
**Soudage — Micro-assemblage
des supraconducteurs à haute
température de 2ème génération —**

**Partie 1:
Exigences générales pour la procédure**

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)
*Welding — Micro joining of 2nd generation high temperature
superconductors —
Part 1: General requirements for the procedure*

[ISO 17279-1:2018](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed23901f-04c4-407d-ae7f-9a64da6e08e1/iso-17279-1-2018)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed23901f-04c4-407d-ae7f-9a64da6e08e1/iso-17279-1-2018>



iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 17279-1:2018

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed23901f-04c4-407d-ae7f-9a64da6e08e1/iso-17279-1-2018>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2018

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, 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, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8
CH-1214 Vernier, Genève
Tél.: +41 22 749 01 11
Fax: +41 22 749 09 47
E-mail: copyright@iso.org
Web: www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos.....	iv
Introduction.....	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Terms et définitions	1
4 Symboles et termes abrégés	2
5 Exigences	3
5.1 Conception de l'assemblage.....	3
5.1.1 Généralités.....	3
5.1.2 Assemblage à recouvrement.....	3
5.1.3 Assemblage en pont.....	3
5.2 Équipement.....	4
5.3 Qualification du mode opératoire de soudage.....	5
5.4 Procédé de micro-assemblage et de recuit d'oxygénation.....	5
5.4.1 Généralités.....	5
5.4.2 Contenu technique d'un DMOS-P et d'un DMOS.....	8
5.5 Qualification sur la base d'une éprouvette d'essai d'assemblage normalisée.....	9
5.5.1 Généralités.....	9
5.5.2 Éprouvettes d'essai.....	9
5.5.3 Mode opératoire de micro-assemblage et de recuit d'oxygénation des éprouvettes d'essai.....	10
5.5.4 Essais des éprouvettes.....	13
5.5.5 Contre-essais.....	17
5.5.6 Rapport d'essai.....	17
5.6 Domaine de validité.....	17
5.6.1 Généralités.....	17
5.6.2 Validité établie par le fabricant.....	17
5.6.3 Variables essentielles.....	17
5.6.4 Autres variables.....	18
5.7 Descriptif de mode opératoire de micro-assemblage et de recuit d'oxygénation et procès-verbal de qualification de mode opératoire.....	18
5.8 Traitement final des assemblages en phase de production.....	19
5.9 Critères d'acceptation.....	19
5.10 Identification et traçabilité.....	20
6 Vérifications tierces	21
Annexe A (informative) Mode opératoire de micro-assemblage et de recuit d'oxygénation	22
Annexe B (informative) Descriptif de mode opératoire de soudage préliminaire (DMOS-P)	26
Annexe C (informative) Qualification du mode opératoire de micro-assemblage et de recuit d'oxygénation et procès-verbal de qualification du mode opératoire de soudage (PV-QMOS)	29
Annexe D (informative) Descriptif de mode opératoire de soudage (DMOS)	35
Annexe E (informative) Liste de contrôles pour la qualification du mode opératoire de micro-assemblage et de recuit d'oxygénation	38
Bibliographie	42

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir www.iso.org/brevets).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir le lien suivant: www.iso.org/iso/fr/avant-propos.html.

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 44, *Soudage et techniques connexes*, sous-comité SC 10, *Gestion de la qualité dans le domaine du soudage*.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse www.iso.org/fr/members.html.

Une liste de toutes les parties de la série ISO 17279 se trouve sur le site Web de l'ISO.

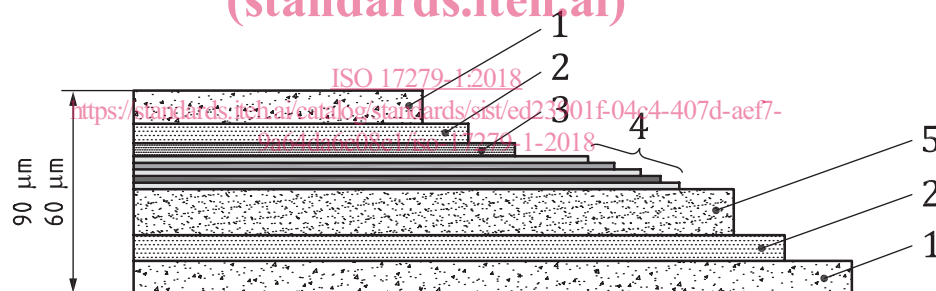
Introduction

L'utilisation croissante de supraconducteurs à haute température critique de deuxième génération (2G HTS) et l'invention d'assemblages sans résistance sur les 2G HTS ont créé le besoin du présent document afin de garantir que l'assemblage est réalisé de la manière la plus efficace possible et que tous les aspects de l'opération sont correctement contrôlés. Les normes ISO relatives aux modes opératoires de micro-assemblage et d'évaluation des assemblages sont par conséquent essentielles pour obtenir un assemblage 2G HTS de qualité excellente et uniforme.

La technique utilisée dans ce document concernant le micro-assemblage sans résistance fait l'objet d'un brevet enregistré et a été signalée à patent.statements@iso.org à l'aide du "formulaire Formulaire de déclaration de détention de Brevets et d'octroi de licences"

Le supraconducteur est un matériau qui conduit l'électricité sans résistance et qui se caractérise par un diamagnétisme en dessous de la température critique (T_c), du champ magnétique critique (B_c) et de la densité de courant critique (J_c). Une fois déclenché, le courant électrique circule à l'infini en boucle fermée dans le matériau supraconducteur en phase diamagnétique.

Le 2G HTS est constitué de plusieurs couches dont l'épaisseur totale se situe entre 60 μm et 100 μm avec ou sans stabilisant en cuivre enveloppant et la couche supraconductrice, en $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, (ReBCO, terme abrégé de $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$) ne fait qu'entre 1 μm et 2 μm d'épaisseur selon les spécifications du fabricant. Re désigne les matériaux terrestres rares dont le gadolinium, l'yttrium et le samarium qui sont utilisés pour les matériaux supraconducteurs à haute température de deuxième génération. La [Figure 1](#) montre un schéma des multiples couches avec stabilisant en cuivre enveloppe typiquement présentes dans un 2G HTS, ainsi que les constituants et l'épaisseur de chaque couche. Les deux couches de la légende 1 de la [Figure 1](#) n'existent pas dans le HTS 2G sans stabilisant.



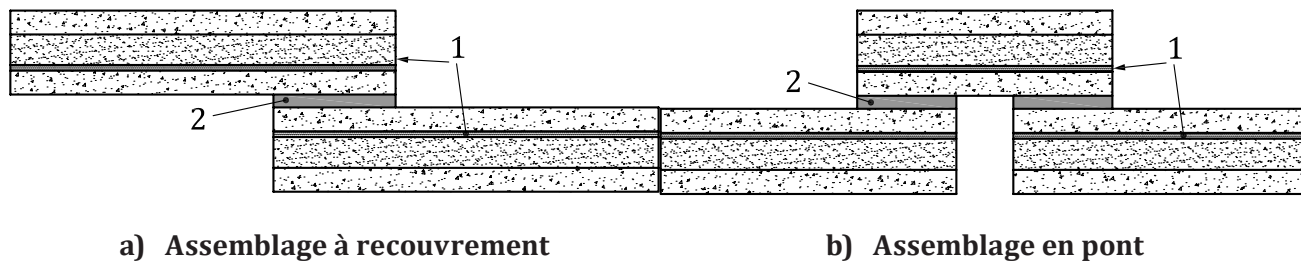
Légende

- | | | | |
|---|--|---|---|
| 1 | stabilisant en cuivre (Cu) de 20 μm | 4 | 5 couches tampon (total 160 nm) |
| 2 | couche protectrice en argent (Ag) de 2 μm | 5 | substrat en Hastelloy de 50 μm |
| 3 | couche supraconductrice ReBCO entre 1 μm et 2 μm | | |

NOTE Schéma non à l'échelle

Figure 1 — Multiples couches typiques d'un 2G HTS, constituants et épaisseur de chaque couche

Pour l'heure, l'industrie des supraconducteurs recourt aux techniques de brasage fort ou tendre, ainsi qu'à tout procédé d'apport de métal comme l'indique la [Figure 2](#), qui montre la haute résistance électrique au niveau de l'assemblage, source de défaillance fatale dans le supraconducteur.

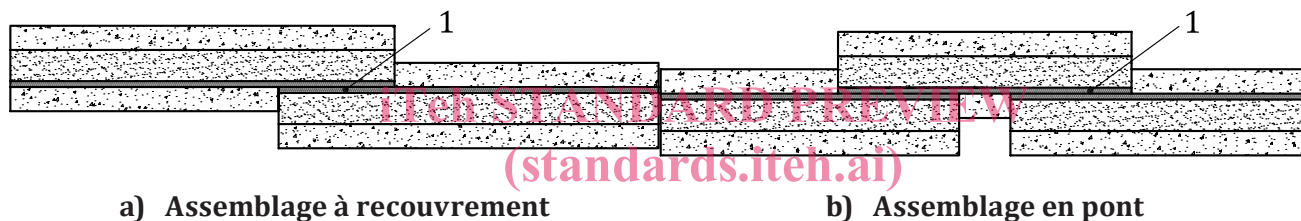


Légende

- 1 couche supraconductrice
- 2 produit d'apport de brasage tendre

Figure 2 — Brasage d'assemblage d'un 2G HTS

Néanmoins, le présent document s'intéresse plus particulièrement à l'assemblage autogène direct des couches supraconductrices de 1 µm à 2 µm d'épaisseur des 2G HTS, comme l'indique la [Figure 3](#), sans métal d'apport et avec récupération des propriétés supraconductrices par procédé de recuit d'oxygénation, qui montre quasiment aucune résistance électrique au niveau de l'assemblage.



Légende

- 1 couche supraconductrice

ISO 17279-1:2018
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed23901f-04c4-407d-ae7f-9a64da6e08e1/iso-17279-1-2018>

Figure 3 — Assemblage autogène direct de deux couches supraconductrices d'épaisseur des 2G HTS pour l'assemblage supraconducteur

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) attire l'attention sur le fait qu'il est déclaré que la conformité avec le présent document peut impliquer l'utilisation de brevets concernant l'assemblage sans résistance des 2G HTS. L'ISO ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à la portée de ces droits de propriété. Les détenteurs de ces droits de propriété ont donné l'assurance à l'ISO qu'ils consentent à négocier des licences avec des demandeurs du monde entier, selon des termes et conditions raisonnables et non discriminatoires. À ce propos, la déclaration des détenteurs des droits de propriété est enregistrée à l'ISO. Des informations peuvent être demandées à:

KJoins, Inc.
913C, H-1, KIST Venture Town
Korea Institute of Science and Technology
14-1 Hwarang ro, Seongbuk gu
SEOUL 136-791
REP. OF KOREA

Tel.: +82 2 921 6966

Contact: Dr HeeSung ANN
E-mail: andy@kjoins.com

Contact: Dr YoungKun OH
Email: ykoh@kjoins.com

Contact: Dr MyungWhon LEE
E-mail: mwlee@kjoins.com

Dae-A International IP & Law Firm
3F Hanyang B/D
830-71 Yeoksam dong, Gangnam gu
SEOUL 135-936
REP. OF KOREA

Tel.: +82 2 565 2500

Fax: +82 2 565 2511

Contact: Patent Attorney Mr. BoHyun KIM
E-mail: bohkim@ipdraju.com

L'attention est appelée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété autres que ceux qui ont été mentionnés ci-dessus. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de l'identification de ces droits de propriété en tout ou partie.

iTeh STANDARD PREVIEW (standards.iteh.ai)

[ISO 17279-1:2018](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed23901f-04c4-407d-ae7f-9a64da6e08e1/iso-17279-1-2018)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed23901f-04c4-407d-ae7f-9a64da6e08e1/iso-17279-1-2018>

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 17279-1:2018

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed23901f-04c4-407d-ae7f-9a64da6e08e1/iso-17279-1-2018>

Soudage — Micro-assemblage des supraconducteurs à haute température de 2ème génération —

Partie 1: Exigences générales pour la procédure

1 Domaine d'application

Le présent document fournit les concepts, le descriptif et la qualification d'un mode opératoire d'assemblage des supraconducteurs à haute température de deuxième génération (2G HTS). Un descriptif de mode opératoire de soudage (DMOS) est requis afin de servir de base à la planification des opérations d'assemblage et aux contrôles qualité pendant l'assemblage. L'assemblage est traité comme un procédé à part dans la terminologie des normes relatives aux systèmes qualité. Les normes de systèmes qualité exigent généralement d'exécuter les procédés spéciaux conformément à des descriptifs de mode opératoire écrits. Il est donc nécessaire d'établir un ensemble de règles de qualification de mode opératoire d'assemblage avant toute publication de DMOS en production réelle. Le présent document définit ces règles.

Le présent document ne concerne pas les procédés de brasage fort ou tendre ou d'apport de matériaux existant à ce jour dans l'industrie. Le présent document peut s'appliquer aux assemblages de toutes sortes de supraconducteurs à haute température de deuxième génération (2G HTS).

Le présent document ne s'applique pas aux assemblages de supraconducteurs à haute température (HTS) à base d'oxydes de bismuth, de strontium, de calcium et de cuivre de première génération (1G BSCCO) ni aux assemblages de supraconducteurs à basse température (LTS).

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 15607:2003, *Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques — Règles générales*

ISO 17279-2, *Soudage — Micro-assemblages des supraconducteurs à haute température de deuxième génération — Partie 2: Qualification pour le personnel de soudage et d'essais*

ISO/TR 25901 (toutes les parties), *Soudage et techniques connexes — Vocabulaire*

3 Terms et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO/TR 25901 ainsi que les suivants s'appliquent.

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

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

3.1
supraconducteur à haute température
HTS

matériau supraconducteur dont la température critique est supérieure au point d'ébullition de l'azote liquide

3.2
supraconducteur à basse température
LTS

matériau supraconducteur dont la température critique est inférieure au point d'ébullition de l'azote liquide

3.3
supraconducteur à haute température de deuxième génération
2G HTS

matériau supraconducteur dont la température critique est supérieure au point d'ébullition de l'azote liquide, composé d'éléments de terres rares comme le baryum, le cuivre et leurs oxydes

Note 1 à l'article: un supraconducteur à haute température de première génération (1G HTS) est matériau supraconducteur dont la température critique est supérieure au point d'ébullition de l'azote liquide, composé d'oxydes de bismuth, de strontium, de calcium et de cuivre

3.4
diffusion par micro-fusion partielle avec pression

micro-fusion partielle de deux surfaces de contact de couches supraconductrices de 1 µm à 3 µm d'épaisseur et diffusion d'atomes dans un bain en micro-fusion partielle et à l'état solide des couches supraconductrices par force sous pression

3.5
recuit d'oxygénation

procédé qui consiste à restaurer la stoechiométrie de l'oxygène dans un environnement riche en oxygène et à récupérer les propriétés supraconductrices

Note 1 à l'article: la structure et les propriétés supraconductrices d'un 2G HTS sont fortement affectées par la stoechiométrie de l'oxygène. L'assemblage d'un 2G HTS à haute température implique une libération d'oxygène qui entraîne la transition de la phase orthorhombique supraconductrice à une phase tétragonale non supraconductrice. Le recuit d'oxygénation désigne

3.6
diffusion à l'état solide avec pression

diffusion d'atomes à l'état solide de deux surfaces de contact de couches supraconductrices de 1 µm à 3 µm d'épaisseur par force sous pression

3.7
assemblage en pont

assemblage avec une troisième partie de 2G HTS recouvrant comme un pont parties de 2G HTS

Note 1 à l'article: Voir [Figure 3](#) et [Figure 5](#).

4 Symboles et termes abrégés

Pour les besoins du présent document, les abréviations répertoriées dans l'ISO 15607:2003, Tableau 1, pertinentes pour la procédure d'assemblage du 2G HTS doivent s'appliquer.

5 Exigences

5.1 Conception de l'assemblage

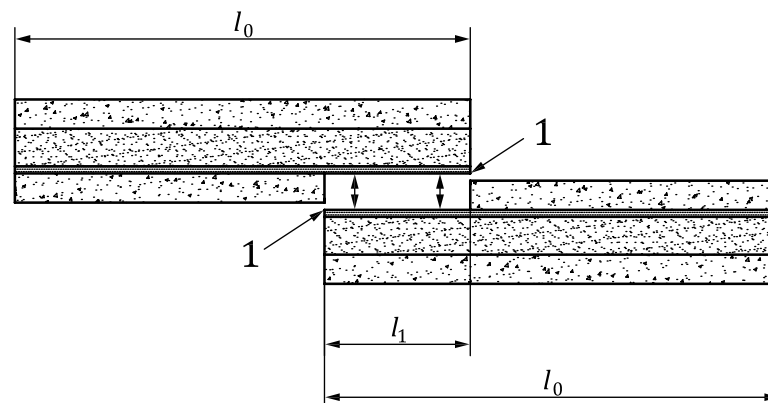
5.1.1 Généralités

L'assemblage doit être conçu conformément aux exigences définies nécessaires pour l'utilisation finale du produit. La documentation doit définir de manière claire les informations essentielles relatives à l'assemblage, ainsi que toute exigence particulière, par exemple, informations critiques en termes de rupture, de durabilité, de mission ou de sécurité, qui sont imposées en sus et au-delà des exigences générales. Des contrôles de procédés essentiels doivent être définis afin d'apporter la preuve que toutes les exigences de conception peuvent être satisfaites par des assemblages produits conformément au descriptif du mode opératoire de soudage (DMOS) et aux exigences d'essais et d'inspection.

La conception de l'assemblage doit tenir compte des données nécessaires portant sur les propriétés du matériau. On distingue en principe deux types d'alignements d'assemblage (à recouvrement et en pont). Il est possible de sélectionner l'alignement le plus approprié à la convenance de l'utilisateur. Ces deux types d'alignement pour l'assemblage d'un 2G HTS sont indiqués à la [Figure 3](#).

5.1.2 Assemblage à recouvrement

La [Figure 4](#) est un schéma d'assemblage à recouvrement pour la qualification du mode opératoire de soudage décrite en [5.3](#). Il convient de spécifier toutes les longueurs, l_0 , et l_1 dans le procès-verbal de qualification du mode opératoire (PV-QMO). Plus la longueur de l'assemblage, l_1 augmente, plus les zones de surface de contact effectif entre deux couches supraconductrices s'agrandissent, plus les probabilités d'inter-diffusion d'atomes entre les deux couches de l'assemblage se multiplient et, par conséquent, plus la résistance de l'assemblage (à la traction et au pliage) augmente. Les couches stabilisant en Cu, s'il y en a, et les couches protectrices en Ag au-dessus des couches supraconductrices doivent être retirées avec soin pour permettre le contact direct des deux couches supraconductrices et le micro-assemblage. Ce procédé vise à prévenir toute contamination des couches supraconductrices lors du micro-assemblage.



Légende

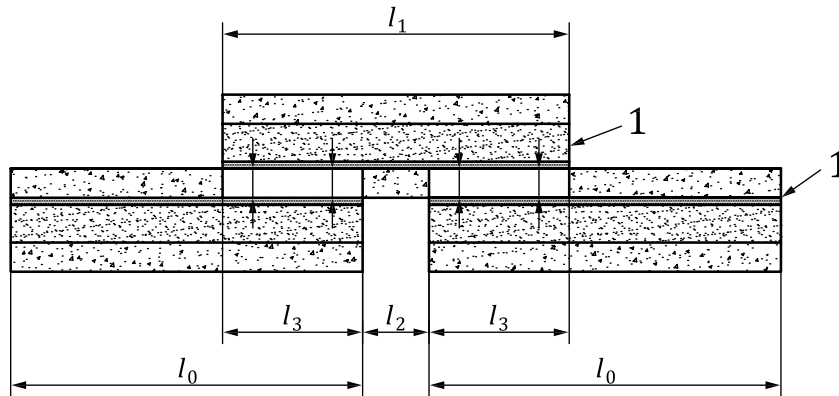
- 1 couche supraconductrice
- l_0 60 mm; longueur des deux parties
- l_1 40 mm; recouvrement (longueur de l'assemblage)

Figure 4 — Assemblage à recouvrement

5.1.3 Assemblage en pont

La [Figure 5](#) illustre un assemblage conçu pour la qualification du mode opératoire de soudage décrit en [5.3](#). La distance, l_2 entre les deux parties du 2G HTS à la [Figure 5](#) peut varier de «0» à plus de 10 cm

selon la conception de l'assemblage. Il convient que les longueurs de l_0 à la Figure 5 soient identiques. Il convient de spécifier toutes les longueurs, l_0 , l_1 , l_2 , et l_3 dans le procès-verbal de qualification du mode opératoire (PV-QMO). Plus les longueurs de l'assemblage, l_3 augmentent, plus les zones de surface de contact effectif entre deux couches supraconductrices s'agrandissent, plus les probabilités d'interdiffusion d'atomes entre les deux couches de l'assemblage se multiplient et, par conséquent, plus la résistance de l'assemblage (à la traction et au pliage) et la supraconductivité augmentent. Les couches de stabilisant en Cu, s'il y en a, et les couches protectrices en Ag au-dessus des couches supraconductrices doivent être retirées avec soin pour permettre le contact direct des deux couches supraconductrices et l'assemblage. Ce procédé vise à prévenir toute contamination des couches supraconductrices lors de l'assemblage.



Légende

1 couche supraconductrice

l_0 50 mm; longueur des deux parties en bas

l_1 40 mm à 50 mm; longueur de la partie en pont

l_2 0 mm à 10 mm; distance entre les parties à assembler

l_3 20 mm; chevauchement (longueur de l'assemblage)

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)
17279-1:2018
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed23901f-04c4-407d-ae7f-9a64da6e08e1/iso-17279-1-2018>

Figure 5 — Assemblage en pont

5.2 Équipement

L'équipement doit être adapté à l'application concernée. L'équipement d'assemblage doit être capable de produire des assemblages conformes aux critères d'acceptation spécifiés en 5.9. L'équipement d'assemblage doit être maintenu en bon état et doit être réparé ou réglé dès lors qu'un opérateur soudeur, un contrôleur ou un coordinateur d'assemblage est préoccupé par la capacité de l'équipement à fonctionner de manière satisfaisante.

Après installation d'un nouvel équipement ou d'un équipement remis à neuf ou après le développement d'un nouvel équipement, cet équipement doit être soumis à des essais appropriés. Ces essais doivent permettre de contrôler que l'équipement fonctionne correctement.

Il faut procéder à des essais de reproductibilité afin de démontrer que l'équipement d'assemblage peut produire de façon répétée des assemblages conformes aux niveaux d'acceptation spécifiés en 5.9. Ces essais de reproductibilité doivent être réalisés conformément au DMOS mis en œuvre lors de la production de la machine considérée. Au moins trois assemblages d'essai doivent être fabriqués et passer avec succès les essais. Les essais de reproductibilité doivent être réalisés dès lors que l'un des événements suivants se produit:

- Un ou plusieurs composants critiques de l'équipement sont endommagés, ont été réparés ou remplacés;
- L'équipement est délogé ou déplacé d'une manière non conforme à l'usage prévu;

— L'équipement fixe est déplacé d'un site à un autre.

Le fabricant doit avoir un plan documenté pour l'entretien planifié de l'équipement. Ce plan doit garantir que des contrôles d'entretien sont réalisés sur l'équipement qui commande les variables énumérées dans le DMOS applicable. L'entretien planifié peut être limité aux éléments critiques pour la production d'assemblages conformes aux exigences de qualité du présent document.

Les outils d'assemblage, le cas échéant, utilisés en production doivent porter un marquage permanent en vue de leur identification préalable à l'emploi. Avant de procéder à l'assemblage, les outils d'assemblage, le cas échéant, doivent être nettoyés et suffisamment exempts de contaminants (par exemple, huile, graisse ou poussière) qui pourraient être préjudiciables à la qualité de l'assemblage. Il est essentiel que l'outil présente une géométrie correcte pour produire un assemblage de qualité. Étant donné que les outils d'assemblage s'usent à l'emploi, ils doivent être contrôlés à cet effet à intervalles adéquats et conformément à une procédure écrite. Avant de procéder à l'assemblage, les pièces et composants en contact avec les parties de l'assemblage doivent être nettoyés et suffisamment exempts de contaminants (par exemple, huile, graisse ou poussière) qui pourraient être préjudiciables à l'assemblage.

Aucun équipement défectueux ne doit être utilisé.

NOTE Le dispositif d'assemblage et le dispositif de recuit d'oxygénation sont rarement disponibles dans le commerce. Il appartient exclusivement à chaque société ou organisation chargée d'exécuter l'assemblage de développer ces dispositifs, si des machines appropriées du commerce ne sont pas disponibles.

5.3 Qualification du mode opératoire de soudage

Le fabricant doit être pleinement responsable de la spécification et de la performance du micro-assemblage et du recuit d'oxygénation pour rétablir la supraconductivité que lui-même a déterminée. Le micro-assemblage et le recuit d'oxygénation doivent faire l'objet de consignations avant, pendant et après le processus.

Les informations ci-après doivent être spécifiées pour chaque assemblage dans le DMOS:

- a) spécification produit du fournisseur du 2G HTS;
- b) spécification du matériau de la couche supraconductrice;
- c) préparation de la surface préalablement à l'assemblage, y compris le retrait complet du stabilisant en Cu, le cas échéant, et de la couche protectrice en Ag;
- d) type d'assemblage (à recouvrement, en pont ou autre type d'assemblage si différent d'un assemblage à recouvrement ou en pont);
- e) cotes de l'éprouvette comprenant la longueur de l'assemblage (l_0 , l_1 , l_2 , l_3 des [Figures 4](#) ou [5](#));
- f) finition et configuration de l'assemblage définitif (toute armature destinée à renforcer la résistance de l'assemblage);
- g) cotes de l'assemblage; les cotes de l'assemblage figurant dans le descriptif du mode opératoire de soudage (DMOS) doivent correspondre aux cotes définitives.

Un modèle de DMOS est donné en [Annexe D](#).

5.4 Procédé de micro-assemblage et de recuit d'oxygénation

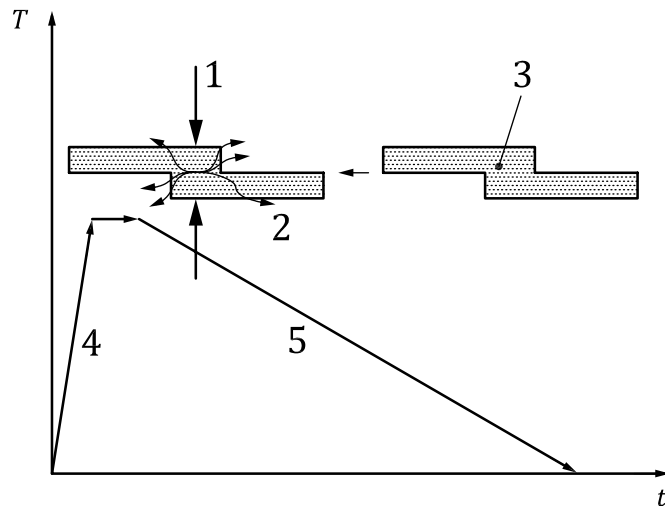
5.4.1 Généralités

Les exigences de descriptif du procédé de micro-assemblage et de recuit d'oxygénation pour un 2G HTS sont spécifiées. Les modes opératoires de micro-assemblage et de recuit d'oxygénation doivent être qualifiés préalablement à la production de l'assemblage. Le fabricant doit rédiger un procès-verbal de qualification du mode opératoire de soudage (PV-QMOS) et un descriptif du mode opératoire de soudage (DMOS) et s'assurer que ceux-ci sont applicables à la production, en s'appuyant sur l'expérience

issue des productions antérieures et sur l'ensemble des connaissances relatives à la technologie de l'assemblage.

La couche supraconductrice est fabriquée en ReBCO ($\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$) pour un rapport molaire Re:Ba:Cu de 1:2:3 et une fraction molaire ($7-x$) d'oxygène (O) généralement comprise entre 6,4 et 7. Dans un air ambiant à pression partielle en oxygène d'environ 21,5 kPa, il est rare d'obtenir un assemblage supraconducteur sans fusion de la couche protectrice en Ag qui protège la couche supraconductrice, étant donné que le point de fusion du ReBCO est supérieur à celui de l'Ag. Pour autant, il est possible d'obtenir un assemblage supraconducteur performant sans déformer la couche de ReBCO en réduisant la pression partielle en oxygène, ce qui permet d'abaisser le point de fusion du ReBCO. Il est par conséquent impératif de procéder à l'assemblage en conditions de vide. En revanche, l'assemblage à vide, contrôlé par la libération d'oxygène, peut dégrader les propriétés supraconductrices. La structure et les propriétés supraconductrices du ReBCO sont fortement affectées par la stœchiométrie de l'oxygène. Dans ces conditions, tout défaut d'oxygène entraîne la transition de la phase orthorhombique supraconductrice à une phase tétragonale non supraconductrice. Cette transition dépend de la température et de la pression partielle d'oxygène. Par ailleurs, la transition de phase dans une atmosphère contenant de l'oxygène est réversible en cas de changements de température. En revanche, elle devient irréversible en état de vide et résulte en une phase tétragonale qui reste stable après traitement thermique à hautes températures. Il est par conséquent important de développer une technique de recuit d'oxygénation à des températures élevées à peine en dessous de la température à laquelle se produit la transition de la phase orthorhombique supraconductrice vers la phase tétragonale non supraconductrice dans un environnement riche en oxygène afin de récupérer la stœchiométrie de l'oxygène et ainsi les propriétés supraconductrices au niveau de l'assemblage.

La [Figure 6](#) et la [Figure 7](#) illustrent les cycles du procédé de micro-assemblage et ceux du procédé de recuit d'oxygénation respectivement. Le micro-assemblage se réalise par contact direct de deux couches supraconductrices en un laps de temps extrêmement court (de l'ordre de quelques secondes ou minutes). En revanche, le recuit d'oxygénation dure des heures voire plusieurs jours selon la capacité du four (de la chambre), de l'environnement, de la pureté et de la concentration de l'oxygène, des types d'assemblage et de leur qualité. Le micro-assemblage et le recuit d'oxygénation peuvent être réalisés dans un dispositif distinct. Procéder à l'opération de recuit d'oxygénation à part offre l'avantage de recuire plusieurs éprouvettes en même temps selon la taille de la chambre. La [Figure 8](#) illustre la réalisation des procédés de micro-assemblage et de recuit d'oxygénation dans la même chambre en fonctionnement continu.

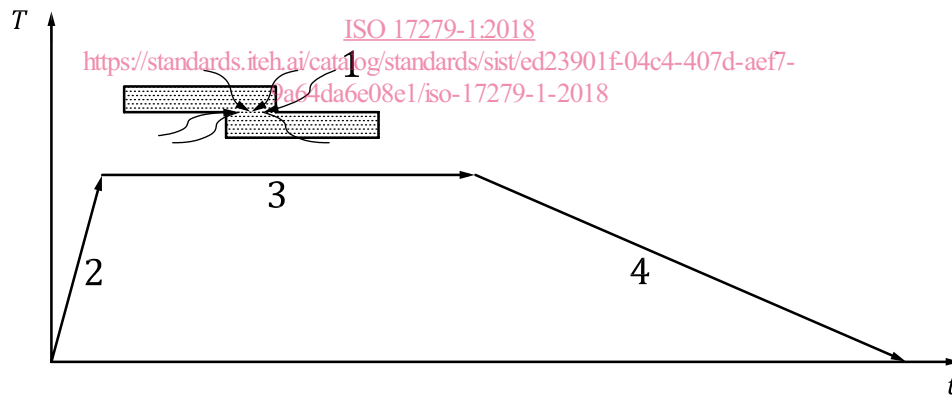


Légende

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1 application de chaleur et de pression sur les parties en recouvrement | 4 chauffage rapide |
| 2 libération d'oxygène de la couche supraconductrice | 5 refroidissement rapide à modéré |
| 3 retrait des couches de stabilisant et/ou de protection sur le dessus de la couche supraconductrice en recouvrement | |

NOTE Chaleur et pression à vide pendant l'assemblage.

Figure 6 — Cycle du procédé de micro-assemblage en chambre d'assemblage



Légende

- | | |
|---|------------------------|
| 1 diffusion d'oxygène dans la couche supraconductrice pendant le recuit d'oxygénation | 3 recuit d'oxygénation |
| 2 chauffage modéré | 4 refroidissement lent |

Figure 7 — Cycle du procédé de recuit d'oxygénation dans un environnement d'oxygène sous pression en chambre de recuit d'oxygénation