

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①① N° de publication : **3 130 020**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : **21 12871**

⑤① Int Cl⁸ : **F 28 F 21/08** (2022.01), B 23 P 19/02, B 23 P 15/26

①②

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ Procédé de fabrication d'une paroi d'échange de chaleur à double couche.

②② Date de dépôt : 02.12.21.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 09.06.23 Bulletin 23/23.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 17.11.23 Bulletin 23/46.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public — FR.*

⑦② Inventeur(s) : SORNIN Denis.

⑦③ Titulaire(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public.*

⑦④ Mandataire(s) : BREVALEX.

FR 3 130 020 - B1



Description

Titre de l'invention : Procédé de fabrication d'une paroi d'échange de chaleur à double couche

Domaine technique

- [0001] La présente invention se rapporte à un procédé de fabrication d'une paroi d'échange de chaleur à double couche, cette paroi à double couche étant notamment destinée à équiper des dispositifs du type échangeurs de chaleur.
- [0002] De tels échangeurs de chaleur trouvent une application dans l'industrie chimique ou dans le domaine de l'énergie.

État de la technique antérieure

- [0003] Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs permettant de transférer de l'énergie thermique d'un premier fluide vers un second fluide, sans les mélanger.
- [0004] Différents types d'échangeurs de chaleur à deux fluides existent parmi lesquels ceux qui sont équipés d'une paroi d'échange de chaleur dite "à double couche" qui comprend deux couches qui sont d'épaisseur différente ou identique et destinées à venir en contact chacune avec l'un des fluides caloporteurs.
- [0005] La structure particulière de la paroi à double couche présente l'avantage de conférer une sécurité renforcée à l'échangeur de chaleur qui en est équipé, dans la mesure où chaque couche assure, de manière redondante, une double fonction, à savoir la fonction d'étanchéité pour éviter que les deux fluides caloporteurs n'entrent en contact l'un avec l'autre et la fonction de résistance à la pression des fluides caloporteurs.
- [0006] Cette double fonction est particulièrement importante, par exemple dans les cas où l'échangeur de chaleur équipe des installations, comme des réacteurs chimiques, dans lesquelles il faut assurer, de manière sûre et efficace, l'échange de chaleur entre un premier fluide tel que des métaux ou sels métalliques fondus réactifs, par exemple à base de sodium, du lithium ou de potassium, et un second fluide tel que de l'eau. En effet, toute défaillance de la paroi d'échange de chaleur équipant de telles installations engendrerait de graves conséquences sur l'exploitation en raison de la réactivité chimique du caloporteur avec le milieu à refroidir. Dans ce cas précis, les sollicitations en service, en sus de la pression statique des fluides et de la corrosion des surfaces, découlent des contraintes d'origine thermique et des sollicitations de fatigue imposées par les cycles de fonctionnement ou les vibrations induites par la thermo-hydraulique.
- [0007] La plupart des parois d'échange de chaleur à double couche envisagent de laisser un jeu mécanique, ou interstice, entre les deux couches.
- [0008] En reliant cet interstice à un système de détection, il devient alors possible de détecter la présence de fluide provenant du perçage de l'une des deux couches avant

que l'intégrité de la seconde ne soit altérée.

- [0009] Toutefois, la présence de cet interstice est particulièrement pénalisante au regard des propriétés de conductivité thermique de la paroi d'échange de chaleur et ne permet, en outre, pas de répondre de manière efficace à un hypothétique perçage simultané de la première couche et de la seconde couche le constituant.
- [0010] Pour améliorer la conductivité thermique des parois d'échange de chaleur à double couche, il a été proposé de combler au moins partiellement l'interstice existant entre la première couche et la deuxième couche.
- [0011] Ainsi, le document US 2013/0205861, référencé [1] dans la suite de la présente description, propose un procédé de fabrication d'une paroi d'échange de chaleur formée par un tube à double couche dans lequel, après une étape de polissage de la surface interne du tube externe ainsi que de la surface externe du tube interne, on interpose des fils tressés dans l'interstice formé par les tubes externe et interne puis on réalise un étirage ainsi qu'un traitement thermique.
- [0012] Le document CN 203928838, référencé [2], propose un procédé de fabrication d'une paroi d'échange de chaleur également formée par un tube à double couche qui comprend une étape consistant à combler l'interstice entre les tubes interne et externe par une poudre métallique. En assurant une distribution radiale de la température, cette poudre métallique confère une bonne conductivité thermique au tube à double couche et permet également d'atténuer les risques de dégradation liés aux brusques transitions thermiques.
- [0013] Le document US 2013/070889, référencé [3], propose un procédé de fabrication d'un tube à double couche mettant en œuvre une étape d'usinage à froid d'un ensemble formé par un tube interne inséré à l'intérieur d'un tube externe dans lequel :
- soit le tube externe, qui est en acier ferritique avec au moins 2 % en mass
- [0014] e de chrome, comprend, au niveau de sa surface interne, une couche d'oxyde de calamine contenant du chrome d'épaisseur comprise entre 10 μm et 30 μm et le tube interne, qui est en acier ou en un alliage avec au moins 2 % en masse de chrome, comprend, au niveau de sa surface externe qui est usinée et/ou rectifiée sur une épaisseur d'au moins 0,1 mm, une couche de calamine,
- [0015] - soit le tube interne, qui est en acier ferritique avec au moins 2 % en masse de chrome, comprend, au niveau de sa surface externe, une couche d'oxyde de calamine contenant du chrome d'épaisseur comprise entre 10 μm et 30 μm et le tube externe, qui est en acier ou en un alliage avec au moins 2 % en masse de chrome, comprend, au niveau de sa surface interne qui est usinée et/ou rectifiée sur une épaisseur d'au moins 0,1 mm, une couche de calamine.
- [0016] L'étape d'usinage à froid mise en œuvre dans le procédé du document [3] est réalisée de manière à atteindre un taux de réduction de 5 % à 30 % de l'épaisseur extérieure.

[0017] S'ils améliorent les propriétés de conductivité thermique des tubes à double couche, les procédés de fabrication décrits dans les documents [1] à [3] présentent des conductivités thermiques trop pénalisantes pour l'exploitation visée.

[0018] Le but de la présente invention est, par conséquent, de proposer un procédé permettant de fabriquer une paroi d'échange de chaleur à double couche qui présente la double fonction d'étanchéité et de résistance à la pression des fluides caloporteurs, notamment en résistant à la propagation des défauts de fatigue, cette paroi d'échange à double couche offrant alors un maximum de garanties d'intégrité en service pour une pénalisation en conductivité thermique minimale.

Exposé de l'invention

[0019] Le but précédemment énoncé ainsi que d'autres sont atteints par un procédé de fabrication d'une paroi d'échange de chaleur à double couche comprenant une première couche et une seconde couche, les première et seconde couches étant métalliques.

[0020] Selon l'invention, le procédé de fabrication comprend les étapes (i) à (v), et éventuellement (vi), successives suivantes :

(i) la fourniture :

. d'une première tôle destinée à former la première couche et présentant une épaisseur e_1 ,

. d'une seconde tôle destinée à former la seconde couche et présentant une épaisseur e_2 , et

d'un feuillard de fer Fe^0 présentant une épaisseur e_3 comprise entre 10 μm et 100 μm et, avantageusement, comprise entre 50 μm et 100 μm ;

(ii) l'assemblage des première et seconde tôles et du feuillard de fer Fe^0 , le feuillard étant intercalé entre les première et seconde tôles ;

(iii) le pressage mécanique de l'assemblage obtenu à l'issue de l'étape précédente sous une pression minimale de 1 MPa ;

[0021] (iv) la soudure périphérique de l'assemblage pressé obtenu à l'issue de l'étape (iii) ;

(v) le traitement thermique de l'assemblage soudé obtenu à l'issue de l'étape (iv), ce traitement thermique étant réalisé par compression isostatique à chaud conduite à une température comprise entre 800 °C et 1200 °C, à une pression comprise entre 10^8 Pa et 2.10^8 Pa, pendant une durée comprise entre 1 h et 3 h ;

et, le cas échéant,

[0022] (vi) un traitement complémentaire tel qu'un cintrage, un pliage, une trempe, un revenu normalisé ou un recuit.

[0023] Le procédé selon l'invention permet de former, entre les première et seconde couches, une interphase métallique en fer pur. Cette interphase, qui est ductile et dense et qui comble tout le volume initial de l'interstice existant entre les première et seconde

tôles, permet ainsi d'assurer une jonction mécanique uniforme entre les première et seconde couches. L'absence de jeu entre ces première et seconde couches permet d'éviter le mouvement de ces deux couches l'une par rapport à l'autre : ces deux couches ne formant plus qu'une seule paroi, elles se déforment alors de la même manière qu'une paroi monolithique lors d'une sollicitation mécanique ou mise en forme ultérieure. Grâce au procédé de fabrication selon l'invention, on obtient une paroi à double couche présentant une qualité géométrique ne nécessitant pas de calibrage après l'étape de traitement thermique par compression isostatique à chaud.

- [0024] L'interphase métallique en fer pur permet également de conférer à la paroi à double couche d'excellentes propriétés de conductivité thermique en assurant un très bon transfert thermique entre les première et seconde couches, ce qui a pour effet d'augmenter le rendement d'un échangeur thermique équipé d'une telle paroi à double couche. De manière inattendue et surprenante, les Inventeurs ont constaté que cette interphase ductile et dense en fer Fe^0 assure une conductivité thermique qui est supérieure ou égale à 80 % de la conductivité thermique d'une paroi équivalente massive, voire supérieure à 95 % dans la cas particulier de la mise en œuvre du feuillard de fer Fe^0 .
- [0025] Cette ductilité de l'interphase métallique en fer permet également de dévier et/ou d'arrêter la propagation des fissures de fatigue, en particulier de fatigue à grand nombre de cycles, qui se seraient formées et propagées au sein de l'une des deux couches, préservant ainsi l'intégrité de l'autre couche. En particulier, lorsque les fissures de fatigue sont déviées, elles se propagent dans l'interphase métallique ductile offrant ainsi une durée de vie prolongée de 30 % à température ambiante.
- [0026] Cette interphase en fer se caractérise, en outre, par une étanchéité lui permettant d'éviter la propagation capillaire de fluide provenant d'une telle fissure entre les deux couches.
- [0027] Le procédé selon l'invention permet de fabriquer une paroi à double couche présentant une épaisseur e_{tot} .
- [0028] Le procédé selon l'invention comprend les étapes (i) à (v), et éventuellement (vi), mentionnées ci-dessus et détaillées ci-après.
- [0029] Lors de l'étape (i) du procédé de fabrication selon l'invention, on fournit deux tôles, une première tôle qui est destiné à former la première couche de la paroi à double couche, et une seconde tôle qui est destinée à former la seconde couche de cette même paroi à double couche.
- [0030] La première tôle présente une épaisseur, notée e_1 , tandis que la seconde tôle présente une épaisseur, notée e_2 .
- [0031] Selon un mode de réalisation, l'épaisseur e_1 de la première tôle et l'épaisseur e_2 de la seconde tôle sont chacune comprises entre 1 mm et 30 mm, avantageusement

comprises entre 1 mm et 5 mm et, préférentiellement, comprises entre 1 mm et 2 mm. Toutefois, bien que comprises dans des intervalles de valeurs identiques, les épaisseurs e_1 et e_2 des première et seconde tôles ne sont pas nécessairement identiques.

- [0032] Il est précisé que l'expression "entre ... et ..." qui est utilisée ci-dessus mais également dans la suite de la présente description pour définir un intervalle, doit être comprise comme définissant non seulement les valeurs de l'intervalle, mais également les valeurs des bornes de cet intervalle.
- [0033] Lors de l'étape (i) du procédé de fabrication selon l'invention, on fournit également un feuillard qui est constitué de fer au degré d'oxydation 0, c'est-à-dire de fer pur Fe^0 .
- [0034] Ce feuillard de fer Fe^0 présente une épaisseur, notée e_3 , qui est comprise entre 10 μm et 100 μm et, avantageusement, comprise entre 50 μm et 100 μm .
- [0035] Le procédé de fabrication selon l'invention comprend, après l'étape (i), une étape (ii) d'assemblage des première et seconde tôles et du feuillard de fer Fe^0 , le feuillard étant intercalé entre les première et seconde tôles.
- [0036] En d'autres termes, à l'issue de l'étape (ii), on obtient un assemblage dans lequel le feuillard de fer Fe^0 est pris en sandwich entre les première et seconde tôles.
- [0037] Dans une variante de mise en œuvre du procédé de fabrication selon l'invention, les étapes (i) et (ii) qui viennent d'être décrites peuvent être respectivement remplacées par les étapes (i') et (ii') suivantes :
- (i') la fourniture :
- . d'une première tôle destinée à former la première couche et présentant une épaisseur e_1 , et
 - . d'une seconde tôle destinée à former la seconde couche et présentant une épaisseur e_2 , cette seconde tôle comprenant, sur l'une de ses surfaces, un revêtement de fer Fe^0 ; et
- [0038] (ii') l'assemblage de la première tôle et de la seconde tôle revêtue, le revêtement de fer Fe^0 étant placé entre les première et seconde tôles.
- [0039] Lors de l'étape (i') de cette variante du procédé de fabrication selon l'invention, on fournit deux tôles, une première tôle qui est destinée à former la première couche de la paroi à double couche, et une seconde tôle qui est destinée à former la seconde couche de cette même paroi à double couche.
- [0040] Comme précédemment, la première tôle présente une épaisseur, notée e_1 , tandis que la seconde tôle présente une épaisseur, notée e_2 .
- [0041] Selon un mode de réalisation, l'épaisseur e_1 de la première tôle et l'épaisseur e_2 de la seconde tôle sont chacune comprises entre 1 mm et 30 mm, avantageusement comprises entre 1 mm et 5 mm et, préférentiellement, comprises entre 1 mm et 2 mm. Comme déjà indiqué précédemment, bien que comprises dans des intervalles de valeurs identiques, les épaisseurs e_1 et e_2 des première et seconde tôles ne sont pas nécessairement identiques.

[0042] Dans cette variante, la seconde tôle comprend, sur l'une de ses surfaces, un revêtement de fer au degré d'oxydation 0, c'est-à-dire de fer pur Fe^0 .

[0043] Ce revêtement de fer Fe^0 présente une épaisseur, notée e_3 , comprise entre 10 μm et 100 μm et, avantageusement, comprise entre 50 μm et 100 μm .

[0044] En d'autres termes, la seconde tôle revêtue présente une épaisseur, notée e_2 , telle que
[Chem 1]

$$e_2' = e_2 + e_3$$

Selon un mode de réalisation de cette variante du procédé de fabrication selon l'invention, le revêtement de fer Fe^0 est obtenu par projection à froid ("cold spray" selon la terminologie anglo-saxonne) de poudre de fer Fe^0 sur l'une des surfaces de la seconde tôle.

[0045] Dans cette variante, le procédé de fabrication selon l'invention comprend, après l'étape (i'), une étape (ii') d'assemblage de la première tôle et de la seconde tôle revêtue, le revêtement de fer Fe^0 étant placé entre les première et seconde tôles.

[0046] En d'autres termes, à l'issue de l'étape (ii'), on obtient un assemblage dans lequel le revêtement de fer Fe^0 est positionné entre les première et seconde tôles.

[0047] Le choix de la mise en œuvre d'un feuillard de fer Fe^0 de 10 μm à 100 μm d'épaisseur tout comme celui de la réalisation, par projection à froid, d'un revêtement de fer Fe^0 de 10 μm à 100 μm d'épaisseur permet de créer, entre les première et seconde couches, une interphase ductile en fer Fe^0 . Cette interphase ductile en fer Fe^0 permet de ralentir et de dévier, de manière significative, la vitesse de propagation de fissures de fatigue qui se seraient formées au sein de l'une de ces deux couches et, par conséquent, d'augmenter jusqu'à 30 % la durée de vie en fatigue de l'autre couche (non endommagée) et, partant, de la paroi à double couche fabriquée par le procédé selon l'invention.

[0048] Comme on le verra dans les exemples ci-après, le choix se portera avantageusement sur la réalisation de l'interphase en fer à partir de l'intercalation d'un feuillard de fer Fe^0 qui permet d'obtenir une paroi à double couche présentant des propriétés mécaniques et de conductivité thermique qui sont supérieures à celles d'une paroi à double couche dans lequel l'interphase en fer est obtenue par projection à froid d'une poudre de fer Fe^0 .

[0049] Dans une variante avantageuse, le procédé selon l'invention comprend, en outre, une étape de nettoyage des surfaces de la première tôle et des surfaces de la seconde tôle ou de la seconde tôle revêtue, cette étape de nettoyage étant mise en œuvre préalablement à l'étape (ii) ou (ii') d'assemblage.

[0050] Dans une autre variante avantageuse, le procédé selon l'invention comprend, en outre, une étape de rectification de la première tôle et de la seconde tôle, éven-

tuellement revêtue, cette étape de rectification étant mise en œuvre préalablement à l'étape (ii) ou (ii') d'assemblage.

- [0051] Le procédé de fabrication selon l'invention comprend, après l'étape (ii) ou (ii') d'assemblage, une étape (iii) de pressage mécanique de l'assemblage obtenu à l'issue de l'étape (ii) ou (ii'), ce pressage mécanique étant exercé sous une pression minimale de 1 MPa.
- [0052] Le choix d'une telle étape (iii) de pressage mécanique présente l'avantage de réduire encore le volume de l'interstice existant entre la première tôle et la seconde tôle, éventuellement revêtue. Ce faisant, la quantité de gaz contenue entre ces deux tôles devient négligeable.
- [0053] Le procédé de fabrication selon l'invention comprend, après l'étape (iii) de pressage mécanique, une étape (iv) de soudure périphérique de l'assemblage tel qu'obtenu à l'issue de l'étape (iii). Ce faisant, on obtient une soudure du pourtour des première et seconde tôles.
- [0054] Cette étape (iv) de soudure, qui peut être conduite au moyen de n'importe quelle technique de soudure permettant d'obtenir une soudure étanche aux gaz, permet d'isoler l'interphase en fer Fe⁰ interposée entre les première et seconde tôles.
- [0055] L'étape (iv) de soudure peut notamment être réalisée par laser, par baguette, par faisceau d'électrons ou encore, et de manière avantageuse, par un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible, le cas échéant en présence d'un métal d'apport. Ce dernier type de soudure peut en particulier être réalisé par soudure TIG (TIG étant l'acronyme de l'expression anglaise "Tungsten Inert Gas") sans métal d'apport.
- [0056] La présence de l'interphase en fer Fe⁰ permet de ne pas affecter la composition des joints soudés ni la composition des première et seconde tôles qui conservent donc leurs propriétés mécaniques. Ce choix d'interphase en fer Fe⁰ permet, par conséquent, d'assurer un assemblage, au moyen d'une soudure fiable, des parois à double couche fabriquées par le procédé selon l'invention avec les structures d'un dispositif qu'elles sont destinées à équiper, par exemple avec celles d'un échangeur de chaleur. En effet, le fer Fe⁰ de l'interphase ne modifiant qu'à la marge la composition de la soudure périphérique, l'interphase n'altère, par conséquent, pas les propriétés mécaniques de cette soudure périphérique ainsi réalisée.
- [0057] Le procédé de fabrication selon l'invention comprend, à l'issue de l'étape (iv) de soudure, une étape (v) de traitement thermique de l'assemblage soudé tel qu'obtenu à l'issue de l'étape (iv).
- [0058] Cette étape (v) de traitement thermique est réalisée par compression isostatique à chaud (CIC) conduite à une température comprise entre 800 °C et 1200 °C, à une pression comprise entre 10⁸ Pa et 2.10⁸ Pa, pendant une durée comprise entre 1 h et 3 h.

- [0059] Cette étape (v) de compression isostatique à chaud permet de souder, par diffusion, la première tôle et la seconde tôle, éventuellement revêtue et, ce faisant, d'obtenir une jonction mécanique uniforme entre ces première et seconde tôles. À l'issue de l'étape (v) de compression isostatique à chaud, cette jonction mécanique uniforme est formée par l'interphase en fer Fe.
- [0060] Dans une variante avantageuse, le procédé selon l'invention comprend, en outre, au moins une étape de rectification de l'assemblage, cette ou ces étapes de rectification étant mises en œuvre préalablement à l'étape (iv) de soudure et/ou préalablement à l'étape (v) de traitement thermique.
- [0061] Dans une variante particulièrement avantageuse, le procédé selon l'invention ne comprend pas d'étape de dégazage entre l'étape (iii) de pressage mécanique et l'étape (iv) de soudure et/ou ne comprend pas d'étape de dégazage entre l'étape (iv) de soudure et l'étape (v) de traitement thermique.
- [0062] La suppression d'une ou de deux étapes de dégazage, qui sont particulièrement complexes à mettre en œuvre sur le plan industriel dans le cadre de la fabrication de parois à double couche, participe à une réduction significative des temps de cycles, coûts et délais de production.
- [0063] Le procédé selon l'invention permet de fabriquer des parois à double couche de longueurs et de géométries variables.
- [0064] Les matériaux du premier tube et du second tube (hors revêtement) peuvent être identiques ou différents. Ces matériaux peuvent notamment comprendre du fer.
- [0065] Dans une variante avantageuse, les première et seconde tôles sont réalisées en un matériau comprenant du fer, ce matériau étant avantageusement choisi parmi le fer Fe⁰ et un acier, par exemple de l'acier martensitique comme l'Eurofer-97.
- [0066] Dans une variante préférée, les matériaux des première et seconde tôles sont identiques.
- [0067] Dans une variante, le procédé selon l'invention comprend, en outre, au moins une étape (vi) de traitement complémentaire. Un tel traitement complémentaire (vi) a notamment pour but de conférer une forme spécifique et/ou des propriétés mécaniques particulières à la paroi à double couche fabriquée par le procédé selon l'invention.
- [0068] Ce traitement complémentaire (vi) peut, par exemple, être choisi parmi un cintrage, un pliage, une trempe, un revenu normalisé et un recuit, voire être une combinaison de traitements complémentaires (trempe suivie de revenu normalisé).
- [0069] Grâce à un tel traitement complémentaire (vi), la paroi à double couche peut, par exemple, être conformée en un tube de section circulaire, carrée ou rectangulaire.
- [0070] L'invention sera mieux comprise à la lumière du complément de description qui suit et qui se réfère aux figures 1 et 2 annexées.
- [0071] Il est précisé que ce complément de description n'est donné qu'à titre d'illustration de

l'objet de l'invention et qu'il ne doit en aucun cas être interprété comme une limitation de cet objet.

Brève description des dessins

[0072] [Fig.1] illustre l'évolution de la progression d'une fissure de fatigue (notée a et exprimée en mm), à température ambiante, en fonction du nombre de cycles (noté N) de deux parois à double couche conformes à l'invention (notées RS et CS) et d'une paroi similaire massive de référence (notée Massive).

[0073] [Fig.2] illustre l'évolution de la conductivité thermique équivalente (notée λ et exprimée en W/m.K) en fonction de la température (notée T et exprimée en K) de deux parois à double couche conformes à l'invention (notées RS et CS) et d'une paroi similaire massive de référence (notée Massive).

[0074] Exposé détaillé de modes de réalisation particuliers

[0075] 1. Fabrication de parois à double couche par le procédé selon l'invention et d'une paroi de référence

[0076] 1.1. Une première paroi à double couche, notée RS, a été fabriquée par le procédé selon l'invention.

[0077] On a procédé à un laminage de deux tôles en Eurofer-97 de manière à leur conférer une épaisseur de 6,00 mm (+0,0/-0,1 mm) pour la première tôle et une épaisseur de 4 mm (+0,0/-0,1 mm) pour la seconde tôle.

[0078] On a ensuite procédé à un laminage d'une tôle de fer métallique Fe⁰ jusqu'à obtenir un feuillard présentant une épaisseur de 100 μ m.

[0079] Après rectification puis nettoyage des surfaces des deux tôles, on a procédé à l'assemblage en sandwich des deux tôles et du feuillard par interposition de ce feuillard de fer métallique entre les première et seconde tôles.

[0080] On a ensuite procédé au pressage mécanique de l'assemblage en exerçant une pression de 1 MPa au moyen d'une presse puis à la soudure périphérique par TIG sur tout le pourtour de l'assemblage.

[0081] L'assemblage ainsi soudé a alors été soumis à un traitement thermique par réalisation d'un cycle de compression isostatique à chaud (CIC) conduite à une température de 1100 °C, à une pression de 1200 bar ($1,2 \cdot 10^8$ Pa), pendant 1 h, puis à des traitements thermiques complémentaires de trempé après un maintien à une température de 980 °C pendant 30 min et de revenu à 760 °C pendant 90 min.

[0082] À l'issue de ces traitements thermiques, on obtient la paroi à double couche RS.

[0083] 1.2. Une seconde paroi à double couche, notée CS, a été fabriquée par le procédé selon l'invention.

[0084] On a procédé à un laminage de deux tôles en Eurofer-97 de manière à leur conférer une épaisseur de 6,00 mm (+0,0/-0,1 mm) pour la première tôle et une épaisseur de

4 mm (+0,0/-0,1 mm) pour la seconde tôle.

- [0085] On a ensuite procédé à un dépôt par pulvérisation à froid (cold spray) d'une poudre de fer métallique sur l'une des surfaces de la seconde tôle de manière à former un revêtement de fer d'une épaisseur de plus de 100 μm .
- [0086] Après rectification du dépôt à une épaisseur de 100 μm puis nettoyage des surfaces des deux tôles, on a procédé à l'assemblage de la première tôle et de la seconde tôle revêtue, le revêtement de fer métallique étant positionné entre les première et seconde tôles.
- [0087] L'assemblage ainsi obtenu a ensuite été soumis aux étapes de pressage mécanique, de soudure, de traitement thermique par CIC et de traitements thermiques complémentaires décrites au chapitre 1.1. ci-dessus.
- [0088] À l'issue de ces traitements thermiques, on obtient la paroi à double couche CS.
- [0089] 1.3. Une paroi de référence, notée Massive, a également été réalisée.
- [0090] On a procédé à un laminage d'une tôle en Eurofer-97 de manière à lui conférer une épaisseur de 10,00 mm (+0,0/-0,1 mm).
- [0091] La tôle a ensuite été soumise aux étapes de traitement thermique par CIC et de traitements thermiques complémentaires décrites au chapitre 1.1. ci-dessus.
- [0092] À l'issue de ces traitements thermiques, on obtient la paroi de référence Massive.
- [0093] 2. Caractérisation des parois à double couche RS et CS et de la paroi de référence Massive
- [0094] 2.1. Des éprouvettes de flexion 10 x 10 x 55 mm ont été prélevées dans chacune des parois RS, CS et Massive. Une entaille de 2 mm, repérée par le point A sur la [Fig.1], a été pratiquée dans chacune des éprouvettes, respectivement notées RS, CS et Massive, afin de permettre l'amorçage d'une fissure de fatigue lors du chargement en fatigue.
- [0095] On a ensuite examiné la propagation de cette entaille en soumettant les éprouvettes à des cycles de sollicitations en flexion 3 points à contrainte maximale constante de 60% de la limite d'élasticité du matériau des tôles. Un effort minimal de 150 N est maintenu afin de ne pas décoller l'outillage de l'éprouvette. Le trajet de la fissure est suivi *in situ* par corrélation d'image.
- [0096] En référence à la zone marquée B sur la [Fig.1], on observe que les éprouvettes RS et CS conformes à l'invention se caractérisent par une propagation retardée de la fissure par rapport à celle des éprouvettes de référence Massive.
- [0097] En référence à la zone marquée C sur la [Fig.1], on note également que les éprouvettes RS et CS conformes à l'invention présentent une stagnation de la longueur de la fissure au niveau de l'interphase (distance de propagation de 6 mm). Ceci conduit à un accroissement de la durée de vie des parois à double couche RS et CS par rapport à celle de la paroi de référence Massive.
- [0098] Ces résultats mettent clairement en évidence que le choix d'une interphase ductile de

Fe⁰ permet de modifier nettement la vitesse de propagation des fissures et d'augmenter significativement la durée de vie en fatigue à la température ambiante de la couche non endommagée.

[0099] 2.2. On a mesuré la conductivité thermique de chacune des éprouvettes RS, CS et Massive.

[0100] En se reportant aux résultats illustrés sur la [Fig.2], on observe que les éprouvettes RS et CS fabriquées par le procédé conforme à l'invention présentent une conductivité thermique λ très proche de l'éprouvette de référence Massive et que ce coefficient de conductivité thermique représente au moins 80 % de la conductivité thermique de la paroi de référence Massive pour la paroi à double couche CS et près de 95 % pour la paroi à double couche RS.

Bibliographie

[0101] [1] US 2013/0205861 A1

[0102] [2] CN 203928838 U

[0103] [3] US 2013/070889 A1

Revendications

[Revendication 1]

Procédé de fabrication d'une paroi d'échange de chaleur à double couche comprenant une première couche et une seconde couche, les première et seconde couches étant métalliques, ce procédé de fabrication étant caractérisé en ce qu'il comprend les étapes (i) à (v), et éventuellement (vi), successives suivantes :

(i) la fourniture :

. d'une première tôle destinée à former la première couche et présentant une épaisseur e_1 ,

. d'une seconde tôle destinée à former la seconde couche et présentant une épaisseur e_2 , et

. d'un feuillard de fer Fe^0 présentant une épaisseur e_3 comprise entre $10\ \mu\text{m}$ et $100\ \mu\text{m}$ et, avantageusement, comprise entre $50\ \mu\text{m}$ et $100\ \mu\text{m}$;

(ii) l'assemblage des première et seconde tôles et du feuillard de fer Fe^0 , le feuillard étant intercalé entre les première et seconde tôles ;

(iii) le pressage mécanique de l'assemblage obtenu à l'issue de l'étape précédente sous une pression minimale de 1 MPa ;

(iv) la soudure périphérique de l'assemblage pressé obtenu à l'issue de l'étape (iii) ;

(v) le traitement thermique de l'assemblage soudé obtenu à l'issue de l'étape (iv), ce traitement thermique étant réalisé par compression isostatique à chaud conduite à une température comprise entre $800\ ^\circ\text{C}$ et $1200\ ^\circ\text{C}$, à une pression comprise entre $10^8\ \text{Pa}$ et $2 \cdot 10^8\ \text{Pa}$, pendant une durée comprise entre 1 h et 3 h ;

et, le cas échéant,

(vi) un traitement complémentaire tel qu'un cintrage, un pliage, une trempe, un revenu normalisé ou un recuit.

[Revendication 2]

Procédé selon la revendication 1, dans lequel les étapes (i) et (ii) sont respectivement remplacées par les étapes (i') et (ii') suivantes :

(i') la fourniture :

. d'une première tôle destinée à former la première couche et présentant une épaisseur e_1 , et

. d'une seconde tôle destinée à former la seconde couche et présentant une épaisseur e_2 , cette seconde tôle comprenant, sur l'une de ses surfaces, un revêtement de fer Fe^0 , ce revêtement présentant une

épaisseur e_3 comprise entre $10\ \mu\text{m}$ et $100\ \mu\text{m}$ et, avantageusement, comprise entre $50\ \mu\text{m}$ et $100\ \mu\text{m}$, la seconde tôle revêtue présentant une

- épaisseur e_2 , telle que $e_2 = e_2 + e_3$; et
(ii') l'assemblage de la première tôle et de la seconde tôle revêtue, le revêtement de fer Fe^0 étant placé entre les première et seconde tôles.
- [Revendication 3] Procédé selon la revendication 2, dans lequel le revêtement de fer Fe^0 est obtenu par projection à froid de poudre de fer Fe^0 sur l'une des surfaces de la seconde tôle.
- [Revendication 4] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel l'étape (iv) de soudure est réalisée par un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible, le cas échéant en présence d'un métal d'apport.
- [Revendication 5] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, comprenant, en outre, une étape de nettoyage des surfaces de la première tôle et des surfaces de la seconde tôle revêtue, cette étape de nettoyage étant mise en œuvre préalablement à l'étape (ii) ou (ii') d'assemblage.
- [Revendication 6] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, comprenant, en outre, une étape de rectification des première et seconde tôles, cette étape de rectification étant mise en œuvre préalablement à l'étape (ii) ou (ii') d'assemblage.
- [Revendication 7] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, comprenant, en outre, au moins une étape de rectification de l'assemblage, cette ou ces étapes de rectification étant mises en œuvre préalablement à l'étape (iv) de soudure et/ou préalablement à l'étape (v) de traitement thermique.
- [Revendication 8] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, lequel ne comprend pas d'étape de dégazage entre l'étape (iii) de pressage mécanique et l'étape (iv) de soudure et/ou entre l'étape l'étape (iv) de soudure et l'étape (v) de traitement thermique.
- [Revendication 9] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel les première et seconde tôles sont réalisées en un matériau comprenant du fer, ce matériau étant avantageusement choisi parmi le fer Fe^0 et un acier.
- [Revendication 10] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel les matériaux des première et seconde tôles sont identiques.
- [Revendication 11] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel les épaisseurs e_1 et e_2 des première et seconde tôles sont comprises entre 1 mm et 30 mm, avantageusement comprises entre 1 mm et 5 mm et, préférentiellement, comprises entre 1 mm et 2 mm.

[Fig. 1]

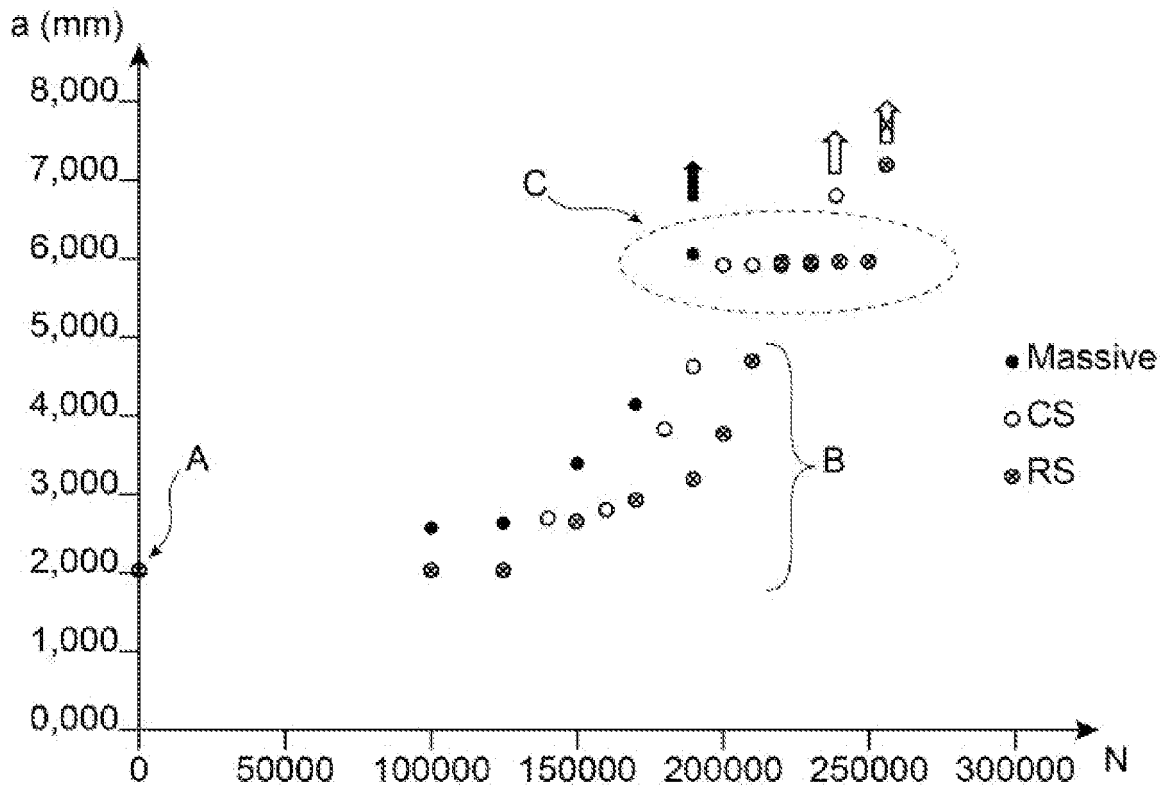


FIG. 1

[Fig. 2]

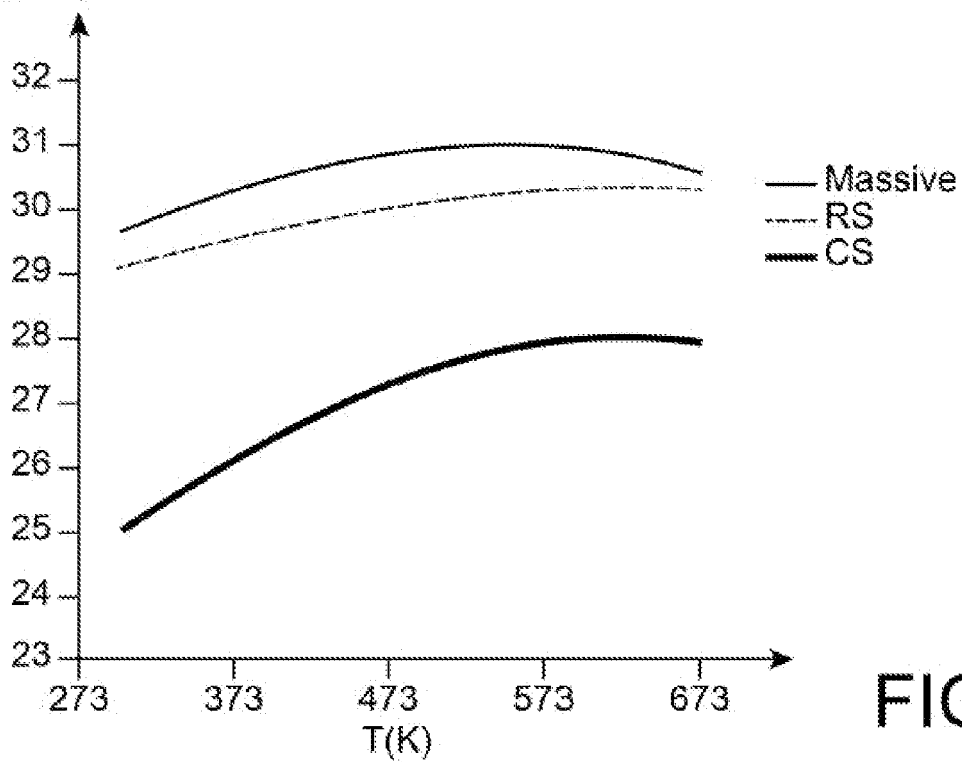
 λ (W/m.K)

FIG. 2

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN
CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

NEANT

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN
TECHNOLOGIQUE GENERAL**

GB 2 241 339 A (RUTHERFORD MATTHEW
STEPHEN) 28 août 1991 (1991-08-28)

US 2021/187906 A1 (LU QI [CN] ET AL)
24 juin 2021 (2021-06-24)

CN 111 347 146 A (SOUTHWESTERN INST
PHYSICS) 30 juin 2020 (2020-06-30)

EP 0 180 046 A2 (BUDERUS AG [DE])
7 mai 1986 (1986-05-07)

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND
DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT