

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 80 23635

(54) Procédé de soudage de pièces par points, et assemblages de pièces soudées conformément audit procédé.

(51) Classification internationale (Int. Cl.³). **B 23 K 11/10, 11/32.**

(22) Date de dépôt 5 novembre 1980.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande B.O.P.I. — « Listes » n° 18 du 7-5-1982.

(71) Déposant : GOSUDARSTVENNY NAUCHNO-ISSLEDOVATELSKY ENERGETICHESKY INSTITUT
IMENI G. M. KRZHIZHANOVSKOGO, résidant en URSS.

(72) Invention de : David Semenovitch Vorona, Pavel Borisovitch Shenderovitch, Samuil Mordkovich
Gurevitch, Mikhail Minovitch Nerodenko, Efim Abramovitch Asnis et Stanislav Pavlovitch
Zabolotin.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Cabinet Z. Weinstein,
20, av. de Friedland, 75008 Paris.

La présente invention concerne les procédés de soudage et a notamment pour objet un procédé de soudage de pièces par points, en particulier de pièces dont au moins l'une est pourvue d'un revêtement supraconducteur intermétallique.

Le procédé de soudage revendiqué est utilisé essentiellement pour la fabrication d'articles dans lesquels on doit réaliser une connexion électrique de supraconducteurs intermétalliques stabilisés, par exemple en cas de soudage des parties conductrices de câbles supraconducteurs, ou bien lorsqu'il est nécessaire d'étanchéifier un supraconducteur stabilisé suivant son revêtement supraconducteur intermétallique pendant l'une des étapes technologiques de fabrication d'un brin tubulaire supraconducteur à plusieurs sections d'un câble supraconducteur rigide.

Dans la fabrication d'articles utilisant des supraconducteurs en tant qu'éléments porteurs de courant, se pose le problème de connexion électrique des différentes parties du supraconducteur sans diminution des propriétés supraconductrices de la connexion. Cette connexion doit avoir des propriétés supraconductrices identiques à celles de la couche supraconductrice des différentes parties du supraconducteur afin d'accroître la fiabilité des articles au cours de leur exploitation et d'améliorer leurs performances économiques.

En outre, par suite de l'utilisation sur une large échelle du phénomène de supraconductibilité dans différents domaines de la technique et de la grande variété d'articles dans lesquels sont utilisés les supraconducteurs, il est nécessaire, dans certains cas, de réaliser le contact entre éléments de construction à revêtement supraconducteur et éléments de construction fabriqués en différents matériaux de construction, par exemple en métaux, tout en conservant les propriétés de supraconductibilité dans la zone d'assemblage.

Le problème de l'assemblage des éléments de construction se complique considérablement quand on emploie les matériaux supraconducteurs modernes à paramètres critiques élevés (température, champ magnétique, courant critique). Parmi ces matériaux supraconducteurs figurent les composés intermétalliques tels que : niobium-étain (Nb_3Sn), vanadium-gallium (V_3Ga).

Cette complication est due à ce que ces supraconducteurs sont fragiles, s'exfolient facilement de la base sur laquelle ils sont appliqués, s'oxydent au chauffage et se prêtent mal à la déformation.

Pour contourner ces difficultés, on fait appel à différentes méthodes technologiques.

On a tenté de réaliser la déformation plastique du supraconducteur intermétallique fragile par le procédé de soudage par pression à froid au moyen d'une compression triaxiale irrégulière. Ainsi, par exemple, dans un essai visant l'obtention d'une connexion électrique entre les parties du supraconducteur stabilisé en Nb_3Sn sous forme d'un ruban à l'aide de molettes cannelées effectuant le soudage à froid par compression irrégulière, on a constaté des détériorations notables de la couche de supraconducteur.

Des résultats positifs ont été obtenus dans le procédé de soudage sous vide de supraconducteurs intermétalliques stabilisés, avec utilisation d'une couche intercalaire liquide. Dans ce procédé, on place une couche intercalaire fusible entre les surfaces à assembler des supraconducteurs, on chauffe la zone à assembler et on applique un effort de compression aux surfaces à assembler.

La particularité de ce procédé consistait à tenter d'obtenir un contact électrique entre deux surfaces supraconductrices sur une aire considérable. Pour atteindre cet objectif, on a été obligé de compliquer l'équipement technologique, car il fallait mettre sous vide ou créer un milieu inerte protecteur dans la zone d'assemblage et on a en outre dû faire appel à un

dispositif spécial pour réaliser la compression des surfaces à souder. Cependant, même dans ces conditions, on n'est arrivé à obtenir qu'un contact linéaire entre les surfaces, et de plus, seuls certains points de la
5 ligne de contact correspondaient à la composition stoechiométrique du composé intermétallique.

Pour cette raison, le procédé convenant le mieux pour la connexion électrique de supraconducteurs intermétalliques ainsi que pour l'étanchéification de
10 la surface du supraconducteur intermétallique, s'est avéré être le procédé de soudage par points. Comme exemples de procédés de soudage par points utilisés pour l'assemblage de supraconducteurs, on peut citer le soudage par résistance, le soudage par décharge de condensateurs et
15 le soudage par ultrasons, le soudage par laser ou par faisceau électronique.

Tous les types de soudage par points employés pour l'assemblage de supraconducteurs intermétalliques ont comme trait commun le caractère local et bref du
20 chauffage du point de soudure, ce qui prévient l'oxydation du revêtement supraconducteur et réduit l'éventualité d'une détérioration de ce revêtement lors de la déformation. De plus, le refroidissement rapide du point de soudure contribue à l'obtention de la meilleure structure
25 de supraconducteur dans la zone de passage d'une surface supraconductrice à l'autre.

On connaît un procédé de soudage de pièces par points, la surface à souder d'au moins l'une desdites pièces étant pourvue d'un revêtement intermétallique
30 supraconducteur, qui consiste à appliquer un composant fusible du composé intermétallique sur l'une des surfaces à souder, à les souder en soumettant les pièces, à chaque point de soudure, à un chauffage par impulsions pendant lequel la quantité de chaleur fournie assure la fusion
35 du composant fusible sans provoquer l'oxydation du revêtement supraconducteur, et à comprimer les pièces avec un effort assurant le rapprochement des surfaces à

à souder suivi de l'expulsion du composant fusible fondu du composé intermétallique (cf., par exemple, le brevet français N° 2 192 744, cl HOI II/00, 1974).

Ledit procédé assure le nettoyage des surfaces supraconductrices des pellicules d'oxyde et leur contact physique par mouillage d'un composant fusible fondu du composé intermétallique. Dans ce cas, l'apport de chaleur à chaque point de soudure est limité, c'est-à-dire que, d'une part, la quantité de chaleur doit être suffisante pour faire fondre le composant fusible, mais que, d'autre part, elle ne doit pas atteindre une valeur pouvant provoquer l'oxydation du revêtement supraconducteur. En même temps, l'élévation de l'intensité de l'apport de chaleur, autrement dit, l'augmentation du flux de chaleur, conduit à l'obtention de paramètres critiques élevés des zones de transitions supraconductrices en cours de formation entre les surfaces à assembler. Ceci est lié à l'augmentation des centres de "pinning", qui intensifie les processus de diffusion, et à la diminution des processus d'oxydation.

Toutefois, lorsque pour une quantité donnée de chaleur, on augmente l'intensité de l'impulsion thermique en diminuant sa durée, on provoque l'exfoliation du revêtement supraconducteur de la base du fait que le processus d'expulsion du composant fusible fondu lors du rapprochement des surfaces à souder coïncide avec le processus de modification structurale dans le revêtement supraconducteur lui-même.

Il convient de noter que, pour assembler des pièces d'une rigidité accrue, dépendant de leur forme géométrique, par exemple des tubes, il faut, pour améliorer les conditions de leur déformation lors du rapprochement des surfaces à souder, faire appel à des régimes "plus doux" de soudage, c'est-à-dire à des régimes réalisés avec une impulsion thermique de plus longue durée.

Mais la qualité de l'assemblage soudé obtenu à

ce régime est plus basse par suite de l'oxydation du revêtement supraconducteur résultant de l'augmentation de la zone d'échauffement local autour du point de soudure. En même temps, la température maximale de chauffage au point de soudure diminue, ce qui provoque une diminution de l'activité des processus de diffusion et conduit à la formation d'une structure sans défauts du supraconducteur dans la zone des transitions supraconductrices des surfaces à souder, ce qui abaisse les paramètres critiques du supraconducteur.

On s'est donc proposé de mettre au point un procédé de soudage de pièces par points, dans lequel le régime d'apport de chaleur à chaque point de soudure de pièces dont au moins l'une comporte sur sa surface à souder un revêtement supraconducteur intermétallique, serait choisi de façon à obtenir un assemblage soudé dans lequel seraient conservées les propriétés de supraconductibilité, c'est-à-dire à assurer la qualité nécessaire de l'assemblage soudé.

Ce problème est résolu du fait que le procédé de soudage par points de pièces dont au moins l'une comporte sur sa surface à souder un revêtement supraconducteur intermétallique, du type consistant à appliquer une couche de composant fusible d'un composé intermétallique sur la surface à souder de l'une des pièces, et à souder les pièces en les soumettant, en chaque point de soudage, à un chauffage par impulsions de façon que l'apport de chaleur en résultant assure la fusion dudit composant fusible sans provoquer l'oxydation du revêtement supraconducteur, et en serrant simultanément lesdites pièces l'une contre l'autre avec un effort assurant le rapprochement des surfaces à souder et l'expulsion du composant fusible fondu du composé intermétallique, caractérisé, selon l'invention, en ce qu'on effectue le chauffage par impulsions à chaque point de soudure au moyen d'une succession d'impulsions thermiques, pendant laquelle l'intensité de l'apport de chaleur et l'effort de

compression des pièces à souder augmentent à chaque impulsion thermique successive.

Le procédé de soudage par points revendiqué permet d'élever la qualité de l'assemblage soudé en assurant en même temps des paramètres critiques élevés du supraconducteur dans la zone d'assemblage. Ceci est obtenu grâce à la prévention de la fissuration et de l'exfoliation du revêtement supraconducteur de la base sous l'action des flux de chaleur importants. Cet effet résulte de la présence d'un décalage entre d'une part, la préparation des surfaces à souder, et d'autre part, les processus de transformations structurales dans le revêtement supraconducteur lui-même. La préparation des surfaces à souder comprend l'élimination des pellicules d'oxyde des surfaces des pièces au moyen du composant fusible fondu, le mouillage des surfaces à souder par le composant fusible fondu et l'expulsion du composant fusible fondu. Les processus de transformations structurales comprennent la consolidation par diffusion des surfaces à assembler, la déformation plastique au moment où lesdites surfaces entrent en contact et l'obtention dans la structure du composé intermétallique de défauts qui augmentent les paramètres critiques du supraconducteur.

Dans ces conditions, le caractère local et bref du chauffage des pièces à souder est préservé. Un avantage supplémentaire d'un tel soudage est qu'il permet d'augmenter notablement la surface de contact physique des surfaces à souder à chaque point de soudure.

L'invention sera mieux comprise et d'autres buts, détails et avantages de celle-ci apparaîtront mieux à la lumière de la description explicative qui va suivre d'un mode de réalisation donné uniquement à titre d'exemple non limitatif, avec référence au dessin unique non limitatif annexé représentant une vue en coupe longitudinale partielle des pièces soudées conformément au procédé suivant l'invention.

Le procédé de soudage par points revendiqué est utilisé pour le soudage de pièces de différentes formes géométriques : pièces plates, pièces tubulaires, ainsi que de pièces de forme compliquée, la surface à souder
5 d'au moins l'une desdites pièces étant pourvue d'un revêtement supraconducteur à base d'un composé inter-métallique.

Dans la majorité des cas, le procédé est appliqué pour l'assemblage de pièces, la surface à souder de
10 chacune desquelles est pourvue d'un revêtement supraconducteur intermétallique.

Le procédé proposé de soudage par points va être décrit dans ce qui suit en considérant, à titre d'exemple non limitatif, le soudage de deux pièces
15 tubulaires. Le tube extérieur 1 est un supraconducteur stabilisé constitué par trois couches : une couche de matériau stabilisant 2, une couche 3 d'un composant difficilement fusible du composé supraconducteur intermétallique, et un revêtement supraconducteur 4 à
20 base du composé intermétallique disposé sur la surface intérieure du tube 1 sur la couche 3 de composant difficilement fusible.

Le tube intérieur 5 est, par exemple, un tube bimétallique composé de métaux hétérogènes. La couche
25 extérieure 6 est en métal difficilement fusible, par exemple, en niobium, tandis que la couche intérieure 7 est un matériau analogue à celui de la couche stabilisante 2 du tube 1. Au préalable, on applique, par exemple par brasage, une couche 8 de composant fusible du
30 composé intermétallique sur l'une des surfaces à souder, dans la zone de soudage, par exemple sur le revêtement intermétallique 4 du tube 1. On place les tubes à souder 1 et 5 l'un dans l'autre. Avant le soudage, les surfaces à souder des tubes 1 et 5 sont mises en contact par
35 l'effort de compression statique créé par les électrodes de soudage 9. Ensuite les pièces 1 et 5 sont soudées, par exemple par résistance avec transformateur, en

soumettant les pièces 1 et 5 à un chauffage par impulsions de courant de soudage à chaque point de soudure. Le soudage des pièces 1 et 5 à chaque point est effectué par une succession d'impulsions thermiques, au moins deux en
5 nombre, par exemple par deux impulsions de courant de soudage, pendant laquelle on augmente l'intensité de l'apport de chaleur et l'effort de compression des pièces à chaque impulsion thermique successive. Dans chaque
10 impulsion thermique, la quantité de chaleur fournie aux pièces à un point de soudure est choisie de manière que soit assurée la fusion du composant fusible et que la quantité totale de chaleur fournie par la succession
15 d'impulsions thermiques ne provoque pas l'oxydation du revêtement supraconducteur. En règle générale, pour des pièces de différentes formes géométriques, cette quantité de chaleur se trouve dans les limites de 2 à 4 joules. Les intervalles entre les impulsions thermiques successives lors du soudage d'un point sont commensurables avec la
20 durée des impulsions elles-mêmes. Selon la rigidité des pièces, qui dépend de leur forme géométrique, le nombre d'impulsions thermiques varie. Il augmente avec l'accroissement de la rigidité des pièces. Ainsi, par exemple, l'assemblage de pièces de forme tubulaire nécessite un
25 plus grand nombre d'impulsions pour le soudage de chaque point que l'assemblage de pièces de forme plate. L'assemblage de pièces dont chacune est pourvue sur sa surface à souder d'un revêtement supraconducteur inter-
30 métallique nécessite un plus grand nombre d'impulsions, pour le soudage de chaque point, que l'assemblage de pièces dont seulement l'une est pourvue d'un revêtement supraconducteur intermétallique.

Simultanément avec leur chauffage par impulsions, les pièces sont serrées l'une contre l'autre avec un effort qui assure le rapprochement des surfaces à souder
35 au fur et à mesure de l'expulsion du composant fusible. L'effort de compression appliqué aux pièces peut soit être augmenté d'une manière monotone pendant le processus

de soudage du point, soit être appliqué par impulsions d'amplitude croissante à chaque impulsion thermique successive. L'impulsion thermique peut être obtenue aussi par soudage aux ultrasons, soudage par laser ou par faisceau électronique. Pour le soudage par résistance avec transformateur, une partie des impulsions de la succession d'impulsions thermiques peuvent être obtenues en avançant les électrodes de soudage 9 d'un seul côté. Les impulsions thermiques avec une intensité maximale de l'apport de chaleur sont généralement obtenues en avançant les électrodes de soudage 9 des deux côtés.

Le chauffage et l'effort de compression croissant des tubes 1 et 5 provoquent la fusion de la couche 8 de composant fusible du composé intermétallique, suivie de la formation d'un noyau 10, de l'expulsion de ce dernier et d'une déformation graduelle des tubes à souder 1, 5. Les impulsions thermiques à intensité maximale de l'apport de chaleur et les efforts de compression maximaux des pièces 1, 5 ont lieu au moment de l'entrée en contact physique des points à souder des surfaces et de leur meilleure étanchéification par le composant fusible fondu expulsé.

Le procédé revendiqué de soudage par points de pièces dont au moins l'une est munie sur sa surface à souder d'un revêtement supraconducteur intermétallique, permet de conserver la propriété de conductibilité du revêtement supraconducteur assemblé, pour assurer l'étanchéité, à un matériau de construction, élève les paramètres critiques des zones de transition supraconductrices en cas d'assemblage de deux supraconducteurs, et garantit l'obtention des meilleures caractéristiques indépendamment des formes des pièces à assembler.

Pour une meilleure compréhension de la présente invention, des exemples concrets mais non limitatifs de mise en oeuvre du procédé proposé de soudage de pièces par points sont décrits ci-après.

Exemple 1

Par le procédé proposé de soudage par points on soude des pièces se présentant sous forme de rubans supraconducteurs de 0,05 mm d'épaisseur en niobium-étain (Nb_3Sn) stabilisés au cuivre. L'épaisseur du revêtement supraconducteur est de 0,005 mm, l'épaisseur de la couche sous-jacente de niobium est de 0,01 mm. Le revêtement supraconducteur est obtenu par un procédé de diffusion par réaction. La largeur des rubans à assembler est de 40 mm. Sur la surface de l'un des rubans, du côté du revêtement supraconducteur, on applique par brasage une couche d'étain (Sn) de 0,05 mm d'épaisseur suivant toute la largeur du ruban et sur une longueur de 50 mm. Les extrémités des bandes à assembler sont disposées à recouvrement sur une longueur de 50 mm. L'assemblage se fait par soudage par résistance avec transformateur. On réalise 9 points de soudure disposés de manière régulière en trois rangées sur la surface à assembler 40 x 50 mm. Chaque point de soudure est soumis à un chauffage par une succession d'impulsions thermiques composées de trois impulsions de courant de soudage, avec la compression simultanée par avancement des électrodes de soudage des deux côtés. Le régime de soudage de chaque point est résumé dans le Tableau 1 ci-après.

Tableau 1

Impulsion	Paramètres			
	Puissance du flux de chaleur W/cm^2	Courant de soudage maximal, kA	Durée d'impulsion, ms	Effort de compression impulsif maximal, N
Première	51,02	5	20	500
Seconde	153,06	15	20	1500
Troisième	255,1	25	20	2500

Les pièces étaient préalablement serrées, en chaque point de soudage, par les électrodes de soudage, avec un effort de compression statique de 2000 N.

Les essais expérimentaux n'ont révélé aucune
5 dégradation des propriétés supraconductrices de l'assemblage soudé.

Exemple 2

Par le procédé revendiqué par points, on a réalisé l'étanchéification de la surface intérieure d'un
10 supraconducteur tubulaire en niobium-étain (Nb_3Sn) stabilisé au cuivre, comportant sur ladite surface intérieure un revêtement supraconducteur. L'étanchéification est réalisée à l'aide d'un anneau massif en niobium engagé à l'intérieur du supraconducteur tubulaire stabilisé. L'épaisseur du
15 cuivre stabilisant est de 3 mm, l'épaisseur du revêtement supraconducteur, de $16\ \mu$, et l'épaisseur de la couche de niobium, de 0,3 mm. Le revêtement supraconducteur est exécuté par la méthode de diffusion par réaction. La largeur de l'anneau d'étanchéité en niobium est de 30 mm,
20 et son épaisseur, de 5 mm. On applique par brasage une couche d'étain de 0,1 mm d'épaisseur sur la surface extérieure de l'anneau en niobium. On engage l'anneau à l'intérieur du tube et on le réunit à celui-ci par soudage par résistance avec transformateur. Le diamètre des parties
25 à associer est de 102 mm. On effectue 30 points de soudure en deux rangées et en quinconce. Chaque point de soudure est soumis à un chauffage par une succession d'impulsions thermiques composée de cinq impulsions de courant de soudage, avec compression simultanée par des électrodes de
30 soudage avancées des deux côtés.

Les régimes de soudage en chaque point sont résumés dans le Tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2

5	Impulsion	Paramètres			
		Puissance du flux de cha- leur W/cm^2	Courant de sou- dage maximal kA	Durée d'impul- sion , ms	Effort de compression impulsionnel maximal, N
10	Première	51,02	5	20	500
	Seconde	102,04	10	20	1000
	Troisième	153,06	15	20	1500
	Quatrième	204,08	20	20	2000
	Cinquième	255,1	25	20	2500

On a appliqué au préalable aux électrodes de soudage un effort de compression statique de 2000 N.

Le nombre d'impulsions thermiques choisi dans l'exemple considéré, ainsi que leurs paramètres, ont assuré la conservation des propriétés supraconductrices du supraconducteur tubulaire.

Le contrôle par prélèvement après séparation forcée de l'assemblage soudé a fait apparaître que le diamètre de la tache de contact à chaque point soudé était de 4 mm.

Il convient de noter que les régimes de soudage indiqués dans les exemples 1 et 2 ci-dessus sont ceux qui assurent la plus haute qualité de l'assemblage soudé. La qualité désirée de l'assemblage soudé peut être obtenue à l'aide d'autres régimes de soudage. Par exemple, dans l'exemple 1, elle peut être obtenue à l'aide de deux impulsions thermiques, et dans l'exemple 2, à l'aide de trois impulsions thermiques.

Bien entendu, l'invention n'est nullement limitée aux modes de réalisation décrits et représentés qui n'ont été donnés qu'à titre d'exemple. En particulier, elle comprend tous les moyens constituant des équivalents techniques des moyens décrits ainsi que leurs combinaisons si celles-ci sont exécutées suivant son esprit et mises en oeuvre dans le cadre de la protection comme revendiquée.

REVENDICATIONS

- 1.- Procédé de soudage par points de pièces dont au moins l'une comporte sur sa surface à souder un revêtement supraconducteur intermétallique, du type
- 5 consistant à appliquer une couche de composant fusible d'un composé intermétallique sur la surface à souder de l'une des pièces à souder, et à souder lesdites pièces en les soumettant à un chauffage par impulsions à chaque point de soudure, l'apport de chaleur ainsi obtenu assurant
- 10 la fusion dudit composant fusible sans provoquer l'oxydation du revêtement supraconducteur, et en serrant simultanément lesdites pièces l'une contre l'autre avec un effort assurant le rapprochement des surfaces à souder par
- expulsion du composant fusible fondu du composé inter-
- 15 métallique, caractérisé en ce qu'on effectue le chauffage par impulsions à chaque point de soudure au moyen d'une succession d'impulsions thermiques, pendant laquelle on augmente l'intensité de l'apport de chaleur et l'effort de compression des pièces à souder à chacune desdites
- 20 impulsions thermiques successives.

2.- Assemblages de pièces soudées, caractérisés en ce qu'ils sont obtenus par le procédé faisant l'objet de la revendication 1.

