

Alliage Fe-Ni, destiné notamment au transport et au stockage d'hydrogène liquide

La présente invention concerne un alliage Fe-Ni destiné en particulier à être utilisé dans des applications cryogéniques, notamment pour fabriquer des pièces ou assemblages destinés à contenir des gaz liquéfiés, et par exemple des tubes de transport ou des cuves de transport ou de stockage de gaz liquéfiés. Ces pièces ou assemblages sont en particulier adaptés pour recevoir de l'hydrogène liquide.

Les matériaux utilisés actuellement pour le transport de gaz liquéfiés sont généralement conçus pour le transport et le stockage de méthane liquide, dont la température d'ébullition est de -162°C . Or, il devient nécessaire de produire également des pièces ou assemblages adaptés pour le transport et le stockage de l'hydrogène liquide, dont la température d'ébullition est de -253°C .

Les inventeurs de la présente invention ont constaté que le transport et le stockage de l'hydrogène liquide avec les matériaux utilisés habituellement pour le transport de gaz liquéfiés, par exemple l'Invar M93, est susceptible de poser des difficultés compte tenu d'une part de la faible température d'ébullition de l'hydrogène liquide et d'autre part du risque de fragilisation de l'alliage par l'hydrogène.

Plus particulièrement, les inventeurs de la présente invention ont constaté que les structures austénitiques comme celles de l'Invar M93 peuvent développer une transformation martensitique lorsque le matériau est soumis à une déformation plastique à température cryogénique. Le taux de martensite est d'autant plus important que la déformation est sévère et que la température est basse. Dans le cas de l'Invar M93, le risque de transformation martensitique, au sein de la microstructure, en cas d'incident mécanique mineur durant l'exploitation d'une ligne ou cuve cryogénique (choc, écrasement, pliage, etc.), est donc fortement accru à la température de l'hydrogène liquide (-253°C). La martensite développée au sein de la microstructure de l'INVAR M93 et chargée en hydrogène peut alors générer une fragilisation par hydrogène.

Un but de l'invention est donc de fournir un alliage présentant de bonnes propriétés mécaniques à la température de l'hydrogène liquide (-253°C), associées à un faible coefficient moyen de dilatation thermique entre 0°C et -196°C , susceptible d'être utilisé notamment pour la fabrication de pièces destinées au transport et au stockage d'hydrogène liquide, par exemple pour la fabrication de tubes ou de cuves destinés au transport et au stockage d'hydrogène liquide.

A cet effet, l'invention concerne un alliage fer-nickel présentant la composition suivante, en pourcentage en poids :

$$36,5\% \leq \text{Ni} \leq 38,5\%$$

$$0,50\% \leq \text{Mn} \leq 1,25\%$$

$$0,001\% \leq \text{Cu} \leq 0,85\%$$

$$0,040\% \leq \text{C} \leq 0,150\%$$

$$0,10\% \leq \text{Si} \leq 0,35\%$$

le reste étant du fer et des impuretés inévitables résultant de l'élaboration.

5 Selon des caractéristiques particulières de l'alliage selon l'invention :

- la teneur en carbone est comprise entre 0,040% en poids et 0,075% en poids ;
- les impuretés inévitables résultant de l'élaboration comprennent, en pourcentage en poids :

$$\text{Cr} \leq 0,5\%$$

10 $\text{Co} \leq 0,5\%$

$$\text{S} \leq 0,0035\%$$

$$\text{P} \leq 0,01\%$$

$$\text{Mo} < 0,5\%$$

$$\text{O} \leq 0,0025\%$$

15 $\text{Ca} \leq 0,0015\%$

$$\text{Mg} \leq 0,0035\%$$

$$\text{Al} \leq 0,0085\% ;$$

20 - l'alliage présente un coefficient moyen de dilatation thermique α entre -196°C et 0°C supérieur ou égal à $2,0 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ et inférieur ou égal à $3,0 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$, en particulier lorsque l'alliage est sous forme de produit laminé à chaud.

L'invention concerne également une bande à froid réalisée dans l'alliage tel que décrit ci-dessus.

L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une bande à froid telle que décrite ci-dessus comprenant les étapes successives suivantes :

- 25
- on élabore un alliage tel que défini ci-dessus ;
 - on forme un demi-produit dudit alliage ;
 - on lamine à chaud ce demi-produit afin d'obtenir une bande à chaud ;
 - on lamine à froid la bande à chaud en une ou plusieurs passes pour obtenir une bande à froid.

30 L'invention concerne également l'utilisation de l'alliage tel que défini ci-dessus pour fabriquer des cuves ou des tubes destinés à recevoir un gaz liquéfié.

L'invention concerne également un fil d'apport réalisé dans l'alliage tel que défini ci-dessus.

35 L'invention concerne également un procédé de fabrication d'un fil d'apport tel que défini ci-dessus, le procédé comprenant les étapes suivantes :

- fourniture d'un demi-produit réalisé dans un alliage tel que défini ci-dessus;

- transformation à chaud de ce demi-produit pour former un fil intermédiaire ; et
- transformation du fil intermédiaire en fil d'apport, de diamètre inférieur à celui du fil intermédiaire, ladite transformation comprenant une étape de tréfilage.

5 L'invention concerne également une pièce ou partie de pièce réalisée dans un alliage tel que défini ci-dessus, ladite pièce ou partie de pièce étant obtenue par fabrication additive métallique.

L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une pièce ou d'une partie de pièce, comprenant une étape de fabrication de ladite pièce ou partie de pièce par un procédé de fabrication additive métallique utilisant, en tant que matériau d'apport,
10 un fil d'apport réalisé dans l'alliage tel que défini ci-dessus et/ou une poudre réalisée dans l'alliage tel que défini ci-dessus.

L'invention concerne également une utilisation du fil d'apport tel que défini ci-dessus comme fil d'apport dans le cadre d'un procédé de fabrication additive métallique.

15 L'invention concerne également une poudre métallique réalisée dans un alliage tel que défini ci-dessus.

L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une poudre métallique telle que définie ci-dessus, ledit procédé comprenant une étape de fourniture d'un fil d'apport tel que défini ci-dessus, ainsi qu'une étape d'atomisation plasma de ce fil d'apport pour obtenir la poudre métallique.

20 L'invention concerne également un tronçon de tube réalisé dans un alliage tel que défini ci-dessus, ledit tronçon de tube étant de préférence sans soudure.

Selon des caractéristiques particulières, le tronçon de tube comprend une tôle repliée en forme de tube et réalisée dans un alliage tel que défini ci-dessus, la tôle présentant des bords longitudinaux reliés entre eux par un cordon de soudure.

25 L'invention concerne également un procédé de fabrication d'un tronçon de tube tel que défini ci-dessus, comprenant les étapes successives suivantes :

- fourniture d'une tôle réalisée dans un alliage tel que défini ci-dessus et présentant deux bords longitudinaux ; et

30 - soudage entre eux des bords longitudinaux de la tôle pour former le tronçon de tube.

L'invention concerne également un tube comprenant au moins deux tronçons de tube tels que définis ci-dessus, deux tronçons de tube successifs étant liés entre eux par un cordon de soudure.

35 L'invention concerne également un procédé de fabrication d'un tube comprenant les étapes successives suivantes :

- fourniture d'un premier tronçon de tube tel que défini ci-dessus et d'un deuxième tronçon de tube tel que défini ci-dessus, le premier tronçon de tube et le deuxième tronçon de tube s'étendant suivant un axe longitudinal,

5 - positionnement des premier et deuxième tronçons de tube de telle sorte qu'une extrémité longitudinale du premier tronçon de tube soit disposée en regard d'une extrémité longitudinale du deuxième tronçon de tube selon l'axe longitudinal des premier et deuxième tronçons de tube ; et

- soudage entre elles de deux extrémités longitudinales en regard des premier et deuxième tronçons de tube.

10 L'invention concerne également une partie de cuve comprenant au moins une partie réalisée dans un alliage tel que défini ci-dessus. Cette partie de cuve est destinée au transport ou au stockage de gaz liquéfiés, et notamment d'hydrogène liquide.

L'invention concerne également une bande à chaud réalisée dans l'alliage tel que décrit ci-dessus.

15 L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une bande à chaud telle que décrite ci-dessus comprenant les étapes successives suivantes :

- on élabore un alliage tel que défini ci-dessus ;
- on forme un demi-produit dudit alliage ;
- on lamine à chaud ce demi-produit afin d'obtenir une bande à chaud.

20 L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple, et faite en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique en perspective d'un tronçon de tube selon un premier mode de réalisation de l'invention ;

25 - la figure 2 est une vue schématique en perspective d'un tronçon de tube selon un deuxième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 3 est une vue schématique de dessus d'une tôle utilisée lors de la mise en œuvre du procédé de fabrication d'un tronçon de tube selon le deuxième mode de réalisation;

30 - la figure 4 est une vue schématique en perspective d'un tube selon l'invention ; et
- la figure 5 est une vue schématique en perspective d'une pièce obtenue par fabrication additive selon l'invention.

Dans toute la description, les teneurs sont données en pourcentage massique.

35 L'alliage selon l'invention est un alliage à base de fer comprenant, en pourcentage en poids :

$$36,5\% \leq \text{Ni} \leq 38,5\%$$

$$0,50\% \leq \text{Mn} \leq 1,25\%$$

$$0,001\% \leq \text{Cu} \leq 0,85\%$$

$$0,040\% \leq \text{C} \leq 0,150\%$$

$$0,10\% \leq \text{Si} \leq 0,35\%$$

5 le reste étant du fer et des impuretés inévitables résultant de l'élaboration.

Par impuretés inévitables résultant de l'élaboration, on entend des éléments qui sont présents dans les matières premières utilisées pour élaborer l'alliage ou qui proviennent des appareils utilisés pour son élaboration, et par exemple des réfractaires des fours. Ces impuretés n'ont pas d'effet métallurgique sur l'alliage.

10 Les impuretés résultant de l'élaboration comprennent notamment, en pourcentage en poids :

$$\text{Cr} \leq 0,5\%$$

$$\text{Co} \leq 0,5\%$$

$$\text{S} \leq 0,0035\%$$

15 $\text{P} \leq 0,01\%$

$$\text{Mo} \leq 0,5\%$$

$$\text{O} \leq 0,0025\%$$

$$\text{Ca} \leq 0,0015\%$$

$$\text{Mg} \leq 0,0035\%$$

20 $\text{Al} \leq 0,0085\%$.

L'alliage selon l'invention présente en particulier un coefficient moyen de dilatation thermique α entre -196°C et 0°C supérieur ou égal à $2,0 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ et inférieur ou égal à $3,0 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$.

25 Dans l'alliage selon l'invention, les teneurs en Ni, Mn, C et Cu, à savoir $\text{Ni} \geq 36,5\%$, $\text{Mn} \geq 0,50\%$, $\text{C} \geq 0,040\%$ et $\text{Cu} \geq 0,001\%$, améliorent la stabilité de l'alliage à la transformation martensitique à -253°C (20K), c'est-à-dire à la température de l'hydrogène liquide, et permettent ainsi à l'alliage de conserver une structure austénitique lors d'un incident mécanique mineur (choc, écrasement, pliage, etc.) survenant à la température de l'hydrogène liquide.

30 Les inventeurs de la présente invention ont constaté que si les teneurs en Ni, Mn, C et Cu sont inférieures aux bornes inférieures décrites ci-dessus, l'alliage présente un risque accru de fragilisation par hydrogène en cas d'incident mécanique mineur (choc, écrasement, pliage, etc.) survenant à la température de l'hydrogène liquide, caractérisé par un faible allongement à rupture A ($A \leq 10\%$) et une striction Z trop faible ($Z\% \leq 50\%$).

35 L'allongement à rupture A est déterminé au moyen de la norme ASTM A370_Juillet 2019.

La striction Z est déterminée au moyen de la norme NF EN ISO 6892-1_Décembre 2019.

5 D'autre part, les bornes supérieures choisies pour Ni, Mn et Cu, à savoir $Ni \leq 38,5\%$, $Mn \leq 1,25\%$ et $Cu \leq 0,85\%$ permettent de conserver un coefficient moyen de dilatation thermique α entre -196°C et 0°C inférieur ou égal à $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, ce qui permet de limiter les contraintes thermiques à une valeur critique évaluée à 110 MPa. Cette contrainte critique vaut approximativement 15% de la limite d'élasticité de l'alliage à la température de l'hydrogène liquide ($R_p(-253^\circ\text{C}) \sim 800 \text{ MPa}$).

10 Les inventeurs de la présente invention ont constaté que si les teneurs en Ni, Mn et Cu sont supérieures aux bornes supérieures décrites ci-dessus, le coefficient moyen de dilatation thermique α entre -196°C et 0°C présente une valeur supérieure à $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, et par suite trop élevé pour les applications visées.

15 En outre, lorsque la teneur en carbone est supérieure à 0,150%, l'alliage perd en soudabilité par formation de porosités lors du soudage TIG sans fil d'apport. En effet, la présence de carbone à des teneurs supérieures à 0,150% génère de l'effervescence durant les opérations de soudage TIG sans fil d'apport. Dans ce cas, la soudabilité de l'alliage est donc dégradée.

De préférence, la teneur en carbone est comprise entre 0,040% et 0,075% en poids. Dans ce cas, la soudabilité de l'alliage est encore améliorée.

20 De préférence, la teneur en Mn est supérieure ou égale à 0,7% en poids. Une telle teneur en manganèse améliore encore la stabilité de l'alliage à la transformation martensitique à -253°C (20K).

25 Dans l'alliage selon l'invention, la teneur en silicium est comprise entre 0,10% et 0,35% en poids. Le silicium à ces teneurs permet la désoxydation de l'alliage. A une teneur supérieure à 0,35% en poids, le taux de dilatation thermique entre -196°C et 0°C risque d'être trop élevé lorsque les teneurs en Ni, Mn et Cu sont ajustées conformément à l'invention.

30 L'alliage selon l'invention peut être élaboré par toute méthode adaptée connue de l'homme du métier. A titre d'exemple, il est élaboré dans un four électrique à arc ou en four à induction, puis est affiné en poche par des méthodes habituelles, comprenant en particulier une étape d'affinage en poche de type VOD suivie d'une étape de métallurgie en poche chauffante de type ASV. En variante, l'alliage suivant l'invention est élaboré en four à induction sous vide à partir de matières premières à bas résiduels.

35 La méthode d'élaboration de l'alliage est donnée uniquement à titre d'exemple. Toutes autres méthodes d'élaboration de l'alliage connues de l'homme du métier peuvent être utilisées à cet effet.

L'invention concerne également une bande à froid présentant la composition définie ci-dessus. Cette bande à froid présente en particulier une épaisseur comprise entre 0,5 et 10 mm. L'épaisseur de la bande à froid est avantageusement comprise entre 2 mm et 10 mm dans le cas où la bande à froid est destinée à être utilisée pour la fabrication d'un tube cryogénique. Elle est avantageusement comprise entre 0,5 mm et 2 mm dans le cas où la bande à froid est destinée à être utilisée pour la fabrication d'une cuve de transport ou de stockage de gaz liquéfié.

A titre d'exemple, on utilise le procédé suivant pour fabriquer de telles bandes à froid.

On coule l'alliage tel que décrit ci-dessus sous forme de demi-produits tels que des lingots, des électrodes de refusion, des brames, notamment des brames minces d'épaisseur inférieure à 180 mm, ou des billettes.

Lorsque l'alliage est coulé sous forme d'électrode de refusion, celle-ci est avantageusement refondue sous vide ou sous laitier électro-conducteur afin d'obtenir une meilleure pureté et des demi-produits plus homogènes.

Le demi-produit ainsi obtenu par coulée directe est ensuite laminé à chaud à une température comprise entre 950°C et 1300°C pour obtenir une bande à chaud.

L'épaisseur de la bande à chaud est notamment comprise entre 2 mm et 20 mm, et plus particulièrement comprise entre 2 mm et 10 mm.

Dans le cas où l'on fabrique une tôle pour cuve de transport ou de stockage de gaz liquéfié, l'épaisseur finale après laminage à chaud est par exemple environ égale à 3,5 mm.

Selon un mode de réalisation, le laminage à chaud est précédé d'un traitement thermique d'homogénéisation chimique réalisé sur le demi-produit à une température comprise entre 950°C et 1300°C pendant une durée comprise entre 30 minutes et 24 heures.

La bande à chaud est refroidie à température ambiante pour former une bande refroidie, puis enroulée en bobines.

La bande refroidie est ensuite laminée à froid pour obtenir une bande à froid présentant une épaisseur finale avantageusement comprise entre 0,5 mm et 10 mm. Le laminage à froid est effectué en une passe ou en plusieurs passes successives.

Dans le cas où l'on fabrique une tôle pour tube cryogénique, l'épaisseur finale après laminage à froid est avantageusement comprise entre 2 mm et 10 mm.

Dans le cas où l'on fabrique une tôle pour cuve de transport ou de stockage de gaz liquéfié, l'épaisseur finale après laminage à froid est avantageusement comprise entre 0,5 et 2 mm.

Optionnellement, la bande à chaud est décapée chimiquement puis grenaillée pour enlever la calamine avant laminage à froid.

Optionnellement, les tôles décapées et grenaillées sont polies afin d'enlever les pénétrations oxydées aux joints de grains avant laminage à froid, la rugosité Ra
5 recherchée étant en particulier inférieure à 50 µm selon la norme ISO 4287.

A l'épaisseur finale, la bande à froid est optionnellement soumise à un traitement thermique de recristallisation dans un four statique pendant une durée allant de 10 minutes à plusieurs heures et à une température supérieure à 700°C. En variante, elle est soumise à un traitement thermique de recristallisation dans un four de recuit continu
10 pendant une durée allant de quelques secondes à 1 minute environ, à une température supérieure à 800°C dans la zone de maintien du four, et sous atmosphère protégée de type N₂/H₂ (30%/70%) avec une température de givre comprise entre -50°C et -15°C. La température de givre définit la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère de traitement thermique. Un tel traitement est en particulier mis en œuvre
15 après mise en œuvre des étapes de décapage, grenaillage, et polissage décrites plus haut.

Un traitement thermique de recristallisation est optionnellement réalisé, dans les mêmes conditions que le traitement thermique de recristallisation décrit ci-dessus, en cours de laminage à froid, à une épaisseur intermédiaire entre l'épaisseur initiale
20 (correspondant à l'épaisseur de la bande à chaud) et l'épaisseur finale. L'épaisseur intermédiaire est par exemple choisie égale à 1,5 mm lorsque l'épaisseur finale de la bande à froid est de 1,0 mm.

La méthode de fabrication de bandes à froid en cet alliage est décrite uniquement à titre d'exemple. Toutes autres méthodes de fabrication de bandes à froid connues de
25 l'homme du métier peuvent être utilisées à cet effet.

L'invention concerne également un tronçon de tube cryogénique réalisé dans l'alliage décrit ci-dessus. Le tronçon de tube est notamment destiné au transport de gaz liquéfiés, et en particulier de l'hydrogène liquide.

Un tronçon de tube 1 selon un premier mode de réalisation est représenté sur la
30 figure 1. Ce tronçon de tube 1 ne comprend pas de soudure longitudinale. Il s'agit donc d'un tronçon de tube sans soudure. Ce tronçon de tube 1 est par exemple obtenu par extrusion de billettes réalisées dans l'alliage décrit ci-dessus.

Un tronçon de tube 7 selon un deuxième mode de réalisation est représenté sur la
35 figure 2. Le tronçon de tube 7 comprend une tôle 9, réalisée dans l'alliage tel que décrit précédemment, et repliée en forme de tube, dont les bords longitudinaux 12 sont liés

entre eux par un cordon de soudure 15. La paroi du tronçon de tube 7 présente par exemple une épaisseur comprise entre 2 mm et 10 mm.

Le cordon de soudure est en particulier obtenu par soudure autogène, c'est-à-dire en utilisant un fil d'apport réalisé dans l'alliage décrit précédemment.

5 En variante, un fil d'apport de composition différente de celle décrite ci-dessus est utilisé, la composition du fil d'apport étant choisie en fonction des propriétés recherchées, et notamment afin d'obtenir une soudure présentant une dilatation thermique α entre -196°C et 0°C inférieure ou égale à $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et des propriétés mécaniques supérieures à celles de la tôle.

10 L'invention a également pour objet un procédé de fabrication d'un tel tronçon de tube 7.

Le procédé comprend la fourniture d'une tôle 9 réalisée dans l'alliage tel que décrit ci-dessus. Une telle tôle 9 est représentée sur la figure 3. Elle s'étend selon une direction longitudinale L et présente des bords longitudinaux 12 sensiblement parallèles à la direction longitudinale L. Elle présente par exemple une épaisseur comprise entre 2 mm et 10 mm.

Le procédé comprend en outre une étape consistant à replier cette tôle 9 de manière à amener les deux bords longitudinaux 12 en regard, suivie d'une étape consistant à souder entre eux les deux bords longitudinaux 12 au moyen d'un fil d'apport adapté, et en particulier au moyen d'un fil d'apport réalisé dans l'alliage décrit ci-dessus.

La soudure réalisée au cours de cette étape est une soudure longitudinale. De préférence, il s'agit d'une soudure bout à bout.

25 A l'issue de ce procédé, on obtient un tronçon de tube 7, tel qu'illustré sur la figure 2, dans lequel la tôle 9 est repliée en forme de tube, et les bords longitudinaux 12 de la tôle 9 sont liés entre eux par un cordon de soudure 15.

L'invention concerne également un tube cryogénique 20 réalisé par l'assemblage de tronçons de tube cryogéniques 1, 7 selon l'invention. Le tube 20 est notamment destiné au transport de gaz liquéfiés, et en particulier de l'hydrogène liquide.

30 A titre d'exemple, le tube cryogénique 20 comprend au moins deux tronçons de tube 1, 7 tels que décrits précédemment, reliés entre eux par un cordon de soudure 22. Le cordon de soudure 22 s'étend le long de la circonférence du tube 20 de sorte à relier entre eux les tronçons de tube 1, 7.

Le cordon de soudure 22 est en particulier obtenu par soudure autogène, c'est-à-dire en utilisant un fil d'apport présentant la composition décrite ci-dessus.

35 La soudure est en particulier une soudure bout à bout, de préférence une soudure orbitale. Par soudure orbitale, on entend une soudure réalisée en faisant tourner l'outil de

soudage, à savoir en particulier les torches de soudage, par rapport aux tronçons de tube 1, 7 à souder.

La paroi du tube cryogénique 20 présente par exemple une épaisseur comprise entre 2 mm et 10 mm.

5 On a représenté sur la figure 4 un tube cryogénique 20 obtenu par assemblage de tronçons de tube 7 selon le deuxième mode de réalisation tels que décrits plus haut en regard de la figure 2.

En variante, le tube 20 est obtenu par assemblage de tronçons de tube 1 selon le premier mode de réalisation tels que décrits plus haut en regard de la figure 1.

10 L'invention a également pour objet un procédé de fabrication d'un tube cryogénique 20 tel que décrit ci-dessus.

Au cours de ce procédé, on fournit au moins deux tronçons de tube 1, 7. Chaque tronçon de tube 1, 7 est sensiblement cylindrique d'axe M, et présente deux extrémités longitudinales 24, espacées entre elles selon la direction de l'axe M.

15 On positionne alors les deux tronçons de tube 1, 7 de manière à ce que leurs extrémités longitudinales 24 soient disposées en regard selon la direction de l'axe M de ces tronçons de tube 1, 7, puis on soude entre elles les extrémités longitudinales 24 en regard des deux tronçons de tube 1, 7 en utilisant un fil d'apport, et en particulier un fil réalisé dans l'alliage décrit ci-dessus.

20 Avantageusement, on réalise lors de cette étape une soudure bout à bout entre les extrémités longitudinales 24 en regard des tronçons de tube 1, 7. La soudure est de préférence une soudure orbitale.

De préférence, l'étape de soudage comprend, préalablement à la solidarisation entre eux des tronçons de tube 1, 7, une étape d'usinage de chanfreins aux extrémités 24 des tronçons de tube 1, 7 à souder entre elles.

25 L'étape de soudage est réalisée un nombre de fois égal au nombre de tronçons de tube 1, 7 à souder pour former le tube 20 diminué de un.

Selon un mode de réalisation, les tronçons de tube sont des tronçons de tube 1 selon le premier mode de réalisation décrit plus haut. En variante, les tronçons de tube sont des tronçons de tube 7 selon le deuxième mode de réalisation décrit plus haut.

30 A l'issue de cette ou de ces étapes de soudage, on obtient le tube cryogénique 20. Ce tube cryogénique 20 comprend au moins deux tronçons de tube 1, 7 successifs assemblés entre eux par un cordon de soudure 22.

35 L'invention concerne également une partie de cuve de transport ou de stockage de gaz liquéfiés réalisée dans l'alliage décrit ci-dessus.

L'invention concerne également un fil d'apport réalisé dans l'alliage tel que décrit ci-dessus.

Un tel fil d'apport est en particulier destiné à être utilisé dans le cadre d'un procédé de fabrication additive ou en tant de fil d'apport pour le soudage entre elles de deux
5 pièces ou parties de pièce, les pièces ou parties de pièce étant par exemple réalisées dans l'alliage décrit ci-dessus.

Un tel fil d'apport est en particulier réalisé par la mise en œuvre du procédé suivant.

Ce procédé comprend, dans une première étape, la fourniture d'un demi-produit
10 réalisé dans l'alliage tel que décrit ci-dessus.

A cet effet, l'alliage, élaboré selon les méthodes décrites plus haut, est soit coulé en lingots, soit coulé directement sous forme de billettes, notamment au moyen d'une coulée continue, en particulier rotative. Les demi-produits obtenus à l'issue de cette étape sont donc avantageusement des lingots ou des billettes, et présentent par exemple un
15 diamètre compris entre 130 et 230 mm, et plus particulièrement égal à environ 150 mm.

Ensuite, on transforme les demi-produits par transformation à chaud pour former un fil intermédiaire.

En particulier, au cours de cette étape de transformation à chaud, les demi-produits, c'est-à-dire notamment les lingots ou billettes, sont réchauffés, en particulier en
20 four à gaz, jusqu'à une température comprise entre 1150°C et 1250°C.

Ils sont ensuite soumis à un ébauchage à chaud, suivi d'un laminage à chaud, en particulier sur un train à fil, à une température comprise entre 950°C et 1150°C, puis d'une hypertrempe en sortie de train de laminage. Le fil intermédiaire peut être en particulier un fil machine. Il présente par exemple un diamètre compris entre 5 mm et 21
25 mm, et en particulier environ égal à 5,5 mm.

L'hypertrempe est en particulier une hypertrempe en piscine à 20°C, après un traitement thermique dans un four à gaz, à une température comprise entre 1050°C 1150°C pendant une durée comprise entre 20 minutes et 120 minutes.

Le fil intermédiaire est ensuite décapé, puis enroulé sous forme de bobine.

Optionnellement, le fil intermédiaire ou fil machine ainsi obtenu est tréfilé au
30 moyen d'une installation de tréfilage de type connu pour obtenir le fil d'apport. Ce fil d'apport présente un diamètre inférieur à celui du fil de départ. Son diamètre est notamment compris entre 0,5 mm et 3,5 mm. Il est avantageusement compris entre 0,8 mm et 2,4 mm.

L'étape de tréfilage comprend, en fonction du diamètre final à atteindre, une ou
35 plusieurs passes de tréfilage, avec, de préférence, un recuit entre deux passes de

tréfilage successives. Ce recuit est par exemple réalisé au défilé sous atmosphère réductrice à une température de l'ordre de 1150°C.

L'étape de tréfilage est, de préférence, suivie d'un nettoyage de la surface du fil tréfilé, puis d'un bobinage du fil.

5 Les passes de tréfilage sont réalisées à froid.

En particulier, pour la fabrication d'un fil d'apport de diamètre environ égal à 1,6 mm, deux passes de tréfilage sont utilisées, la deuxième passe de tréfilage aboutissant au diamètre final d'environ 1,6 mm.

10 Pour la fabrication d'un fil d'apport de diamètre environ égal à 1,2 mm, trois passes de tréfilage sont par exemple utilisées, la deuxième passe de tréfilage aboutissant à un diamètre d'environ 1,6 mm et la troisième passe de tréfilage au diamètre final de 1,2 mm.

15 La méthode de fabrication de fil d'apport est décrite uniquement à titre d'exemple. Toutes autres méthodes de fabrication de fils d'apport connues de l'homme du métier peuvent être utilisées à cet effet.

L'invention concerne également une poudre métallique pour fabrication additive réalisée dans l'alliage tel que décrit ci-dessus, dont la granulométrie après tamisage est avantageusement comprise entre 10 µm et 200 µm.

20 Une telle poudre est par exemple fabriquée par atomisation plasma à partir d'un fil réalisé dans un alliage tel que décrit ci-dessus, le fil présentant en particulier un diamètre d'environ 3 mm.

25 La granulométrie de la poudre est en particulier déterminée par la méthode de mesure suivante. Les lots de poudre sont séparés en plusieurs distributions de tailles de poudres au moyen de tamis en acier inoxydable à vibration ultrasonique. L'analyse de la distribution des tailles de poudres issues des tamisages est réalisée selon la norme ASTM B214-07. Le tamisage permet d'obtenir 5 classes de tailles : < 20µm - 20µm à 45µm - 45µm à 75µm - 75µm à 105µm - >105µm.

Le procédé d'atomisation plasma est connu en soi, et n'est donc pas décrit en détail.

30 Le fil d'apport est par exemple également destiné à être utilisé comme fil d'apport dans le cadre d'un procédé de fabrication additive métallique.

Le procédé de fabrication additive est par exemple un procédé de fabrication additive utilisant un arc électrique, un faisceau laser et/ou un faisceau d'électrons en tant que source d'énergie pour réaliser la fusion du fil d'apport.

35 Le procédé de fabrication additive est en particulier un procédé de fabrication additive par dépôt sous énergie dirigée (« Directed Energy Deposition » en anglais). Au

cours de ce procédé, le matériau d'apport est déposé, notamment par une buse, et immédiatement fusionné par une énergie thermique concentrée, en particulier par un faisceau laser, un faisceau d'électrons et/ou un arc électrique.

A titre d'exemple, le procédé de fabrication additive est un procédé arc-fil (5 « WAAM » ou « Wire Arc Additive Manufacturing » en anglais), Laser-fil, faisceau d'électrons-fil (« Electron Beam Free Form Fabrication » ou « Electron Beam Additive Manufacturing » en anglais) ou un procédé de fabrication additive hybride combinant les technologies arc-fil et Laser-poudre ou arc-fil et Laser-fil.

Le fil utilisé dans le cadre de ces procédés est le fil d'apport tel que décrit plus (10 haut.

Dans le cas d'un procédé hybride arc-fil et Laser-poudre, la poudre utilisée présente la même composition que le fil.

L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une pièce (40) telle que représentée schématiquement sur la figure 5 ou d'une partie de pièce, réalisée dans un (15 alliage tel que décrit ci-dessus, comprenant :

- la fourniture d'un fil d'apport réalisé dans cet alliage ; et

- la fabrication de la pièce (40) ou partie de pièce par un procédé de fabrication additive métallique utilisant, en tant que matériau d'apport, un fil d'apport réalisé dans l'alliage tel que décrit ci-dessus et/ou une poudre réalisée dans l'alliage tel que décrit ci- (20 dessus.

Le procédé de fabrication additive est par exemple un procédé de fabrication additive utilisant un arc électrique, un faisceau laser et/ou un faisceau d'électrons en tant que source d'énergie pour réaliser la fusion du matériau d'apport.

Le procédé de fabrication additive est en particulier un procédé de fabrication (25 additive par dépôt sous énergie dirigée (« Directed Energy Deposition » en anglais). Au cours de ce procédé, le matériau d'apport est déposé, notamment par une buse, et immédiatement fusionné par une énergie thermique concentrée, en particulier par un faisceau laser, un faisceau d'électrons et/ou un arc électrique.

A titre d'exemple, le procédé de fabrication additive est un procédé arc-fil (30 « WAAM » ou « Wire Arc Additive Manufacturing » en anglais), Laser-fil, faisceau d'électrons-fil (« Electron Beam Free Form Fabrication » ou « Electron Beam Additive Manufacturing » en anglais) ou un procédé de fabrication additive hybride combinant les technologies arc-fil et Laser-poudre ou arc-fil et Laser-fil.

Dans le cas où un procédé de fabrication additive hybride combinant les (35 technologies arc-fil et Laser-poudre ou arc-fil et Laser-fil est utilisé, la poudre et le fil d'apport sont réalisés dans l'alliage tel que décrit ci-dessus.

Les procédés de fabrication additive mentionnés ci-dessus sont connus en soi, et ne sont donc pas décrits en détail.

L'invention concerne également une pièce 40 ou une partie de pièce réalisée dans un alliage tel que décrit ci-dessus obtenue par fabrication additive métallique.

5 Ce procédé de fabrication additive métallique utilise en particulier, en tant que matériau d'apport, un fil d'apport réalisé dans l'alliage tel que décrit ci-dessus et/ou une poudre réalisée dans l'alliage tel que décrit ci-dessus.

10 Une pièce ou partie de pièce obtenue par un procédé de fabrication additive métallique, telle que la pièce 40, est brute de solidification. Elle présente donc une microstructure de solidification typique de l'alliage considéré, une telle microstructure comprenant typiquement des dendrites colonnaires qui croissent par épitaxie les unes sur les autres et dont l'orientation dépend de la largeur et de la hauteur du mur métallique fabriqué. Par ailleurs, une pièce obtenue par un procédé de fabrication additive présente, du fait de son procédé de fabrication additif, une succession de strates de solidification
15 superposées. Chaque strate, obtenue par solidification de gouttes de métal en fusion déposées, refond la peau de la strate précédente afin de générer une continuité métallurgique, et par suite réchauffe le reste des strates inférieures. La température de réchauffage est d'autant plus faible que la strate en question est éloignée de la zone en cours de fusion et solidification. Cette microstructure particulière est observable par
20 observation métallographique sur des coupes métallographiques des pièces.

Une pièce 40 ou partie de pièce obtenue par un procédé de fabrication additive métallique peut ainsi être distinguée de pièces obtenues par d'autres procédés, et notamment d'une pièce obtenue par métallurgie conventionnelle qui produit une structure recristallisée à grains homogènes.

25 La pièce 40 ou partie de pièce est notamment une pièce ou partie de pièce spéciale, telle qu'une vanne, un raccord de tubes ou autre pièce, en particulier utilisée dans le cadre d'applications cryogéniques, et plus particulièrement à la température de l'hydrogène liquide, par exemple dans le cadre du transport et du stockage de l'hydrogène liquide.

30 Selon un exemple, la pièce 40 est un raccord tubulaire destiné à servir de raccord entre plusieurs tubes coaxiaux, en particulier entre un tube à double paroi et un tube à simple paroi, par exemple dans un pipeline. Un tel raccord est appelé « bulkhead » en anglais. Le « bulkhead » est une pièce connue dans le domaine des pipelines.

Essais

Les alliages des essais n°1 à 22 ont été élaborés sous vide et coulés en mini-lingots d'approximativement 2 kg. Ces lingots ont été usinés en barres de 35 mm de côté et 100 mm de hauteur. Ces barres ont ensuite été réchauffées à 1220 °C pendant 8h sous argon, puis laminées à chaud à approximativement 1150 °C pour obtenir des largets de 750x35x4 mm.

Les compositions chimiques, en % en poids, des éléments d'alliage des largets obtenus sont définies dans le Tableau 1 ci-dessous. Les teneurs massiques approximatives des largets en impuretés résultant de l'élaboration sont indiquées au Tableau 2 ci-dessous.

N°	Ni	Mn	Cu	C	Si	Fe
<u>1</u>	<u>35,9</u>	<u>0,14</u>	0,01	<u>0,001</u>	0,10	Reste
<u>2</u>	<u>36,0</u>	<u>0,35</u>	0,01	<u>0,029</u>	0,10	Reste
<u>3</u>	<u>36,0</u>	<u>0,46</u>	0,01	<u>0,035</u>	0,10	Reste
4	36,5	0,53	0,01	0,041	0,10	Reste
5	37,4	0,56	0,01	0,046	0,10	Reste
6	38,4	0,54	0,01	0,051	0,10	Reste
<u>7</u>	<u>39,5</u>	0,56	0,01	0,047	0,10	Reste
<u>8</u>	<u>36,0</u>	<u>0,11</u>	0,01	<u>0,035</u>	0,10	Reste
9	36,6	0,77	0,01	0,057	0,10	Reste
10	37,0	1,00	0,01	0,053	0,10	Reste
11	36,9	1,23	0,01	0,043	0,10	Reste
12	37,0	1,24	0,01	0,045	0,10	Reste
<u>13</u>	<u>37,0</u>	<u>1,48</u>	0,01	0,046	0,10	Reste
14	36,6	0,58	0,25	0,072	0,10	Reste
15	36,7	0,59	0,49	0,080	0,10	Reste
16	36,6	0,61	0,83	0,069	0,10	Reste
<u>17</u>	<u>37,0</u>	0,50	<u>0,99</u>	0,071	0,10	Reste
18	37,0	0,50	0,36	0,071	0,10	Reste
19	37,0	0,53	0,34	0,092	0,10	Reste
20	37,1	0,53	0,36	0,094	0,10	Reste
21	37,0	0,53	0,37	0,146	0,10	Reste
<u>22</u>	<u>37,0</u>	0,50	0,34	<u>0,195</u>	0,10	Reste

Tableau 1 : Compositions des largets (en % en poids)

Dans le Tableau 1 ci-dessus, les exemples non conformes à l'invention sont soulignés.

S	P	Al	Mg	Ca	Cr	Co	O	Mo
0,0003	0,0080	0,0050	0,0015	0,0004	< 0,5	< 0,5	< 0,0025	< 0,5

Tableau 2 : Teneurs massiques approximatives des largets en impuretés résultant de l'élaboration (en % en poids)

Des éprouvettes prismatiques de traction plane (2 par composition, selon la norme ASTM A370_Juillet 2019), et des éprouvettes dilatométriques cylindriques de 3 mm de diamètre et 50 mm de longueur (1 par composition) ont alors été usinées dans les larges
5 ainsi fabriqués afin de constituer les éprouvettes test pour l'étude de sensibilité à la fragilisation par hydrogène et les mesures de dilatation thermique.

Dans un premier temps, les éprouvettes de traction ont été soumises à un traitement thermique sous hydrogène pur à 99,999% pendant 4 heures à 1100°C, suivi d'un refroidissement rapide réalisé dans la zone froide du four. La durée du
10 refroidissement a été approximativement de 45 secondes. L'objectif de ce traitement thermique est de charger les éprouvettes en hydrogène atomique (H).

Dans un deuxième temps, les éprouvettes de traction (chargées en hydrogène) ont été pré-déformées à deux températures différentes avec une vitesse de déformation de 5.10^{-3} s^{-1} :

15 • Epreuves A, pré-déformées de 10% à la température de l'Hélium liquide (-268 °C). L'objectif de la pré-déformation à -268°C est de développer plus ou moins de martensite, en fonction de la stabilité de l'alliage, et dans des conditions thermiques plus sévères que celles de l'hydrogène liquide (-253°C).

20 • Epreuves B, pré-déformées de 10% à température ambiante (20°C). L'objectif de la pré-déformation de 10% à température ambiante est de fournir des éprouvettes de référence, dénuées de martensite, mais présentant le même taux de déformation que celles déformées à -268°C, et susceptible de présenter de la martensite. Ces éprouvettes fourniront l'état de référence non fragile.

Enfin, les éprouvettes A et B ont été déformées par traction plane jusqu'à rupture, avec une vitesse de déformation lente de 5.10^{-5} s^{-1} , à -50°C (+/- 5 °C). L'essai ainsi réalisé est nommé « traction lente et rupture à -50°C ». La durée entre le chargement en
25 hydrogène et l'essai de traction lente à -50 °C n'a jamais excédé 48h.

La sensibilité à l'hydrogène des éprouvettes ainsi testées par traction lente et rupture à -50°C a été évaluée par la mesure de l'allongement total à rupture A%, et de la striction $Z\% = (S_0 - S)/S_0$, mesurée au microscope optique à x25. S_0 et S sont respectivement les sections initiales avant pré-déformation, et ultimes au diamètre le plus
30 étroit. Les résultats de ces mesures sont indiqués dans les colonnes « A% » et « Z% » pour les éprouvettes A et B dans le Tableau 3 ci-dessous.

Par ailleurs, la dilatation des alliages ΔL a été mesurée au refroidissement entre
35 0°C et -196°C (température de l'azote liquide), puis le coefficient moyen de dilatation thermique $\alpha[-196^\circ\text{C}_0^\circ\text{C}]$ entre -196°C et 0°C a été calculé suivant l'expression : $\alpha[-$

17

$196^{\circ}\text{C}_{-0^{\circ}\text{C}} = 1/L_0 \times \Delta L/\Delta T$, où $\Delta T = 0 - (-196)$ et L_0 est la longueur initiale de l'éprouvette (50 mm). Les résultats de ces mesures et calculs sont indiqués dans la colonne « α » du Tableau 3 ci-dessous.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 3 ci-dessous.

5

N°	α [$-196^{\circ}\text{C}_{-0^{\circ}\text{C}}$] ($\times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Eprouvette A		Eprouvette B	
		A%	Z%	A%	Z%
<u>1</u>	1,3	<u>6</u>	<u>10</u>	19	90
<u>2</u>	1,6	<u>8</u>	<u>15</u>	18	88
<u>3</u>	1,8	<u>10</u>	<u>45</u>	17	80
4	2,0	15	85		
5	2,5	17	75		
6	3,0	18	88		
<u>7</u>	<u>3,6</u>	18	88		
<u>8</u>	1,3	<u>10</u>	<u>25</u>	16	85
9	2,3	13	70		
10	2,7	14	75		
11	2,9	15	85		
12	3,0	17	86		
<u>13</u>	<u>3,2</u>	17	85		
14	2,4	17	85	17	85
15	2,6	16	83		
16	2,9	18	83		
<u>17</u>	<u>3,2</u>	18	83		
18	2,6	17	85	18	88
19	2,6	17	86		
20	2,7	18	86		
21	2,6	18	80		
<u>22</u>	2,6	17	88		

Tableau 3 : Résultats des essais

Dans le Tableau 3 ci-dessus, les exemples non conformes à l'invention sont soulignés.

10 Pour les compositions n°3 à n°7, la référence pour les essais de traction est l'éprouvette B correspondant à la composition n°3. En effet, au sein de ce groupe de compositions, on a considéré que la ductilité après « traction lente et rupture à -50°C » était indépendante de la composition.

15 De même, pour les compositions n°8 à 13, la référence pour les essais de traction est l'éprouvette B correspondant à la composition n°8, pour les compositions n°14 à 17, la référence pour les essais de traction est l'éprouvette B correspondant à la composition n°14 et pour les compositions n°18 à 22, la référence pour les essais de traction est l'éprouvette B correspondant à la composition n°18.

Dans le cas des essais n°1, 2, 3 et 8, dans lesquels les teneurs en Ni, Mn, C et/ou Cu sont inférieures aux bornes inférieures décrites ci-dessus pour ces éléments, on observe que les éprouvettes A présentent une fragilisation par hydrogène caractérisée par un faible allongement à rupture A ($A \leq 10\%$) et une striction trop faible ($Z \leq 50\%$).

5 Les éprouvettes B, de référence, pré-déformées de 15% à température ambiante, affichent une ductilité normale avec $A\% \sim 18\%$ et $Z\% \sim 88\%$.

Dans le cas des essais n°7, 13 et 17, dans lesquels les teneurs en Ni, Mn, et/ou Cu sont supérieures aux bornes supérieures décrites ci-dessus pour ces éléments, on observe que les coefficients moyens de dilatation thermique α entre -196°C et 0°C présentent une valeur dégradée supérieure à $3,0 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$.

10 L'essai n°22 est non-conforme dans la mesure où la teneur en carbone est trop élevée ($C > 0,150\%$). Dans ce cas, les inventeurs ont observé que l'alliage perd en soudabilité par formation de porosités lors du soudage TIG sans fil d'apport. En effet, la présence de carbone génère alors de l'effervescence durant les opérations de soudage TIG sans fil d'apport.

15 Dans le cas des essais n°4 à 6, 9 à 12, 14 à 16 et 18 à 21, qui sont conformes à l'invention, on obtient un compromis satisfaisant de propriétés entre faible dilatation thermique (coefficient moyen de dilatation thermique α entre -196°C et 0°C supérieur ou égal à $2,0 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ et inférieur ou égal à $3,0 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$) et résistance à la fragilisation par hydrogène (allongement à rupture A supérieur à 10% et striction Z supérieure à 50%).

20 Ces alliages présentent donc de bonnes propriétés mécaniques à la température de l'hydrogène liquide (-253°C), associées à un faible coefficient moyen de dilatation thermique α entre -196°C et 0°C .

25 Les alliages selon l'invention sont donc particulièrement adaptés pour être utilisés dans des applications utilisant de l'hydrogène liquide (-253°C), et notamment pour fabriquer des assemblages destinés à contenir de l'hydrogène, et notamment des tubes de transport ou des cuves de transport ou de stockage d'hydrogène liquide. Bien entendu, ces alliages peuvent également être utilisés pour des applications cryogéniques moins contraignantes que celles concernant l'hydrogène liquide, par exemple pour le transport ou le stockage de gaz liquéfiés présentant une température d'ébullition supérieure à celle de l'hydrogène liquide.

30

REVENDICATIONS

1. Alliage fer-nickel présentant la composition suivante, en pourcentage en poids :
- 5 $36,5\% \leq \text{Ni} \leq 38,5\%$
 $0,50\% \leq \text{Mn} \leq 1,25\%$
 $0,001\% \leq \text{Cu} \leq 0,85\%$
 $0,040\% \leq \text{C} \leq 0,150\%$
 $0,10\% \leq \text{Si} \leq 0,35\%$
- 10 le reste étant du fer et des impuretés inévitables résultant de l'élaboration.
2. Alliage selon la revendication 1, dans lequel la teneur en carbone est comprise entre 0,040% en poids et 0,075% en poids.
3. Alliage selon l'une des revendications 1 ou 2, dans lequel les impuretés inévitables résultant de l'élaboration comprennent, en pourcentage en poids :
- 15 $\text{Cr} \leq 0,5\%$
 $\text{Co} \leq 0,5\%$
20 $\text{S} \leq 0,0035\%$
 $\text{P} \leq 0,01\%$
 $\text{Mo} \leq 0,5\%$
 $\text{O} \leq 0,0025\%$
 $\text{Ca} \leq 0,0015\%$
25 $\text{Mg} \leq 0,0035\%$
 $\text{Al} \leq 0,0085\%$.
4. Bande à froid réalisée dans l'alliage selon l'une des revendications 1 à 3.
5. Procédé de fabrication d'une bande à froid selon la revendication 4, comprenant les étapes successives suivantes :
- 30 - on élabore un alliage selon l'une des revendications 1 à 3;
 - on forme un demi-produit dudit alliage ;
 - on lamine à chaud ce demi-produit afin d'obtenir une bande à chaud ;
35 - on lamine à froid la bande à chaud en une ou plusieurs passes pour obtenir une bande à froid.

6. Utilisation de l'alliage selon l'une des revendications 1 à 3, pour fabriquer des cuves ou des tubes destinés à recevoir un gaz liquéfié.
- 5 7. Fil d'apport réalisé dans un alliage selon l'une des revendications 1 à 3.
8. Procédé de fabrication d'un fil d'apport selon la revendication 7, le procédé comprenant les étapes suivantes :
- 10 - fourniture d'un demi-produit réalisé dans un alliage selon l'une des revendications 1 à 3;
- transformation à chaud de ce demi-produit pour former un fil intermédiaire ; et
- 15 - transformation du fil intermédiaire en fil d'apport, de diamètre inférieur à celui du fil intermédiaire, ladite transformation comprenant une étape de tréfilage.
9. Pièce (40) ou partie de pièce réalisée dans un alliage selon l'une des revendications 1 à 3, ladite pièce (40) ou partie de pièce étant obtenue par fabrication additive métallique.
- 20 10. Procédé de fabrication d'une pièce (40) ou d'une partie de pièce, comprenant une étape de fabrication de ladite pièce (40) ou partie de pièce par un procédé de fabrication additive métallique utilisant, en tant que matériau d'apport, un fil d'apport réalisé dans l'alliage selon l'une des
- 25 revendications 1 à 3 et/ou une poudre réalisée dans l'alliage selon l'une des revendications 1 à 3.
11. Utilisation du fil d'apport selon la revendication 7 comme fil d'apport dans le cadre d'un procédé de fabrication additive métallique.
- 30 12. Poudre métallique réalisée dans un alliage selon l'une des revendications 1 à 3.
13. Procédé de fabrication d'une poudre métallique selon la revendication 12, ledit procédé comprenant une étape de fourniture d'un fil d'apport selon la
- 35

revendication 7, ainsi qu'une étape d'atomisation plasma de ce fil d'apport pour obtenir la poudre métallique.

- 5 **14.** Tronçon de tube (1 ;7) réalisé dans un alliage selon l'une des revendications 1 à 3, ledit tronçon de tube étant de préférence sans soudure.
- 10 **15.** Tronçon de tube (7) selon la revendication 14, comprenant une tôle (9) repliée en forme de tube et réalisée dans un alliage selon l'une des revendications 1 à 3, la tôle (9) présentant des bords longitudinaux (12) reliés entre eux par un cordon de soudure (15).
- 15 **16.** Procédé de fabrication d'un tronçon de tube (7) selon la revendication 15, comprenant les étapes successives suivantes :
- fourniture d'une tôle (1) réalisée dans un alliage selon l'une des revendications 1 à 3 et présentant deux bords longitudinaux (3) ; et
- soudage entre eux des bords longitudinaux (3) de la tôle (1) pour former le tronçon de tube (7).
- 20 **17.** Tube (20) comprenant au moins deux tronçons de tube (1 ; 7) selon l'une quelconque des revendications 14 ou 15, deux tronçons de tube (1 ; 7) successifs étant liés entre eux par un cordon de soudure (22).
- 25 **18.** Procédé de fabrication d'un tube (20) comprenant les étapes successives suivantes :
- fourniture d'un premier tronçon de tube (1 ; 7) selon l'une des revendications 14 ou 15 et d'un deuxième tronçon de tube (5) selon l'une des revendications 14 ou 15, le premier tronçon de tube (1 ;7) et le deuxième tronçon de tube (1 ;7) s'étendant suivant un axe longitudinal (M),
30 - positionnement des premier et deuxième tronçons de tube (1 ;7) de telle sorte qu'une extrémité longitudinale (24) du premier tronçon de tube (1 ;7) soit disposée en regard d'une extrémité longitudinale (24) du deuxième tronçon de tube (1 ;7) selon l'axe longitudinal (M) des premier et deuxième tronçons de tube (1 ;7) ; et
35 - soudage entre elles de deux extrémités longitudinales (24) en regard des premier et deuxième tronçons de tube (1 ;7).

19. Partie de cuve comprenant au moins une partie réalisée dans un alliage selon l'une des revendications 1 à 3.

5 **20.** Bande à chaud réalisée dans l'alliage selon l'une des revendications 1 à 3.

21. Procédé de fabrication d'une bande à chaud selon la revendication 20, comprenant les étapes successives suivantes :

- 10 - on élabore un alliage selon l'une des revendications 1 à 3;
 - on forme un demi-produit dudit alliage ;
 - on lamine à chaud ce demi-produit afin d'obtenir une bande à chaud.

15