

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Superconductivity –

Part 25: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test on REBCO wires

Supraconductivité –

Partie 25: Mesure des propriétés mécaniques – Essai de traction à température ambiante des fils REBCO

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.050; 77.040.10

ISBN 978-2-8322-5988-7

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
4 Principle	10
5 Apparatus.....	10
5.1 General.....	10
5.2 Testing machine	10
5.3 Extensometer.....	10
6 Specimen preparation.....	10
6.1 General.....	10
6.2 Length of specimen.....	10
6.3 Determination of cross-sectional area (S_0).....	11
7 Testing conditions	11
7.1 Specimen gripping	11
7.2 Setting of extensometer	11
7.3 Testing speed	11
7.4 Test	11
8 Calculation of results	11
8.1 Modulus of elasticity (E).....	11
8.2 0,2 % proof strength ($R_{p0,2-0}$ and $R_{p0,2-U}$).....	12
9 Uncertainty of measurement.....	12
10 Test report.....	13
10.1 Specimen.....	13
10.2 Results	13
Annex A (informative) Additional information relating to Clauses 1 to 10	14
A.1 General.....	14
A.2 Extensometer.....	14
A.2.1 Double extensometer.....	14
A.2.2 Single extensometer	16
A.3 Elastic limit	16
A.4 Gripping force	17
A.5 Percentage elongation after fracture (A_f).....	17
A.6 Condition of straining to fracture	17
A.7 Relative standard uncertainty (RSU)	17
A.8 Discretion applying this document.....	19
A.9 Assessment on the reliability of the test equipment.....	19
A.10 Additional information for test report	19
A.10.1 General	19
A.10.2 Test result	19
A.10.3 Test conditions	19
Annex B (informative) Evaluation of combined standard uncertainty for the modulus of elasticity	20
B.1 Model equation	20
B.2 Estimation of standard uncertainty	21

B.2.1	Precondition	21
B.2.2	Stress measurement.....	21
B.2.3	Size measurement.....	22
B.2.4	Strain measurement	23
B.2.5	Uncertainties on measurement of gauge length	24
B.3	Significant experimental factor	25
B.3.1	Initial strain rate [Osamura et al., 2014]	25
B.3.2	Thickness measurement [Osamura et al., 2014]	26
Bibliography.....		27
Figure 1 – Typical stress–strain curve and definition of moduli of elasticity and 0,2 % proof strengths.....		9
Figure A.1 – Low-mass Siam twin type extensometer.....		14
Figure A.2 – Low-mass double extensometer.....		15
Figure A.3 – An example of the extensometer provided with balance weight and vertical specimen axis.....		16
Figure B.1 – Strain rate dependence of the relative standard uncertainty given by Formula (B.6).....		25
Figure B.2 – Relative standard uncertainty for the thickness measurement as a function of tape thickness.....		26
Table A.1 – Relative standard uncertainty (X_{RSU}) and coefficient of variance ($X_{<COV>}$) for experimental data of E_0 and E_U		17
Table A.2 – Relative standard uncertainty and coefficient of variance for experimental data of $R_{p0,2-0}$ and $R_{p0,2-U}$		18
Table A.3 – Value of $X_{<COV>}$ for the data of the modulus of elasticity and the 0,2 % proof strength tested according to this document		19
Table B.1 – Uncertainties for experimental variables in Formula (B.6).....		24
Table B.2 – Summary of standard uncertainty evaluation, where the initial strain rate and the thickness were used as 3×10^{-4} /s and 0,1 mm, respectively.....		25

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 25: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test on REBCO wires

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 61788-25 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

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

FDIS	Report on voting
90/404/FDIS	90/411/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 61788 series, published under the general title *Superconductivity*, can be found on the IEC website.

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

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

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

Several types of composite superconductors have now been commercialized. The rare-earth-based oxide superconductor (SC) with chemical formula $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ is used for practical SC wires, where the rare-earth element RE is typically Y, Dy, Gd, Nd, Ho or Sm, or a combination of two or more among them. This type of practical SC wire is usually called REBCO coated conductors. A typical architecture consists of a substrate of Ni-Cr-Mo based alloy, Ni-W alloy or stainless steel, a buffer layer consisting of a plurality of oxides, a SC layer and a protection layer of Ag. The substrate and buffer layer act as template to facilitate the well-oriented SC layer. In order to resist the large electromagnetic force, the wires are often externally reinforced by laminating thin stainless steel or Cu alloy foils. Commercial composite superconductors have a high current density and a small cross-sectional area. The major application of composite superconductors is to build electrical power devices and superconducting magnets. Complex stresses and strains are applied to the composite superconducting wires when devices are manufactured and energized. In the case of superconducting magnets, large electromagnetic forces are experienced by the windings due to the combination of high magnetic fields and high current density. It is therefore indispensable to determine the mechanical properties of the practical REBCO wires.

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 25: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test on REBCO wires

1 Scope

This part of IEC 61788 specifies the test method and procedures for testing tensile mechanical properties of REBCO superconductive composite tapes at room temperature. This test is used to measure the modulus of elasticity and 0,2 % proof strength. The values for elastic limit, fracture strength and percentage elongation after fracture serve only as a reference. This document applies to samples having a rectangular cross-section with an area of 0,12 mm² to 6,0 mm² (corresponding to the tapes with width of 2,0 mm to 12,0 mm and thickness of 0,06 mm to 0,5 mm).

2 Normative references

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

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

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

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	30
INTRODUCTION.....	32
1 Domaine d'application	33
2 Références normatives	33
3 Termes et définitions	33
4 Principe	36
5 Appareillage	36
5.1 Généralités	36
5.2 Machine d'essai	36
5.3 Extensomètre.....	36
6 Préparation de l'éprouvette.....	36
6.1 Généralités	36
6.2 Longueur de l'éprouvette	36
6.3 Détermination de la surface de section (S_0)	37
7 Conditions d'essai	37
7.1 Serrage de l'éprouvette.....	37
7.2 Mise en place de l'extensomètre	37
7.3 Vitesse d'essai.....	37
7.4 Essai	37
8 Calcul des résultats	37
8.1 Module d'élasticité (E).....	37
8.2 Charge d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2-0}$ et $R_{p0,2-U}$).....	38
9 Incertitude de mesure	39
10 Rapport d'essai	39
10.1 Eprouvette	39
10.2 Résultats	39
Annexe A (informative) Informations complémentaires relatives aux Articles 1 à 10	40
A.1 Généralités	40
A.2 Extensomètre.....	40
A.2.1 Extensomètre double	40
A.2.2 Extensomètre simple	42
A.3 Limite élastique.....	42
A.4 Force de serrage	43
A.5 Pourcentage d'allongement après rupture (A_f)	43
A.6 Condition de déformation jusqu'à la rupture	43
A.7 Incertitude type relative.....	43
A.8 Discretion applicable au présent document	45
A.9 Evaluation de la fiabilité du matériel d'essai.....	45
A.10 Informations complémentaires pour le rapport d'essai.....	46
A.10.1 Généralités	46
A.10.2 Résultat d'essai	46
A.10.3 Conditions d'essai	46
Annexe B (informative) Evaluation de l'incertitude type composée pour le module d'élasticité	47
B.1 Equation du modèle	47
B.2 Evaluation de l'incertitude type	48

B.2.1	Condition préalable.....	48
B.2.2	Mesure de la contrainte	48
B.2.3	Mesure de la taille	49
B.2.4	Mesure de la déformation	50
B.2.5	Incertitudes de mesure de longueur entre repères	50
B.3	Facteur expérimental significatif.....	52
B.3.1	Taux de déformation initial [Osamura et al., 2014]	52
B.3.2	Mesure de l'épaisseur [Osamura et al., 2014]	52
Bibliographie.....		54
Figure 1 – Courbe contrainte-déformation type et définition des modules d'élasticité et des charges d'épreuve à 0,2 %		35
Figure A.1 – Extensomètre de type jumeau de Siam à faible masse.....		40
Figure A.2 – Extensomètre double à faible masse.....		41
Figure A.3 – Exemple d'extensomètre muni d'une masse d'équilibrage et d'un axe d'éprouvette vertical		42
Figure B.1 – Dépendance du taux de déformation par rapport à l'incertitude type relative donnée par la Formule (B.6)		52
Figure B.2 – Incertitude type relative pour la mesure d'épaisseur en fonction de l'épaisseur de bande.....		53
Tableau A.1 – Incertitude type relative (X_{RSU}) et coefficient de variation ($X_{<COV>}$) pour les données expérimentales de E_0 et E_U		44
Tableau A.2 – Incertitude type relative et coefficient de variation pour les données expérimentales de $R_{p0,2-0}$ et $R_{p0,2-U}$		45
Tableau A.3 – Valeur du $X_{<COV>}$ pour les données du module d'élasticité et de la charge d'épreuve à 0,2 % soumises à essai selon le présent document.....		45
Tableau B.1 – Incertitudes concernant les variables expérimentales dans la Formule (B.6)		51
Tableau B.2 – Résumé de l'évaluation des incertitudes types, où le taux de déformation initial et l'épaisseur utilisés étaient respectivement 3×10^{-4} /s et 0,1 mm		51

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 25: Mesure des propriétés mécaniques – Essai de traction à température ambiante des fils REBCO

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 61788-25 a été établie par le comité d'études 90 de l'IEC: Supraconductivité.

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

FDIS	Rapport de vote
90/404/FDIS	90/411/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 internationale.

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

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

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

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

IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

Plusieurs types de supraconducteurs composites sont actuellement commercialisés. Le supraconducteur à base d'oxyde de terre rare de formule chimique $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ est utilisé pour les fils supraconducteurs à usage pratique, dans lesquels l'élément de terre rare RE est typiquement Y, Dy, Gd, Nd, Ho ou Sm, ou une combinaison de deux de ces éléments ou plus. Ce type de fil supraconducteur pratique est généralement désigné par le terme «conducteur REBCO». Son architecture typique comprend un substrat à base de Ni-Cr-Mo, Ni-W ou en acier inoxydable, une couche tampon composée d'une pluralité d'oxydes, une couche supraconductrice et une couche protectrice d'Ag. Le substrat et la couche tampon servent de base pour faciliter la bonne orientation de la couche supraconductrice. Afin de pouvoir résister à la force électromagnétique élevée, les fils sont souvent renforcés extérieurement par des feuilles minces stratifiées en acier inoxydable ou en alliage de cuivre. Les supraconducteurs composites vendus dans le commerce ont une forte densité de courant et une section réduite. La principale application des supraconducteurs composites est la construction de dispositifs d'alimentation électrique et d'aimants supraconducteurs. Des contraintes et déformations complexes sont appliquées aux fils supraconducteurs composites lors de la fabrication et de la mise sous tension des dispositifs. Dans le cas des aimants supraconducteurs, les enroulements sont soumis à des forces électromagnétiques importantes en raison des effets conjugués des champs magnétiques de forte intensité et d'une forte densité de courant. Il est donc indispensable de déterminer les propriétés mécaniques des conducteurs REBCO.

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 25: Mesure des propriétés mécaniques – Essai de traction à température ambiante des fils REBCO

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61788 spécifie la méthode et les procédures d'essai relatives aux propriétés mécaniques de traction des bandes composites supraconductrices REBCO à température ambiante. Cet essai est utilisé pour mesurer le module d'élasticité et la charge d'épreuve à 0,2 %. Les valeurs de la limite élastique, de la résistance à la rupture et du pourcentage d'allongement après rupture servent uniquement de référence. Le présent document s'applique aux échantillons ayant une section rectangulaire d'une surface comprise entre 0,12 mm² et 6,0 mm² (correspondant aux bandes de largeur comprise entre 2,0 mm et 12,0 mm et d'épaisseur comprise entre 0,06 mm et 0,5 mm).

2 Références normatives

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

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

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

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