half width a_{ij}	Product $c_{ij}a_{ij} / \sqrt{3}$	Denominator x	$\frac{c_{ij}a_{ij}}{\sqrt{3}x}$ (%)
11	Accuracy of load cell	0,25 [%]	24,6 [N]	$3,55 \times 10^{-2}$ [N]	24,6 [N]	0,14
12	Temp. depend. of sensitivity	$7,223 \times 0,07 \times 10^{-2}$ [N/K]	10 [K]	$2,91 \times 10^{-2}$ [N]	24,6 [N]	0,12
13	Accuracy of DVM	0,012 [%]	$0,123 \times 10^3/5$ [N]	$4,00 \times 10^{-3}$ [N]	24,6 [N]	0,02
14	Increasing load with const. rate	1,36 [N/s]	0,03 [s]	$2,35 \times 10^{-2}$ [N]	24,6 [N]	0,095
2	Accuracy of standard weight	0,05 [%]	500 [N]	0,14 [N]	500 [N]	0,03
31	Accuracy of load cell	0,25 [%]	500 [N]	$7,21 \times 10^{-1}$ [N]	500 [N]	0,14
32	Temp. depend. of sensitivity	$500 \times 0,07 \times 10^{-2}$ [N/K]	10 [K]	2,02 [N]	500 [N]	0,40
33	Accuracy of DVM	0,012 [%]	$2,5 \times 10^3/5$ [N]	$3,69 \times 10^{-2}$ [N]	500 [N]	0,007

SN	Factor	Sensitivity coefficient c_{ij}	Half width a_{ij}	Product $c_{ij}a_{ij} / \sqrt{3}$	Denominator x	$\frac{c_{ij}a_{ij}}{\sqrt{3}x}$ (%)
41	Accuracy of caliper rule	1	0,001 [mm]	$5,77 \times 10^{-4}$ [mm]	0,216 [mm]	0,26
42	Temp. depend. of sensitivity	$0,216 \times 20 \times 10^{-6}$ [mm/K]	10 [K]	$2,49 \times 10^{-5}$ [mm]	0,216 [mm]	0,01
51	Accuracy of slide caliper	1	0,1 [mm]	$5,77 \times 10^{-2}$ [mm]	4,38 [mm]	1,31
52	Temp. depend. of sensitivity	$4,38 \times 20 \times 10^{-6}$ [mm/K]	10 [K]	$5,05 \times 10^{-4}$ [mm]	4,38 [mm]	0,01
All factors listed here belong to B type uncertainty.						

The combined standard uncertainty for stress measurement was evaluated by using Equation (C.7) together with five values of u_1 , u_2 , u_3 , u_4 and u_5 . The following sensitivity coefficients were used;

$$\frac{\partial R}{\partial P} = \frac{R}{P}, \frac{\partial R}{\partial P_0} = \frac{R}{P_0}, \frac{\partial R}{\partial P_{om}} = -\frac{R}{P_{om}}, \frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{R}{t} \text{ and } \frac{\partial R}{\partial w} = -\frac{R}{w} \quad (\text{C.12})$$

The combined standard uncertainty for stress was given as $u_R = 0,37$ MPa (1,42 %).

6) Uncertainties on elongation measurement

Uncertainties were evaluated with respect to elongation measurement of $\Delta L = 7,5 \times 10^{-3}$ mm as a given condition. Extensometers had resolution of 0,1 μm and temperature coefficient of 15 ppm/K. The possible temperature range from 30 °C to 10 °C was supposed. The results are listed in SN61 and SN62 of Table C.3.

Output from extensometers elongated by 500 μm corresponded to 5 V. Specifications for the respective voltage range were 10 μV and 0,012 % + 2 % for the resolution and accuracy, respectively. The corresponding voltage to the elongation of $7,5 \times 10^{-3}$ mm is 0,075 V as listed in SN63. Sampling rate of DVM was 60 ms. On the other hand, the elongation rate of the extensometers with $L_G = 25$ mm was 0,417 mm/s as listed in SN64. The combined standard uncertainty for elongation measurement was evaluated as $u_6 = 2,86 \times 10^{-5}$ mm (0,395 %).

7) Uncertainties on measurement of gauge length

Uncertainties were evaluated with respect to the length measurement of $L_G = 25$ mm given condition. The length was measured by using slide calliper with minimum scale of 0,2 mm and CTE of 20 ppm/K. The evaluated results are listed in SN71 and SN72 of Table C.3. The combined standard uncertainty for gauge length was given as $u_7 = 5,78 \times 10^{-2}$ mm (0,23 %).

Table C.3 – Uncertainties with respect to measurement of strain measurement

<i>ij</i>	Factor	Sensitivity coefficient c_{ij}	Half width a_{ij}	Product $c_{ij}a_{ij} / \sqrt{3}$	Denominator x	$\frac{c_{ij}a_{ij}}{\sqrt{3}x}$ (%)
61	Accuracy of extensometers	1	$0,5 \times 10^{-4}$ [mm]	$2,88 \times 10^{-5}$ [mm]	$7,5 \times 10^{-3}$ [mm]	0,384
62	Temp. depend. of sensitivity	$1,363 \times 10^{-3} \times 1,5 \times 10^{-5}$ [mm/K]	10 [K]	$1,18 \times 10^{-7}$ [mm]	$7,5 \times 10^{-3}$ [mm]	0,001
63	Accuracy of DVM	0,012 [%]	$0,075 \times 0,5/5$ [mm]	$1,67 \times 10^{-6}$ [mm]	$7,5 \times 10^{-3}$ [mm]	0,02
64	Increasing elongation with const. rate	$0,417 \times 10^{-3}$ [mm/s]	0,03 [s]	$0,720 \times 10^{-5}$ [mm]	$7,5 \times 10^{-3}$ [mm]	0,096
71	Accuracy of slide caliper	1	0,1 [mm]	$5,77 \times 10^{-2}$ [mm]	25 [mm]	0,23
72	Temp. depend. of sensitivity	$25 \times 20 \times 10^{-6}$ [mm/K]	10 [K]	$2,88 \times 10^{-3}$ [mm]	25 [mm]	0,01
All factors listed here belong to B type uncertainty.						

The combined standard uncertainty for strain measurement was evaluated by using Equation (C.8) together with six values in u_5 and u_6 . The following sensitivity coefficients were used;

$$\frac{\partial A}{\partial \Delta L} = \frac{A}{\Delta L} \text{ and } \frac{\partial A}{\partial L_G} = -\frac{A}{L_G} \quad (\text{C.13})$$

The combined standard uncertainty for stress was given as $u_A = 0,000137$ % (0,557 %).

C.2.3 Combined standard uncertainty of each variable

Finally the combined standard uncertainty was evaluated as follows. Sensitivity coefficients appeared in Equation (C.10) are given as

$$\frac{\partial E_0}{\partial R} = \frac{E_0}{R} \text{ and } \frac{\partial E_0}{\partial A} = -\frac{E_0}{A} \quad (\text{C.14})$$

Table C.4 – Summary of evaluated uncertainties caused by various factors

Sequential number	Factor	Sensitivity coefficient c_{ij}	Standard uncertainty u_i	Product $c_i \times u_i$
R	Stress	33,1 [1/%]	0,37 [MPa]	12,6 [MPa/%]
A	Strain	$2,87 \times 10^4$ [MPa/(%) ²]	$1,37 \times 10^{-4}$ [%]	3,93 [MPa/%]

As a summary, the combined standard uncertainty was calculated by using data of Table C.6. The result gives as $u_c = 13,2$ MPa/%. It corresponds to the relative combined standard uncertainty of 1,53 %.

The combined standard uncertainty for the modulus of elasticity was expressed as

$$E_0 = 86,1 \text{ GPa} \pm 1,3 \text{ GPa} \quad (\text{C.15})$$

Looking at Tables C.2 and C.3, the major factors contributing to the uncertainties are limited into the following terms of 14, 32, 41, 51, 61, 64 and 71. Their selected terms might be referred in the further discussions. Specially two terms of 14 and 64 relating to the initial strain rate give significant contribution. When the initial strain rate is changed, the combined standard uncertainties (U_{CSU}) and expanded uncertainties (U_{EU}) for the modulus of elasticity ($E_0 = 86,1 \text{ GPa}$) as a function of initial cross head rate ($L_{\text{CH}} = 100 \text{ mm}$) is expected as listed in Table C.5, where the coverage factor (k) is given as 2.

Table C.5 – Results of uncertainty evaluation for the modulus of elasticity ($E_0 = 86,1 \text{ GPa}$) as a function of initial cross head rate

$d\Delta L/dt$ (mm/s)	dA/dt (1/s)	U_{CSU} (GPa)	U_{RCSU} (%)	U_{EU} (GPa)	U_{REU} (%)
$1,67 \times 10^{-4}$	$1,67 \times 10^{-6}$	1,27	1,47	2,54	2,94
$1,67 \times 10^{-3}$	$1,67 \times 10^{-5}$	1,28	1,48	2,56	2,96
$1,67 \times 10^{-2}$	$1,67 \times 10^{-4}$	1,72	2,00	3,44	4,00
$3,34 \times 10^{-2}$	$3,34 \times 10^{-4}$	2,65	3,07	5,30	6,14
$8,35 \times 10^{-2}$	$8,35 \times 10^{-4}$	5,96	6,92	11,92	13,84

C.3 Uncertainty of stress measurement at constant strain

In the present test method, one of major items is to measure the stress at constant strain; that is, the stresses at 0,05 %, 0,1 %, 0,15 % and 0,2 %, respectively. Here, the procedure to estimate uncertainties is discussed as below.

As shown in Figure C.1, the uncertainty for $R_{0,05}$ is evaluated, where the given parameters are $R = 42,5 \text{ MPa}$, $P = 40,205 \text{ N}$, $A = 0,05 \%$ and $\Delta L = 1,25 \times 10^{-2} \text{ mm}$. Six independent variables shall be considered in order to evaluate uncertainties of stress measurement;

$$R = f(P, P_0, P_{0m}, t, w, A) \quad (\text{C.16})$$

Then the combined standard uncertainty is given by the equation

$$u_c^2 = u_R^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial A} \right)^2 u_A^2 \quad (\text{C.17})$$

Analytical expression of u_R and u_A is given by Equation (C.7) and Equation (C.8), respectively.

Here we get $u_R = 0,629 \text{ MPa}$ and $u_A = 0,0040 \%$ by using data listed in Table C.4, where only the major terms are listed. Consequently, $u_c = 0,64 \text{ MPa}$ (1,50 %),

$$R = 42,5 \text{ MPa} \pm 0,64 \text{ MPa} \quad (\text{C.18})$$

As a summary, the results of uncertainty evaluation for the stress ($R = 42,5 \text{ MPa}$) as a function of initial strain rate is summarized as listed in Table C.7, where the coverage factor (k) is given as 2.

Table C.6 – Uncertainties from various factors for stress measurement

<i>ij</i>	Factor	Sensitivity coefficient c_{ij}	Half width a_{ij}	Product $c_{ij}a_{ij} / \sqrt{3}$	Denominator x	$\frac{c_{ij}a_{ij}}{\sqrt{3}x}$ (%)
14	Increasing load with const. rate	1,36 [N/s]	0,03 [s]	$2,35 \times 10^{-2}$ [N]	40,2 [N]	0,058
32	Temp. depend. of sensitivity	$500 \times 0,07 \times 10^{-2}$ [N/K]	10 [K]	2,02 [N]	500 [N]	0,40
41	Accuracy of caliper rule	1	0,001 [mm]	$5,77 \times 10^{-4}$ [mm]	0,216 [mm]	0,26
51	Accuracy of slide caliper	1	0,1 [mm]	$5,77 \times 10^{-2}$ [mm]	4,38 [mm]	1,38
61	Accuracy of extensometers	1	$0,5 \times 10^{-4}$ [mm]	$2,88 \times 10^{-5}$ [mm]	0,0125 [mm]	0,230
64	Increasing elongation with const. rate	$0,417 \times 10^{-3}$ [mm/s]	0,03 [s]	$0,72 \times 10^{-5}$ [mm]	0,0125 [mm]	0,0576
71	Accuracy of slide caliper	1	0,1 [mm]	$5,77 \times 10^{-2}$ [mm]	25 [mm]	0,23
All factors listed here belong to B type uncertainty.						

Table C.7 – Results of uncertainty evaluation for the stress ($R = 42,5$ MPa) as a function of initial strain rate

$d\Delta L/dt$ (mm/s)	dA/dt (1/s)	U_{CSU} (GPa)	U_{RCSU} (%)	U_{EU} (GPa)	U_{REU} (%)
$1,67 \times 10^{-4}$	$1,67 \times 10^{-6}$	0,63	1,50	1,26	3,00
$1,67 \times 10^{-3}$	$1,67 \times 10^{-5}$	0,63	1,50	1,26	3,00
$1,67 \times 10^{-2}$	$1,67 \times 10^{-4}$	0,68	1,61	1,36	3,22
$3,34 \times 10^{-2}$	$3,34 \times 10^{-4}$	0,80	1,89	1,60	3,78
$8,35 \times 10^{-2}$	$8,35 \times 10^{-4}$	1,38	3,25	2,76	6,50

Bibliography

IEC 61788-6, *Superconductivity – Part 6: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test of Cu/Nb-Ti composite superconductors*

ISO 3611:2010, *Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional measuring equipment: Micrometers for external measurements – Design and metrological characteristics*

ASTM E83 – 10a, *Standard Practice for Verification and Classification of Extensometers Systems*

ASTM E111 – 04, *Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus and Chord Modulus*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-18:2013

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-18:2013

SOMMAIRE

1	Domaine d'application	45
2	Références normatives	45
3	Termes et définitions	46
4	Principe	47
5	Appareillage	47
5.1	Généralités	47
5.2	Machine d'essai	47
5.3	Extensomètre	47
6	Préparation de l'éprouvette	48
6.1	Généralités	48
6.2	Longueur de l'éprouvette	48
6.3	Retrait de l'isolation	48
6.4	Détermination de la surface de section (S_0)	48
7	Conditions d'essai	48
7.1	Serrage de l'éprouvette	48
7.2	Mise en place de l'extensomètre	48
7.3	Vitesse d'essai	49
7.4	Essai	49
8	Calcul des résultats	51
8.1	Module d'élasticité (E)	51
8.2	Charge d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2}$)	52
8.3	Contrainte de traction pour des déformations spécifiées (R_A)	53
8.4	Résistance à la rupture (R_f)	53
9	Incertitude de mesure	53
10	Rapport d'essai	53
10.1	Eprouvette	53
10.2	Résultats	54
10.3	Conditions d'essai	54
	Annexe A (informative) Informations complémentaires relatives aux Articles 1 à 14	55
	Annexe B (informative) Considérations relatives à l'incertitude	66
	Annexe C (informative) Exemples spécifiques concernant l'évaluation des incertitudes pour les fils d'Ag/Bi-2223 et d'Ag/Bi-2212	71
	Figure 1 – Courbe contrainte-déformation type et définition du module d'élasticité et des charges d'épreuve à 0,2 % d'un fil d'Ag/Bi-2223 recouvert extérieurement d'une feuille de laiton	50
	Figure 2 – Courbe contrainte-déformation type d'un fil d'Ag/Bi-2223 lorsqu'il n'a pas été possible de déterminer les charges d'épreuve à 0,2 % et définition des contraintes de traction pour des déformations spécifiées	51
	Figure A.1 – Extensomètre de type jumeau de Siam avec une longueur entre repères d'environ 12,3 mm (masse totale d'environ 0,5 g)	55
	Figure A.2 – Extensomètre double à faible masse avec une longueur entre repères d'environ 25,6 mm (masse totale d'environ 3 g)	56
	Figure A.3 – Exemple d'extensomètre muni d'une masse d'équilibrage et d'un axe d'éprouvette vertical	57
	Figure A.4 – Données brutes originales d'une mesure de fil d'Ag/Bi-2223 se présentant sous la forme d'une courbe de charge et de déplacement	58

Figure A.5 – Contrainte type en fonction de la déformation d'un fil d'Ag/Bi-2223 jusqu'à la limite élastique correspondant à la région de transition entre déformation élastique et plastique (point G)	59
Figure C.1 – Courbe de contrainte mesurée en fonction de la déformation pour un fil de Bi-2223	72
Tableau A.1 – Résultats des valeurs d'incertitude type relative obtenus sur différents fils d'Ag/Bi-2223 lors des essais interlaboratoires internationaux	62
Tableau A.2 – Données sélectionnées pour l'essai F pour E_0 de l'échantillon E de fil nu	64
Tableau A.3 – Résultats de l'essai F pour les variations de E_0 de quatre types de fils de Bi-2223	64
Tableau B.1 – Signaux de sortie de deux extensomètres nominalement identiques	67
Tableau B.2 – Valeurs moyennes de deux signaux de sortie	67
Tableau B.3 – Écarts types expérimentaux de deux signaux de sortie	67
Tableau B.4 – Incertitudes-types de deux signaux de sortie	68
Tableau B.5 – Coefficient de variation de deux signaux de sortie	68
Tableau C.1 – Caractéristiques du dynamomètre en fonction des fiches de caractéristiques du fabricant	73
Tableau C.2 – Incertitudes de divers facteurs de mesure de contrainte	75
Tableau C.3 – Incertitudes concernant la mesure de déformation	76
Tableau C.4 – Résumé des incertitudes évaluées provoquées par divers facteurs.	77
Tableau C.5 – Résultats de l'évaluation d'incertitude pour le module d'élasticité ($E_0=86,1$ GPa) en fonction de la vitesse de déplacement initiale	77
Tableau C.6 – Incertitudes de divers facteurs de mesure de contrainte.	78
Tableau C.7 – Résultats d'évaluation d'incertitude pour la contrainte ($R = 42,5$ MPa) en fonction du taux de déformation initial	79

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

**Partie 18: Mesure des propriétés mécaniques –
Essai de traction à température ambiante des supraconducteurs
composites Bi-2223 et Bi-2212 avec gaine Ag et/ou en alliage d'Ag**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – 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 la CEI"). 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI 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 la CEI. La CEI 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61788-18 a été établie par le comité d'études 90 de la CEI: Supraconductivité.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/326/FDIS	90/327/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 61788, publiées sous le titre général *Supraconductivité*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-18:2013

INTRODUCTION

Plusieurs types de supraconducteurs composites sont maintenant commercialisés. En particulier, des supraconducteurs à haute température, tels que des fils de Bi-2223 (Ag/Bi-2223) avec gaine Ag et/ou en alliage d'Ag et des fils de Bi-2212 (Ag/Bi-2212) avec gaine Ag et/ou en alliage d'Ag sont maintenant fabriqués à une échelle industrielle. Les composites supraconducteurs du commerce ont une forte densité de courant et une faible surface de section. Les principales applications des composites supraconducteurs sont la construction de dispositifs d'alimentation électrique et d'aimants supraconducteurs. Pendant la fabrication de l'aimant, des contraintes/déformations complexes sont appliquées à ses enroulements et lorsqu'il est excité, une force électromagnétique importante est appliquée aux fils supraconducteurs en raison de sa forte densité de courant. Il est donc indispensable de déterminer les propriétés mécaniques des fils supraconducteurs dont sont constitués les enroulements.

Les fils composites supraconducteurs d'Ag/Bi-2223 et d'Ag/Bi-2212 fabriqués par la méthode de poudre en tube sont constitués d'un certain nombre de filaments d'oxyde avec de l'argent et un alliage d'argent en tant que stabilisateur et support. Dans le cas où le renfort externe des fils d'Ag/Bi-2223 et d'Ag/Bi-2212 utilisant des feuilles minces d'alliage inoxydable ou de Cu a été adopté pour résister à la force électromagnétique importante, la présente norme doit également être appliquée.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-18:2013

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 18: Mesure des propriétés mécaniques – Essai de traction à température ambiante des supraconducteurs composites Bi-2223 et Bi-2212 avec gaine Ag et/ou en alliage d'Ag

1 Domaine d'application

La présente norme internationale spécifie une méthode d'essai détaillant les modes opératoires d'essai de traction à exécuter sur des fils composites supraconducteurs d'Ag/Bi-2223 et d'Ag/Bi-2212 à température ambiante.

Cet essai est utilisé pour mesurer le module d'élasticité et pour déterminer la charge d'épreuve à 0,2 %.

Lorsqu'on ne peut pas déterminer la charge d'épreuve à 0,2 % en raison d'une défaillance antérieure, on mesure le niveau de contrainte pour des déformations apparentes de 0,05 %, 0,1 %, 0,15 %, 0,2 %, 0,25 % avec un incrément de 0,05 %.

Les valeurs de la limite élastique, de la résistance à la rupture, du pourcentage d'allongement après fracture et du type ajusté de charge d'épreuve à 0,2 % ne servent que de référence (voir Articles A.4, A.5, A.6 et A.10).

Il convient que l'échantillon couvert par ce mode opératoire d'essai ait une section circulaire ou rectangulaire d'une surface de 0,3 mm² à 2,0 mm² (correspondant aux fils en forme de bande d'une largeur de 2,0 mm à 5,0 mm et d'une épaisseur de 0,16 mm à 0,4 mm).

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60050 (toutes les parties), *Vocabulaire Electrotechnique International* (disponible sur <<http://www.electropedia.org>>)

ISO 376, *Matériaux métalliques – Etalonnage des instruments de mesure de force utilisés pour la vérification des machines d'essais uniaxiaux*

ISO 6892-1, *Matériaux métalliques – Essai de traction – Partie 1: Méthode d'essai à température ambiante*

ISO 7500-1, *Matériaux métalliques – Vérification des machines pour essais statiques uniaxiaux – Partie 1: Machines d'essai de traction/compression – Vérification et étalonnage du système de mesure de force*

ISO 9513, *Matériaux métalliques – Etalonnage des chaînes extensométriques utilisées lors d'essais uniaxiaux*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 60050-815 et l'ISO 6892-1, ainsi que les définitions et les termes suivants s'appliquent.

3.1

contrainte de traction

R

force de traction divisée par la surface de section originale à tout moment durant l'essai

3.2

déformation de traction

A

incrément de déplacement divisé par la longueur initiale entre repères des extensomètres à tout moment durant l'essai

3.3

longueur entre repères d'un extensomètre

L_G

longueur de la partie parallèle de l'éprouvette utilisée pour la mesure du déplacement au moyen d'un extensomètre

3.4

distance entre pinces

L_0

longueur comprise entre les pinces qui maintiennent une éprouvette en position avant de démarrer l'essai

3.5

module d'élasticité

E

gradient de la partie rectiligne de la courbe contrainte-déformation dans la région de déformation élastique

VOIR: Figure 1

Note 1 à l'article: Celui-ci peut être déterminé différemment en fonction des modes opératoires adoptés:

- a) le premier d'après la courbe de chargement initiale par la ligne de décalage nul, exprimé par E_0 ,
- b) le deuxième donné par la pente de la ligne durant le déchargement élastique, exprimé par E_U .

3.6

charge d'épreuve à 0,2 %

$R_{p0,2}$

valeur de contrainte lorsque le fil composite supraconducteur se déforme de 0,2 %

VOIR: Figure 1

Note 1 à l'article: La contrainte désignée, $R_{p0,2-0}$ ou $R_{p0,2-U}$ correspond au point A ou B obtenu respectivement d'après les courbes de chargement ou de déchargement initiales de la Figure 1. Cette résistance est considérée comme une charge d'épreuve à 0,2 % représentative du composite.

3.7

contrainte de traction pour des déformations spécifiées

R_A

contrainte de traction correspondant à différentes déformations spécifiées (A)

3.8

résistance à la rupture

R_f

contrainte de traction à la fracture

Note 1 à l'article: Dans la plupart des cas, la résistance à la rupture est définie comme la contrainte de traction correspondant à la force d'essai maximale.

3.9

contrainte de traction à la limite élastique

R_{el}

contrainte de traction à la limite élastique correspondant à l'instant de la transition entre déformation élastique et plastique

3.10

déformation de traction à la limite élastique

A_{el}

déformation à la limite élastique

Note 1 à l'article: La contrainte R_{el} et la déformation correspondante A_{el} se réfèrent respectivement au point G de la Figure A.5, et elles sont considérées comme le point de transition entre déformation élastique et plastique.

4 Principe

L'essai consiste à déformer une éprouvette au moyen d'une force de traction, généralement jusqu'à la fracture, en principe dans le but de déterminer les propriétés mécaniques définies à l'Article 3.

Selon la méthode de mesure de déformation utilisée, il convient toutefois de limiter les quantités déterminées par le présent essai. Lorsqu'on utilise le système d'extensomètre simple classique, la détermination de E_U et $R_{p0,2-U}$ est recommandée. Par ailleurs, toutes les grandeurs ici décrites peuvent être déterminées en utilisant un système d'extensomètre double, grâce à sa capacité de compenser les effets de flexion de l'éprouvette, garantissant ainsi une détermination correcte du module d'élasticité.

5 Appareillage

5.1 Généralités

La machine d'essai et les extensomètres doivent respectivement être conformes à l'ISO 7500-1 et à l'ISO 9513. L'étalonnage doit satisfaire à l'ISO 376. Les exigences spéciales de la présente norme sont présentées ici.

5.2 Machine d'essai

Un système de régulation de machine d'essai de traction fournissant une vitesse de déplacement constante doit être utilisé. Les pinces doivent avoir une structure et une résistance appropriées à l'éprouvette et doivent être construites de manière à réaliser une liaison solide avec la machine d'essai de traction. Les faces des pinces doivent être limées ou moletées ou sinon rugueuses, de façon que l'éprouvette ne glisse pas durant l'essai. Le serrage peut être du type à vis ou pneumatique ou actionné de manière hydraulique.

5.3 Extensomètre

La masse de l'extensomètre doit être inférieure ou égale à 30 g de façon à ne pas influencer sur les propriétés mécaniques des fils composites supraconducteurs. La masse des extensomètres doit être équilibrée symétriquement par rapport au fil pour éviter toute force de non-alignement. On doit prendre soin d'éviter l'application de moments de flexion à l'éprouvette (voir les Articles A.2 et A.3).

6 Préparation de l'éprouvette

6.1 Généralités

Lorsqu'une éprouvette prélevée sur une bobine doit être redressée, on doit utiliser une méthode ayant aussi peu d'influence que possible sur le matériau. On doit prendre soin à éviter toute flexion ou préchargement lorsque l'éprouvette est manipulée manuellement.

6.2 Longueur de l'éprouvette

La longueur de l'éprouvette doit être égale à la somme de la distance intérieure entre les pinces et de la longueur des pinces. La distance intérieure entre les pinces doit être au moins de 60 mm, comme l'exige l'installation de l'extensomètre.

6.3 Retrait de l'isolation

Si la surface de l'éprouvette est recouverte d'un matériau isolant, les revêtements doivent être enlevés. On doit utiliser une méthode chimique ou mécanique, avec soin en enlevant le revêtement de façon à ne pas endommager la surface de l'éprouvette (voir l'Article A.7).

6.4 Détermination de la surface de section (S_0)

Un micromètre ou un autre appareil de mesure de dimension doit être utilisé pour obtenir la surface de section de l'éprouvette après avoir enlevé le dépôt d'isolation. La surface de section des fils en forme de bande doit être obtenue à partir du produit de son épaisseur par sa largeur. Les corrections à effectuer pour les coins de la surface de section doivent être déterminées par consultation entre les parties concernées (voir l'Article A.8). De plus, dans le cas des fils lenticulaires, on peut également effectuer une mesure de la largeur et de l'épaisseur au moyen d'une photographie. On doit utiliser une valeur moyenne de l'épaisseur au milieu et sur les bords pour les fils ayant une épaisseur variable tout au long de leur largeur afin de minimiser l'effet de désadaptation sur leur surface de section. La surface de section d'un fil circulaire doit être calculée en utilisant la moyenne arithmétique des deux diamètres orthogonaux.

7 Conditions d'essai

7.1 Serrage de l'éprouvette

Lorsque l'éprouvette est sur le point d'être montée sur les pinces de la machine d'essai de traction, l'éprouvette et l'axe du chargement en traction doivent se trouver sur la même ligne droite. Du papier abrasif peut être inséré en tant que matériau d'amortissement pour empêcher les surfaces serrées de l'éprouvette de glisser et de se fracturer (voir l'Article A.9). Pendant le montage de l'éprouvette, on doit empêcher toute flexion ou déformation.

7.2 Mise en place de l'extensomètre

Lors du montage de l'extensomètre, on doit prendre soin d'empêcher la déformation de l'éprouvette, comme dans le cas d'une empreinte due aux bords tranchants de l'extensomètre pouvant provoquer une fracture précoce de l'éprouvette. L'extensomètre doit être monté au centre entre les pinces, en alignant la direction de mesure avec la direction de l'axe de l'éprouvette.

Durant le montage, il convient de prendre soin à ne pas précharger l'éprouvette. Après installation, le chargement doit être physiquement annulé.

Dans le cas où l'on utilise un système d'extensomètre double, celui-ci doit être monté symétriquement par rapport à la section pour permettre de faire la moyenne de la contrainte pour compenser les effets de flexion.

7.3 Vitesse d'essai

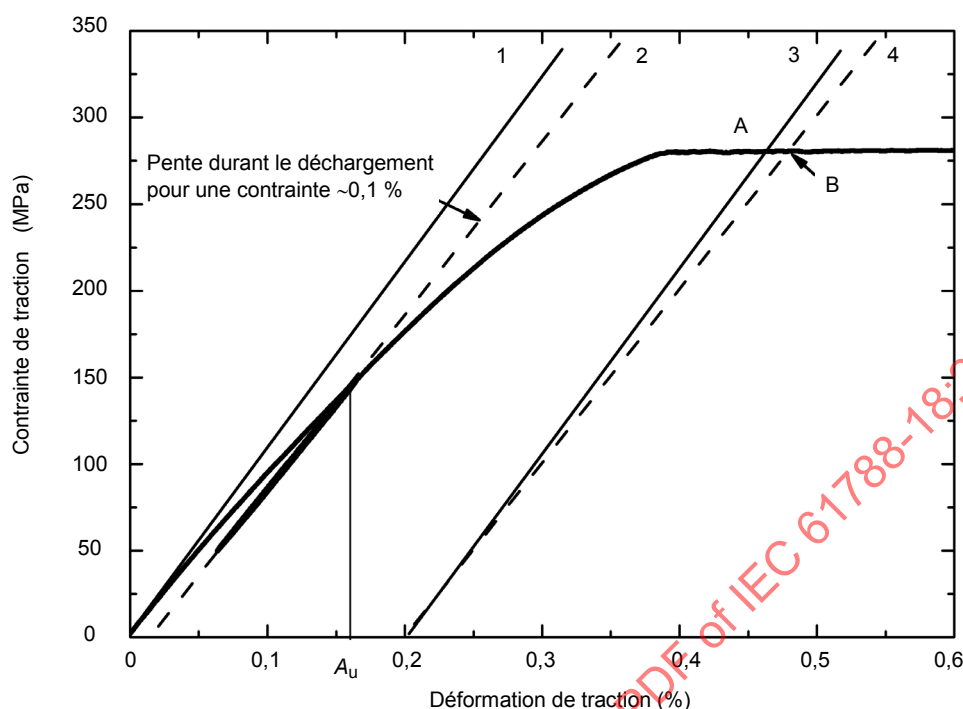
Les essais de traction doivent être effectués avec une commande de déplacement. Il est recommandé de régler la vitesse de déplacement de la machine entre 0,1 mm/min et 0,5 mm/min.

7.4 Essai

À la suite de cette procédure, la machine d'essai de traction doit être démarrée après que la vitesse de déplacement a été réglée au niveau spécifié. La déformation et la contrainte calculées d'après les signaux de sortie de l'extensomètre et du dynamomètre doivent être tracées respectivement en abscisse et en ordonnée sur le diagramme représenté sur la Figure 1 et la Figure 2. Lorsque la déformation totale a atteint une valeur approximativement de 0,1 % (A_U), la contrainte de traction doit être réduite de 30 % à 40 %. La charge doit ensuite être augmentée à nouveau jusqu'au niveau précédent et on doit poursuivre l'essai jusqu'au moment où l'éprouvette est fracturée.

Avant de commencer tout programme d'essai de matériau, il est conseillé de contrôler l'ensemble du matériel d'essai en utilisant des fils de dimensions similaires ayant des propriétés élastiques connues (voir l'Article A.13).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-18:2013

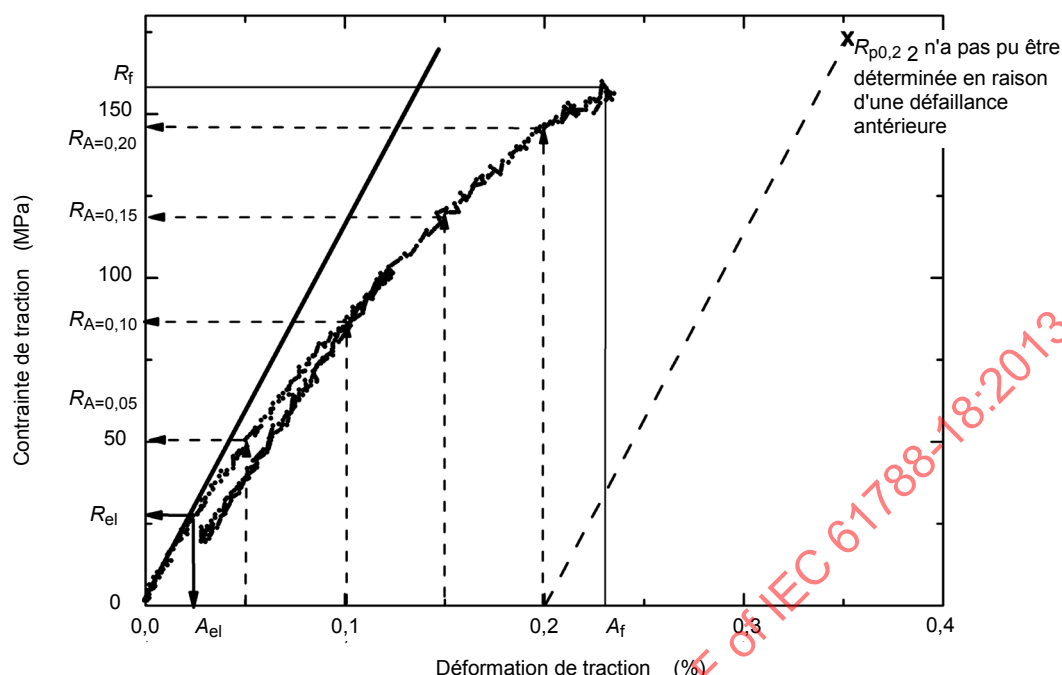


IEC 2164/13

- 1 Ligne droite tracée à partir de la courbe de chargement initiale (ligne de décalage nul)
 - 2 Ligne droite tracée à partir de la courbe de déchargement
 - 3 Ligne décalée de 0,2 % tracée à partir de la courbe de chargement initiale par décalage parallèle
 - 4 Ligne décalée de 0,2 % tracée à partir de la courbe de déchargement initiale par décalage parallèle
- A charge d'épreuve à 0,2% obtenue par la ligne décalée 3
- B charge d'épreuve à 0,2% obtenue par la ligne décalée 4

NOTE Généralement, la pente de la courbe de chargement initiale diminue lorsque la déformation augmente. Deux lignes droites peuvent ensuite être tracées à partir du point de décalage à 0,2 % sur l'abscisse pour obtenir une charge d'épreuve à 0,2 % du composite. Le point A est obtenu à partir de la courbe de chargement initiale et le point B est obtenu à partir de la courbe de déchargement.

Figure 1 – Courbe contrainte-déformation type et définition du module d'élasticité et des charges d'épreuve à 0,2 % d'un fil d'Ag/Bi-2223 recouvert extérieurement d'une feuille de laiton



IEC 2165/13

NOTE Lorsqu'on ne peut pas déterminer la charge d'épreuve de décalage à 0,2 % en raison d'une défaillance antérieure des fils, on mesure les contraintes de traction pour des déformations spécifiées, par exemple de 0,05 %, 0,10 %, 0,15 % et 0,20 % avec un incrément de 0,05 %. De plus, la résistance à la rupture R_f et le pourcentage d'allongement à la fracture A_f ont été déterminés d'après la courbe contrainte-déformation.

Figure 2 – Courbe contrainte-déformation type d'un fil d'Ag/Bi-2223 lorsqu'il n'a pas été possible de déterminer les charges d'épreuve à 0,2 % et définition des contraintes de traction pour des déformations spécifiées

8 Calcul des résultats

8.1 Module d'élasticité (E)

Le module d'élasticité doit être calculé en général en utilisant l'équation suivante et la partie rectiligne, soit de la courbe de chargement initiale, soit de la courbe de déchargement. Pour une analyse postérieure des données tracées, il convient d'utiliser un logiciel approprié pour l'évaluation des données, comportant une fonction d'agrandissement de la courbe contrainte-déformation, en particulier autour de la région où l'on s'attend à un écart par rapport à la linéarité (voir l'Article A.12).,

$$E = \Delta F / (S_0 \Delta A) \quad (1)$$

où

E est le module d'élasticité;

ΔF est l'incrément de la force correspondante;

ΔA est l'incrément de la déformation correspondant à ΔF ;

S_0 est la surface de section originale de l'éprouvette.

Puisque le processus de déchargement est exécuté pour la déformation indiquée par le point A_U à la Figure 1, on utilise la même équation (1) à la fois pour le module de déchargement (E_U) et le module de chargement initial (E_0). Il est recommandé de mesurer la courbe de déchargement au point de départ A_U , où il est recommandé que A_U soit approximativement égal à 0,1 %.

Après l'essai, les résultats doivent être examinés en utilisant le rapport E_0/E_U . Le rapport doit satisfaire à la condition (2) dans laquelle $\Delta = 0,3$ (voir l'Article A.11).

$$1 - \Delta < \frac{E_0}{E_U} < 1 + \Delta \quad (2)$$

S'il ne satisfait pas à la condition (2), on estime que l'essai n'est pas valable. L'essai doit ensuite être répété après avoir vérifié le mode opératoire expérimental selon la présente méthode d'essai.

Il est recommandé d'exécuter la procédure de déchargement-rechargement comme suit: Lorsque la courbe de chargement atteint la déformation $A_U = 0,10$ %, la contrainte est réduite de 30 % à 40 % et le fil est rechargé.

La pente des courbes de déchargement doit être obtenue dans la partie linéaire comprise entre la contrainte où a commencé le déchargement et la contrainte généralement à 90 % en référence au début de la contrainte de déchargement.

8.2 Charge d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2}$)

La charge d'épreuve à 0,2 % du composite doit être déterminée de deux manières, à partir de la partie de chargement initiale et de la partie de déchargement/rechargement de la courbe tension-contrainte représentée à la Figure 1.

La charge d'épreuve à 0,2 % sous le chargement de $R_{p0,2-0}$ doit être déterminée comme suit: la partie linéaire initiale de la ligne de chargement de la courbe contrainte-déformation est déplacée parallèlement de 0,2 % sur l'axe de déformation (ligne de décalage de 0,2 % sous chargement) et le point A auquel cette droite coupe la courbe contrainte-déformation doit être défini comme la charge d'épreuve à 0,2 % sous chargement initial.

La charge d'épreuve à 0,2 % sous déchargement de $R_{p0,2-U}$ doit être déterminée comme suit: la partie linéaire de la ligne de déchargement est déplacée parallèlement au point de déformation décalé de 0,2 %. L'intersection de cette ligne avec la courbe contrainte-déformation détermine le point B qui doit être défini comme la charge d'épreuve à 0,2 % sous déchargement. On détermine la charge d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2-U}$) en fonction de la ligne de déchargement (4 à la Figure 1).

Chaque charge d'épreuve à 0,2 % doit être calculée en utilisant l'équation (3) indiquée ci-dessous:

$$R_{p0,2-i} = F_i / S_0 \quad (3)$$

où

$R_{p0,2-i}$ est la charge d'épreuve à 0,2 % (MPa) en chaque point;

F_i est la force (N) en chaque point;

S_0 est la surface de section originale (en millimètres carrés) de l'éprouvette;

en outre, $i = 0$ à 0 % et $i = U$ à 0,1 %.

8.3 Contrainte de traction pour des déformations spécifiées (R_A)

D'autre part, lorsqu'on ne peut pas déterminer la charge d'épreuve à 0,2 % en raison d'une défaillance antérieure, on mesure alors le niveau de contrainte pour des déformations de 0,05 %, 0,1 %, 0,15 %, 0,2 %, 0,25 % avec un incrément de 0,05 % (voir Figure 2).

8.4 Résistance à la rupture (R_f)

La résistance à la traction R_f doit être la force maximale divisée par la surface de section originale du fil avant chargement (voir l'Article A.6).

9 Incertitude de mesure

Sauf spécification contraire, les mesures doivent être effectuées dans une plage de températures pouvant aller de 280 K à 310 K. Une cellule de mesure de force avec une incertitude type relative inférieure à 0,1 %, valable entre zéro et la capacité de force maximale du dynamomètre, doit être utilisée. Il convient que les extensomètres aient une incertitude type relative de déformation inférieure à 0,05 %. Il convient que le capteur de mesure de déplacement (par exemple, un LVDT [transformateur différentiel variable linéaire]) utilisé pour l'étalonnage ait une incertitude type relative inférieure à 0,01 %.

Les valeurs d'incertitude type relative des modules d'élasticité mesurés E_0 et E_U , les contraintes de traction aux déformations spécifiées R_A et les charges d'épreuve $R_{p0,2}$ alors obtenues par rapport à l'essai interlaboratoire international de 8 laboratoires de recherche représentatifs sont données dans le Tableau A.1 (voir l'Article A.11).

L'incertitude type relative correspondant au nombre d'échantillons soumis à essai doit être calculée en utilisant l'équation (4) indiquée ci-dessous:

$$U_{RSU}(N) = \overline{COV} / \sqrt{N} \quad (4)$$

où

$U_{RSU}(N)$ est l'incertitude type relative,

N est le nombre d'échantillons soumis à essai,

$\overline{COV}$ est le coefficient de variation moyenné pour toutes les données soumises à essai.

Selon l'essai interlaboratoire international (voir 4 et 5 de l'Article A.14), l'incertitude type relative correspondant au nombre d'échantillons soumis à essai peut être calculée en utilisant l'équation (4). Par exemple, l'incertitude était de 1,8 % pour E_0 pour les données d'essai de $N = 18$ dans le cas d'un échantillon nu E après le contrôle de qualification. De façon similaire, l'incertitude était de 1,5 % pour E_U ($N = 18$). Pour deux fils nus BSSCO, il n'a pas été possible d'évaluer $R_{p0,2}$. Cependant, pour des fils d'Ag/Bi-2223 recouverts de 3 couches de feuilles métalliques, on a rapporté 1,4 % pour $R_{p0,2}$ ($N = 9$). En outre, on a rapporté des incertitudes dans la gamme de 1,0 % à 2,7 % pour les contraintes aux déformations spécifiées R_A ($N = 16$).

10 Rapport d'essai

10.1 Eprouvette

- Nom du fabricant de l'éprouvette
- Classification et/ou symbole
- Numéro de lot

Les informations suivantes doivent être rapportées si possible.

- d) Matières premières ainsi que leur composition chimique
- e) Forme en section transversale et dimension du fil en forme de bande
- f) Nombre de filaments
- g) Rapport non-supraconducteur sur supraconducteur

10.2 Résultats

Les résultats des propriétés mécaniques suivantes doivent être rapportés.

- a) Module d'élasticité (E_0 et E_U avec A_U)
- b) Charges d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2-0}$ et $R_{p0,2-U}$)
- c) Contrainte de traction (R_A) pour des déformations de 0,1 %, 0,15 %, 0,2 %, 0,25 % avec un incrément de 0,05 %

Les informations suivantes doivent être rapportées en option sur demande.

- d) Pourcentage d'allongement à la fracture (A_f) déterminé d'après les courbes contrainte-déformation et à l'emplacement de la fracture (c'est-à-dire, dans l'extensomètre au niveau des pinces)
- e) Résistance à la traction (R_f)

Les informations suivantes doivent être rapportées si possible.

- f) Coefficient de fonction d'ajustement de courbe obtenu avec une fonction exponentielle (voir l'Article A.5)
- g) Contrainte de traction à la limite élastique (R_{el})
- h) Contrainte de déformation à la limite élastique (A_{el})

10.3 Conditions d'essai

Les informations suivantes doivent être rapportées si nécessaires.

- a) Vitesse de déplacement
- b) Distance entre pinces
- c) Température
- d) Fabricant et modèle de la machine d'essai
- e) Fabricant et modèle d'extensomètre
- f) Méthode de serrage

Annexe A (informative)

Informations complémentaires relatives aux Articles 1 à 14

A.1 Généralités

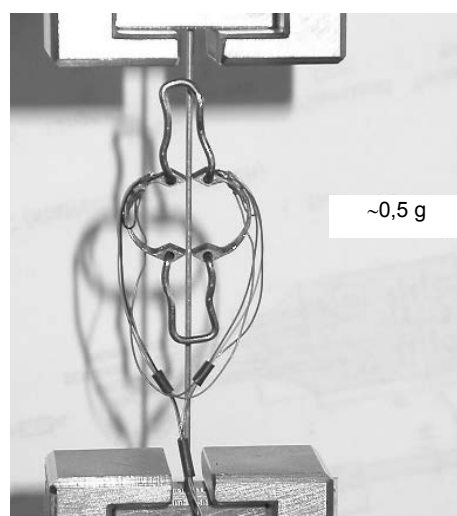
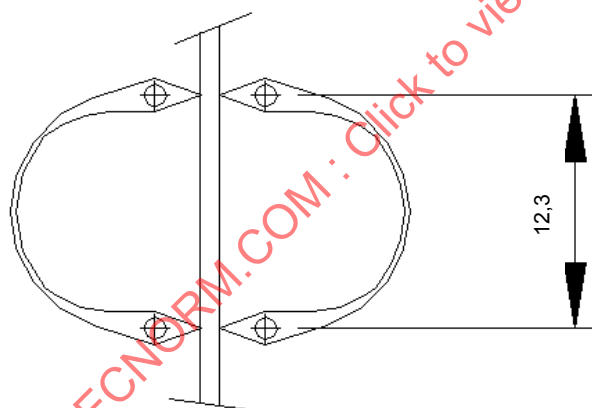
Cette annexe fournit des informations de référence concernant les facteurs variables pouvant avoir une influence importante sur les méthodes d'essai de traction, ainsi que certaines précautions à observer lorsqu'on utilise la présente norme.

A.2 Extensomètre

A.2.1 Extensomètre double

Dans l'essai interlaboratoires international pour les fils d'Ag/Bi-2223, un système d'extensomètre double consistant en deux extensomètres simples est généralement utilisé pour enregistrer deux signaux destinés à être moyennés par un logiciel ou un signal déjà moyenné par le système d'extensomètre lui-même. La masse des extensomètres doubles à faible masse doit être inférieure ou égale à 5 g [1]¹.

Un extensomètre double à faible masse perfectionné type est représenté à la Figure A.1 et à la Figure A.2.



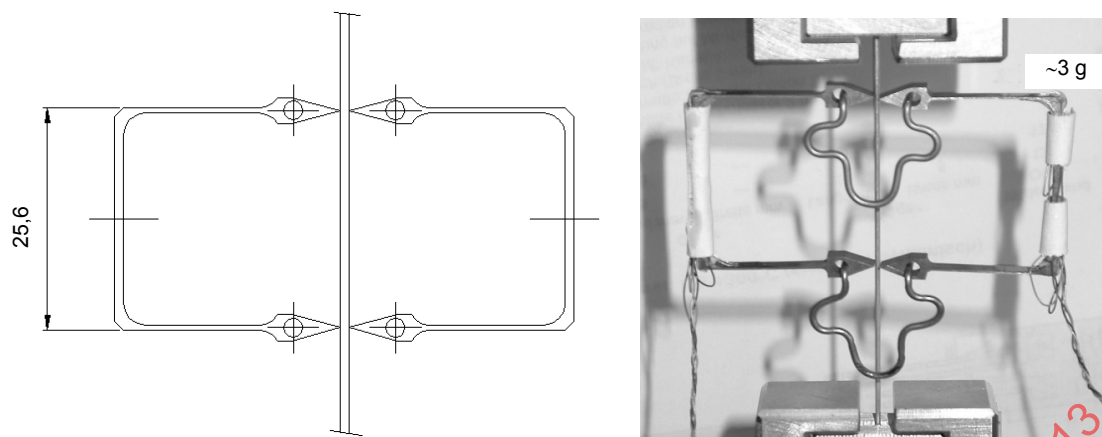
IEC 2166/13

Dimensions en millimètres

NOTE Les deux extensomètres sont câblés ensemble en un extensomètre de type simple, moyennant ainsi électriquement les deux enregistrements de déplacement.

Figure A.1 – Extensomètre de type jumeau de Siam avec une longueur entre repères d'environ 12,3 mm (masse totale d'environ 0,5 g)

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent aux documents de référence de l'Article A.14 de la présente annexe.



IEC 2167/13

Dimensions en millimètres

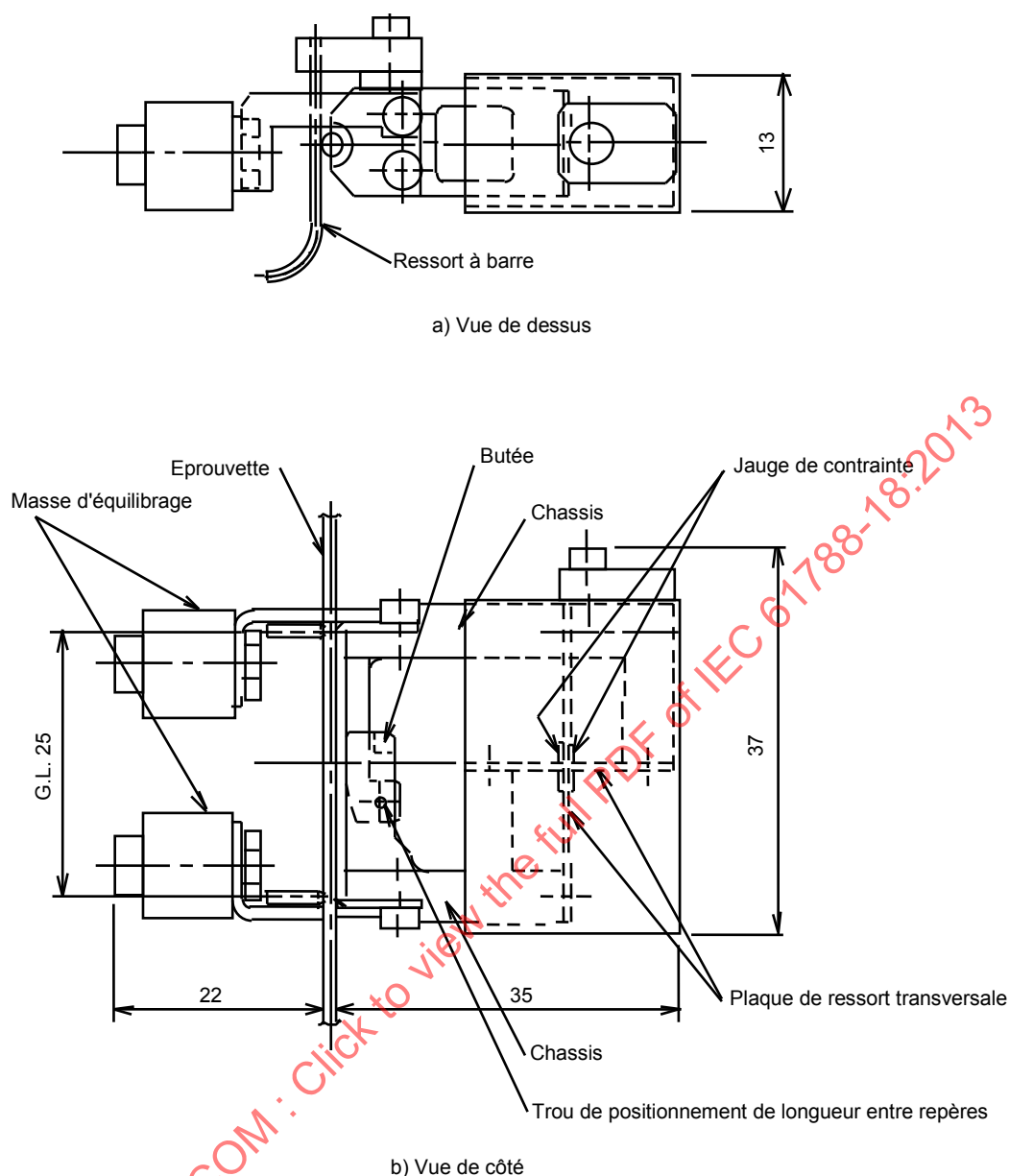
NOTE 2 Chacun des deux extensomètres est un extensomètre de type simple, il convient d'effectuer la moyenne à l'aide d'un logiciel.

Figure A.2 – Extensomètre double à faible masse avec une longueur entre repères d'environ 25,6 mm (masse totale d'environ 3 g)

A.2.2 Extensomètre simple

La Figure A.3 représente un extensomètre simple d'une masse totale de 31 g muni d'une masse d'équilibrage, qui a été utilisé pour élaborer la Norme internationale CEI 61788-6.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-18:2013



IEC 2168/13

Dimensions en millimètres

Figure A.3 – Exemple d'extensomètre muni d'une masse d'équilibrage et d'un axe d'éprouvette vertical

A.3 Exigences concernant les extensomètres à haute résolution

On peut déterminer les exigences concernant ces extensomètres d'après la Figure A.4. Pour satisfaire à l'objectif selon lequel il convient que les valeurs enregistrées obtenues d'après les données brutes aient une faible incertitude type relative, en particulier une déformation comprise entre 0 % et 0,01 %, le déplacement total dans cette gamme doit être de 2,5 μm dans le cas de la longueur entre repères de 25 mm ou de 1,2 μm pour la longueur entre repères de 12 mm. Il convient en fait d'acquérir les signaux avec un rapport signal sur bruit environ 100 fois plus grand pour garantir des enregistrements stables dans la gamme de déformations requise. Le facteur d'étalonnage pour un extensomètre avec longueur entre repères de 12 mm est habituellement de 10 V par déplacement de 1 mm. Il convient que la tension crête à crête du signal soit d'environ 1 mV pour garantir cette faible incertitude type relative. En utilisant des conditionneurs de signal, des câbles blindés et torsadés, de l'état

actuel de la technique et des systèmes d'acquisition de données à haute résolution dont la résolution est supérieure à 16 bits, il est ainsi possible de satisfaire à cette demande [1]. La Figure A.4 représente les données brutes originales d'une mesure de fil d'Ag/Bi-2223 se présentant sous la forme d'une courbe de charge et de déplacement. Pour obtenir une faible dispersion des données comme indiqué ci-dessous, il est nécessaire d'avoir un rapport signal sur bruit élevé permettant de résoudre la courbe bien au-dessous de la gamme de 1 μm [2,3]².

Pour obtenir un gradient de décalage nul avec une incertitude type relative suffisamment faible, permettant d'évaluer le module d'élasticité, un préalable consiste à utiliser des extensomètres à haute résolution avec un rapport signal sur bruit extrêmement élevé.

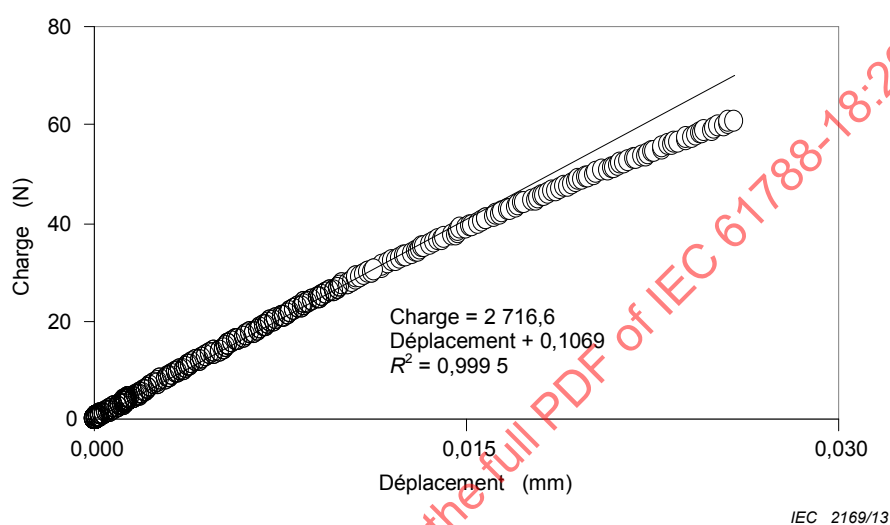


Figure A.4 – Données brutes originales d'une mesure de fil d'Ag/Bi-2223 se présentant sous la forme d'une courbe de charge et de déplacement

A.4 Limite élastique

A.4.1 Contrainte de traction à la limite élastique (R_{el})

La contrainte de traction à la limite élastique correspondant à la transition entre déformation élastique et plastique doit être calculée en général en utilisant l'équation suivante (voir Figure A.5).

$$R_{el} = F_{el}/S_0 \quad (\text{A.1})$$

où

R_{el} est la contrainte de traction (MPa) à la transition entre déformation élastique et plastique;

F_{el} est la force (N) à la transition entre déformation élastique et plastique.

A.4.2 Déformation de traction à la limite élastique (A_{el})

La déformation à la limite élastique (voir Figure A.5) appelée contrainte R_{el} est définie comme suit:

² Les chiffres entre crochets se réfèrent aux documents de référence de l'Article A.14 de la présente annexe.

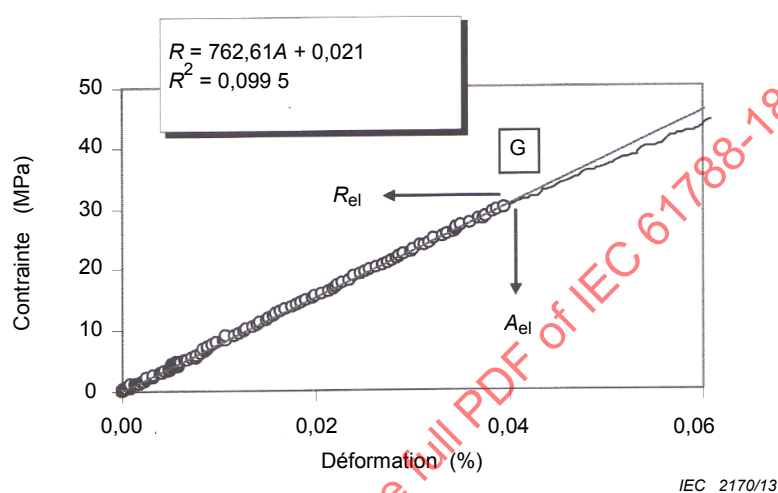
$$\Delta A_{\text{total}} = A_{\text{max}} - A_0 \quad (\text{A.2})$$

où

ΔA_{total} est l'incrément de déformation total en se référant à une déformation de décalage nul correspondant à une déformation où se produit la transition entre déformation élastique et plastique;

A_{max} valeur observée de la déformation en référence à la contrainte R_{el} ;

A_0 déformation de décalage nul.



Les tracés (grands cercles) représentent la région de la partie rectiligne initiale de l'enregistrement. L'analyse de régression linéaire au 1^{er} ordre donne le module d'élasticité E ($E_0 = 76$ GPa) et la mesure de linéarité par le carré du coefficient de régression. La valeur calculée de 76 GPa est le résultat de l'analyse linéaire de régression, l'origine ayant été déterminée de manière à présenter un décalage sur les ordonnées dû à la dispersion du tracé. De plus, il convient que le carré du coefficient de régression soit supérieur à 0,99 pour garantir la linéarité. La contrainte R_{el} et la déformation correspondante A_{el} correspondent à la région de transition entre déformation élastique et plastique. En particulier, la valeur de R_{el} est une quantité importante pour l'estimation du E_0 déterminé. Une valeur faible de R_{el} (par exemple, < 5 MPa) peut indiquer une incertitude supérieure d' E_0 due à la petite portion de la région linéaire. La gamme linéaire plus petite a un impact sur le mesurande E_0 tendant vers une grande incertitude en raison de la dispersion des données et l'incertitude peut déclencher la répétition de la mesure.

Figure A.5 – Contrainte type en fonction de la déformation d'un fil d'Ag/Bi-2223 jusqu'à la limite élastique correspondant à la région de transition entre déformation élastique et plastique (point G)

A.5 Ajustement fonctionnel de la courbe contrainte-déformation et charge d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2-F}$)

Dans le cas des fils d'Ag/Bi-2223 et d'Ag/Bi-2212, la méthode d'ajustement fonctionnel est applicable pour déterminer la charge d'épreuve à 0,2 %. Le matériau constituant de la gaine d'argent dans les conducteurs composites s'est habituellement déformé entre la température de traitement à la chaleur et la température ambiante. En conséquence, la courbe contrainte-déformation est incurvée depuis le début au sens strict, de sorte que l'évaluation du module d'élasticité initial devient difficile. De plus, en raison de la forme non rectiligne de l'éprouvette due à la condition du traitement à la chaleur et à la précontrainte pendant son durcissement sur la machine d'essai de traction, la courbe contrainte-déformation est infléchiée de manière concave ou convexe, il est donc difficile d'estimer le point de déformation nulle intrinsèque. La méthode d'ajustement fonctionnel est efficace pour exclure une telle déformation, présente dans les données expérimentales. Les courbes contrainte-déformation font l'objet d'une approximation en utilisant la fonction exponentielle suivante:

$$F/S_0 = a(\varepsilon - b)^n \quad (\text{A.3})$$

où F , S_0 et ε sont la charge, la section et la déformation obtenues d'après l'essai, a , b et n sont des paramètres obtenus par un ajustement aux moindres carrés moyens non linéaire. Pour éviter de perdre des chiffres pendant le calcul, ε est exprimé en %. La limite supérieure de l'ajustement est de 0,5 % et on augmente la limite inférieure de l'ajustement jusqu'à ce que les trois paramètres convergent.

La charge d'épreuve à 0,2 %, $R_{p0,2-F}$, du composite due à la déformation des composants de la gaine d'argent par la méthode d'ajustement de fonction doit être déterminée comme suit: la partie linéaire sous déchargement doit être déplacée parallèlement au point de décalage à 0,2 % en ce qui concerne le point de déformation nulle défini par le paramètre b . L'intersection de cette ligne avec la courbe contrainte-déformation ajustée détermine le point B qui doit être défini comme la charge d'épreuve à 0,2 % (Figure 1). Un ajustement sur l'équation simplifiée (A.3) en excluant le paramètre b , néglige la précontrainte et fournit une valeur de contrainte de charge d'épreuve proche de $R_{p0,2-U}$. On a rapporté que le logiciel d'ajustement aux moindres carrés moyens non linéaire du commerce pouvait donner des résultats pratiquement identiques aux données expérimentales si l'erreur admissible à utiliser est inférieure à 0,1. On doit toutefois confirmer la coïncidence entre les points de données et la courbe d'ajustement.

A.6 Résistance à la rupture (R_f)

Dans le cas du fil d'Ag/Bi-2223 avec un faible rapport volumique non-supraconducteur sur supraconducteur, une fracture précoce se produit au niveau des pinces, celle-ci donnant une résistance à la traction inférieure et à un plus petit pourcentage d'allongement après fracture. La résistance à la traction et le pourcentage d'allongement après fracture sont importants, non seulement du point de vue scientifique pour décrire les propriétés mécaniques du matériau composite, mais ils sont également utiles pour la mesure de la validité de l'essai. Toutefois, puisque l'incertitude type est importante et que la région de déformation à laquelle on s'intéresse pour le fil est petite, ces valeurs sont simplement utilisées comme références.

La résistance à la traction à laquelle se produit la fracture doit être calculée en utilisant l'équation suivante.

$$R_f = F_f / S_0 \quad (\text{A.4})$$

où R_f est la contrainte de traction (MPa) à la fracture, F_f est la force maximale correspondante (N).

A.7 Retrait de l'isolation/du revêtement

Même si le revêtement ne peut affecter la solidité que dans une faible mesure, Il convient toujours de le retirer de la surface de l'éprouvette en utilisant un solvant organique approprié qui n'endommage pas l'éprouvette. Si le matériau de recouvrement n'est pas dissous par le solvant organique, il convient d'utiliser une méthode mécanique avec soin pour éviter d'endommager la gaine d'argent. Par exemple, la résistance à la traction diminue de moins de 3 % pour un fil de faible résistance ayant un taux d'argent supérieur à 3,5. Le revêtement n'est pas conçu comme un composant structurel. Il est trop compliqué d'effectuer une analyse de mesure d'un composite à quatre constituants, à savoir l'argent, son alliage, des filaments de Bi-2223 ou Bi-2212 et un revêtement isolant. Cette méthode d'essai concerne donc le fil nu afin de maintenir une faible incertitude type relative.

A.8 Détermination de la surface de section

Dans le cas où une faible incertitude type relative est exigée, la surface de section peut être obtenue en corrigeant le rayon du coin du fil rectangulaire fini par des filières ou en corrigeant

l'épaisseur inférieure aux bords des fils finis par laminage. Pour un laminage ou un fini en tête de turc, le rayon du coin et l'épaisseur ne sont pas contrôlés et pour cette raison, une correction est effectuée en utilisant une microphotographie de la section transversale.

A.9 Force de serrage

Une faible force de serrage a pour conséquence un glissement mais une force de serrage importante peut provoquer la rupture de la surface serrée. Il convient donc de régler la force de serrage avec soin. Un matériau d'amortissement tel que du papier abrasif peut être inséré pour empêcher les surfaces serrées de l'éprouvette de glisser et de se fracturer.

A.10 Pourcentage d'allongement après fracture (A_f)

Dans les fils composites il existe une différence de résistance entre la gaine d'argent et les filaments supraconducteurs et le fil est souvent déformé en ondes par le choc de fracture. Il est difficile dans ce cas de déterminer précisément l'allongement après fracture en utilisant la méthode d'aboutement. Ainsi, la mesure d'allongement après fracture ne doit servir que de référence. Le mouvement de la traverse peut être utilisé pour rechercher la valeur approchée de l'allongement après fracture, au lieu d'utiliser la méthode d'aboutement. Pour utiliser cette méthode, la position de la traverse à la fracture doit être enregistrée. On utilise l'équation suivante pour obtenir l'allongement après fracture, à l'aide de la méthode d'aboutement, allongement donné en pourcentage.

$$A_f = 100 (L_u - L_g) / L_g \quad (\text{A.5})$$

où

A_f est le pourcentage d'allongement après fracture;

L_g est la distance intérieure initiale entre pinces;

L_u est la distance entre pinces après fracture.

A.11 Incertitude-type relative

En raison de la nature de toute mesure, les résultats des essais obtenus présentent une dispersion dans tous les cas. Pour évaluer la qualité des données mesurées, le concept d'incertitude sert de fondement à une estimation indépendante. Des informations détaillées concernant l'incertitude d'un mesurande sont fournies dans les Annexes B et C.

Dans le cas d'un fil d'Ag/Bi-2223, des expériences substantielles ont été rassemblées au cours de l'essai interlaboratoire international effectué avec 7 groupes de recherches. En particulier, l'évaluation des données obtenues a fourni des informations précieuses concernant le module d'élasticité déterminé au niveau de la ligne de chargement initiale et à partir de la ligne de déchargement pour une déformation d'environ 0,1 %. En général, le module d'élasticité obtenu résulte du fait que la ligne de chargement initiale présente une plus grande dispersion par rapport aux valeurs déterminées d'après la ligne de déchargement. Une analyse complète de ces données est donnée en référence [4] et montre que le rapport entre E_0 et E_U varie de l'unité si tous les résultats sont recueillis en même temps. Ces variations peuvent être décrites en utilisant la relation simple $1 - \Delta < E_0/E_U < 1 + \Delta$, où Δ définit la valeur de l'écart par rapport à l'unité. Pour limiter la dispersion au niveau de la ligne de chargement initiale et pour effacer les données disqualifiées, $\Delta = 0,3$ s'est révélée être une valeur adéquate à utiliser.

Les quantités importantes telles que le module d'élasticité obtenu à partir de la ligne de chargement initiale et la ligne de déchargement pour une déformation d'environ 0,1 %, la charge d'épreuve à 0,2 %, ainsi que les contraintes de traction aux déformations spécifiées R_i sont résumées dans le Tableau A.1. Les incertitudes types de ces résultats montrent que la

disqualification des données au-delà de $\Delta = 0,3$ diminue au moins d'un facteur 2 les incertitudes types.

La dispersion des données expérimentales obtenues par l'essai interlaboratoire concerne les deux contributions intra-laboratoire et interlaboratoire. Pour clarifier le fait que les données soumises par leurs laboratoires respectifs appartiennent à la même population de toutes les données expérimentales, l'analyse de variance (essai F) a été effectuée en se guidant par le texte (GUM H.5.2.1, Voir le 1 de l'Article B.5). Comme exemple type, les données expérimentales sur E_0 ont été analysées et les résultats sont énumérés dans le Tableau A.2. Pour effectuer une comparaison exacte entre laboratoires, il est nécessaire de déterminer le même nombre de données pour chaque laboratoire, par exemple 3. Ainsi, trois données ont été choisies au hasard depuis chaque laboratoire lorsque le nombre de données était supérieur ou égal à 3, mais dans le cas où le nombre de données était inférieur à 3, le jeu de données du laboratoire a été ignoré.

Selon les directives du GUM, le rapport entre la variance interlaboratoire (s_a^2) et la variance intra-laboratoire (s_b^2) a été calculé par $F_{\text{exp}} = s_a^2 / s_b^2$ et comparé à la fonction théorique, $F_{0,99}$. Dans le cas où l'hypothèse $F_{\text{exp}} < F_{0,99}$ est vérifiée, la majeure partie de la dispersion provient des estimations intra-laboratoire.

Pour rendre la contribution quantitativement claire, soit interlaboratoire soit intra-laboratoire, le jeu de données symétriques est exigé. Le jeu de données est donc énuméré dans le Tableau A.3. En utilisant les données symétriques 3×5 , un essai F a été effectué pour E_0 du fil échantillon nu E. En utilisant le jeu de données énumérées dans le Tableau A.3, la distribution F a été calculée par $F_{\text{exp}} = 18$, tandis que la fonction théorique $F_{0,99}(\nu_a, \nu_b)$ pour $\nu_a = 4$ et $\nu_b = 10$ est donnée par 6,0. Le résultat de $F_{\text{exp}} > F_{0,99}$ indique que l'estimation interlaboratoire est plus grande que l'estimation intra-laboratoire.

Les résultats de l'essai F pour E_0 de quatre types de fils de Bi-2223 utilisés dans l'essai interlaboratoire effectué par 8 laboratoires de recherche différents sont résumés dans le Tableau A.1. Il est clair d'après le Tableau A.3 que la majeure partie de la dispersion provient de l'estimation interlaboratoire. Pour supprimer la grande incertitude type, le résultat de la vérification des conditions expérimentales détaillées a été rapporté ⁵⁾. Bien qu'aucune indication n'ait pu être clarifiée dans la présente analyse, les présents résultats suggèrent une modification possible de la réglementation du mode opératoire d'essai dans l'avenir.

Tableau A.1 – Résultats des valeurs d'incertitude type relative obtenus sur différents fils d'Ag/Bi-2223 lors des essais interlaboratoires internationaux

(a) Échantillon nu E									
Propriété	Dimension	Toutes les données				Données qualifiées			
		N	<x>	COV (%)	U_{RSU} (%)	N'	<x'>	COV (%)	U_{RSU} (%)
E_0	GPa	20	83,7	27,0	6,0	18	76,7	7,5	1,7
E_U	GPa	20	79,1	6,2	1,3	18	78,9	6,5	1,5
$R_{0,05}$	MPa	20	38,5	9,9	2,2	18	37,5	6,6	1,5
$R_{0,1}$	MPa	20	69,3	6,1	1,3	18	68,5	5,2	1,2
$R_{0,15}$	MPa	20	95,3	5,7	1,2	18	94,1	5,4	1,2
$R_{0,2}$	MPa	19	117,8	4,9	1,1	17	117,2	4,9	1,2
$R_{0,25}$	MPa	16	133,7	5,0	1,2	15	133,6	5,2	1,3
$R_{p0,2}$	MPa	-	-	-	-	-	-	-	-
R_f	MPa	20	133,6	6,4	1,4	18	133,2	6,7	1,5

N: nombre total de fils soumis à essai, N': nombre de fils qualifiés, X: module d'élasticité ou charge d'épreuve, <x>: moyenne pour tous les fils, <x'>: moyenne pour les fils qualifiés, CV: coefficient de variation (%), et U_{RSU} : incertitude type relative (%)

(b) Echantillon nu S									
Propriété	Dimension	N	<x>	COV (%)	U _{RSU} (%)				
E ₀	GPa	16	87,7	7,8	1,9				
E _U	GPa	16	90,0	6,8	1,7				
R _{0,05}	MPa	16	42,4	7,1	1,7				
R _{0,1}	MPa	16	78,8	7,8	1,9				
R _{0,15}	MPa	16	110,2	5,7	1,4				
R _{0,2}	MPa	16	137,0	5,3	1,3				
R _{0,25}	MPa	15	159,5	5,3	1,3				
R _{p0,2}	MPa	-	-	-	-				
R _f	MPa	16	164,4	5,4	1,3				
(c) Echantillon de laiton S 3 couches									
Propriété	Dimension	N	<x>	COV (%)	U _{RSU} (%)				
E ₀	GPa	15	97,9	7,5	1,9				
E _U	GPa	15	95,1	6,4	1,6				
R _{0,05}	MPa	15	48,5	10,4	2,7				
R _{0,1}	MPa	15	91,5	5,8	1,5				
R _{0,15}	MPa	15	132,9	4,6	1,1				
R _{0,2}	MPa	15	171,0	4,1	1,0				
R _{0,25}	MPa	15	206,4	3,8	1,0				
R _{p0,2}	MPa	9	273,5	4,2	1,4				
R _f	MPa	12	264,4	4,5	1,3				
(d) Echantillon S SUS 3 couches									
Propriété	Dimension	Toutes les données				Données qualifiées			
		N	<x>	COV (%)	U _{RSU} (%)	N'	<x'>	COV (%)	U _{RSU} (%)
E ₀	GPa	16	115,2	25,8	6,4	14	105,3	12,2	3,2
E _U	GPa	16	106,6	8,2	2,0	14	104,7	7,0	1,8
R _{0,05}	MPa	16	54,4	18,0	4,5	14	51,3	10,4	2,7
R _{0,1}	MPa	16	99,6	9,8	2,4	14	96,7	6,3	1,6
R _{0,15}	MPa	16	141,4	7,6	1,9	14	138,4	5,3	1,4
R _{0,2}	MPa	16	179,3	5,6	1,4	14	176,6	4,2	1,1
R _{0,25}	MPa	16	215,5	4,0	1,0	14	213,8	3,7	1,0
R _{p0,2}	MPa	12	291,4	5,6	1,6	10	296,1	4,5	1,4
R _f	MPa	13	321,6	4,6	1,2	11	325,4	3,9	1,1

En conséquence, la valeur moyenne de l'incertitude type relative (U_{RSU}) pour tous les échantillons est donnée par l'équation suivante

$$\overline{U_{RSU}} = \frac{\sum_{m=1}^{m=M} N'_m U_{RSUm}}{\sum_{m=1}^{m=M} N'_m} \quad (A6)$$

Où M indique le nombre de fils différents et le nombre moyen d'échantillons est donné,

$$\bar{N}' = \frac{\sum_{m=1}^{m=M} N'_m}{M} \quad (A7)$$

U_{rsu} a ensuite été calculée d'après le Tableau A.1 à 2,1 % pour E_0 pour $N' = 16$ en tant que valeur moyenne pour tous les échantillons après le contrôle de qualification. En utilisant le même mode opératoire, U_{RSU} a été évaluée pour E_u , R_i et $R_{p0.20}$ et leurs résultats sont présentés à l'Article 9 du texte principal.

Tableau A.2 – Données sélectionnées pour l'essai F pour E_0 de l'échantillon E de fil nu

	P1	P2	P3	P5	P6
E_{oj1}	77,8	71,4	72	73	82,0
E_{oj2}	76,9	74,2	72	73	89,2
E_{oj3}	78,2	74,2	77	71	89,2

Tableau A.3 – Résultats de l'essai F pour les variations de E_0 de quatre types de fils de Bi-2223

Echantillon	F_{exp}		$F_{0,99}$	Principales sources de dispersion
E nu	18	>	6,0	Entre laboratoires
S nu	2,8	<	7,6	Dans les laboratoires
Cuivre S 3 couches	20	>	6,0	Entre laboratoires
S SUS 3 couches	4,9	<	8,0	Dans les laboratoires

A.12 Détermination du module d'élasticité E_0

La détermination du module d'élasticité E_0 nécessite un système d'acquisition de données permettant une faible incertitude type relative pour un régime de décalage nul de l'enregistrement contrainte-déformation. Pour s'assurer que les données ne sont pas biaisées, il convient d'évaluer les données enregistrées de contrainte et de déformation conformément au mode opératoire d'essai normalisé suivant:

- Introduire les données numériques de contrainte-déformation de l'enregistrement dans deux colonnes d'une feuille de calcul standard d'un tableur (par exemple, MS Excel). L'enregistrement de déformation est ici introduit dans la première colonne et les données de contrainte dans la deuxième colonne.
- Lisser les données en utilisant une procédure de moyenne glissante à dix termes si la dispersion est importante.
- Dans une troisième colonne, copier les données de contrainte jusqu'à une valeur d'au moins 100 MPa.
- Dessiner un diagramme contrainte-déformation en utilisant les enregistrements de la première et de la troisième colonne jusqu'à 20 MPa.
- Déterminer la ligne de régression polynômiale du deuxième ordre et le carré du coefficient de régression en utilisant l'enregistrement.
- Répéter les deux étapes ci-dessus en augmentant le pas de la plage de contraintes. Tracer le terme du premier ordre et le carré du coefficient de régression en fonction du maximum de la plage de contraintes. En augmentant la plage de contraintes, il convient que le carré du coefficient de régression s'approche de l'unité (>0,999) et il convient que les termes du premier ordre convergent à une valeur unique prise comme E_0 .

- Si le mode opératoire ci-dessus ne converge pas, un mode opératoire modifié ou un autre mode opératoire est utilisé.

A.13 Evaluation de la fiabilité du matériel d'essai

La fiabilité du matériel d'essai, comprenant l'unité d'essai de traction, le dynamomètre et le système d'extensomètre utilisé, peut être mieux analysée avec des fils de dimensions similaires et de propriétés élastiques connues. Des fils de soudage en aluminium et en titane pur du commerce d'environ 1 mm de diamètre ont été approuvés comme étant les fils les plus appropriés couvrant la plage de modules d'élasticité comprise entre 70 GPa et 100 GPa. Il est fortement recommandé que le laboratoire d'essai confirme de temps en temps la fiabilité de son montage de contrainte en mesurant les propriétés élastiques de ces fils avant toute tâche de mesure. On peut facilement acheter ces fils auprès de fournisseurs. Pour ces essais, il convient de manipuler les fils de la même manière que décrit dans le cas des fils supraconducteurs traités à la chaleur. Les fils peuvent être chargés et déchargés en régime élastique jusqu'à 100 MPa sans influencer sur leurs propriétés élastiques.

A.14 Documents de référence de l'Annexe A

- [1] A. NYILAS. Strain sensing systems tailored for tensile measurement of fragile wires. *Supercond. Sci. Technol.*, (2005), 18, 409-415.
- [2] K. KATAGIRI, K. KASABA, M. HOJO, K. OSAMURA, M. SUGANO, A. KIMURA and T. OGATA. Tensile testing method of Cu/Nb₃Sn superconducting wires at room temperature. *Physica C*, 2001, 357-360, 1302-1305.
- [3] K. OSAMURA, A. NYILAS, M. THOENER, B. SEEGER, R. FLUEKIGER, Y. ILYIN, A. NIJHUIS, J. EKIN, C. CLICKNER, R. P. WALSH, V. TOPLOSKY, H. SHIN, K. KATAGIRI, S. OCHIAI, M. HOJO, Y. KUBO and K. MIYASHITA. International round robin test for mechanical properties of Nb₃Sn superconductive wires at room temperature. *Supercond. Sci. Technol.*, 2008, 21, 045006.
- [4] K. OSAMURA, K. P. WEISS, H. S. SHIN, K. KATAGIRI, S. OCHIAI, M. HOJO, M. SUGANO and K. OSHAWA. International round robin test for mechanical properties of BSCCO-2223 superconductive tapes at room temperature. *Cryogenics*, 2011, 51, 21-26.
- [5] K. OSAMURA, A. NYILAS, H. S. SHIN. Estimation of uncertainty with the modulus of elasticity measured by means of tensile test for BSCCO tapes. *Cryogenics*, 2010, 50, 660-665.