



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
11.09.2019 Bulletin 2019/37

(51) Int Cl.:
C22B 9/00 (2006.01)
C22B 9/20 (2006.01)
C22B 9/04 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **19169956.0**

(22) Date de dépôt: **03.06.2015**

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR

(30) Priorité: **10.06.2014 FR 1455202**

(62) Numéro(s) de document de la (des) demande(s) initiale(s) en application de l'article 76 CBE:
15727949.8 / 3 155 137

(71) Demandeurs:
• **SAFRAN AIRCRAFT ENGINES**
75015 Paris (FR)
• **Safran Landing Systems**
78140 Vélizy-Villacoublay (FR)

(72) Inventeurs:
• **FERRER, Laurent**
77550 MOISSY-CRAMAYEL (FR)
• **BINOT, Nicolas**
77550 MOISSY-CRAMAYEL (FR)

(74) Mandataire: **Cabinet Beau de Loménie**
158, rue de l'Université
75340 Paris Cedex 07 (FR)

Remarques:

Cette demande a été déposée le 17-04-2019 comme demande divisionnaire de la demande mentionnée sous le code INID 62.

(54) **PROCÉDÉ POUR FABRIQUER UN LINGOT D'ACIER FAIBLEMENT ALLIÉ**

(57) L'invention concerne un procédé pour fabriquer un lingot d'acier faiblement allié comportant les étapes suivantes :

- a) fusion de tout ou partie d'une électrode par un procédé de refusion à l'arc sous vide, l'électrode comportant, avant fusion, du fer et du carbone, la partie fondue de l'électrode étant recueillie dans un creuset et formant ainsi au sein du creuset un bain fondu, et
- b) solidification du bain fondu par échange thermique entre le bain fondu et un fluide de refroidissement, l'échange thermique réalisé permettant d'imposer une vitesse moyenne de solidification durant l'étape b) inférieure ou égale à $45 \mu\text{m/s}$ et d'obtenir un lingot d'acier faiblement allié.

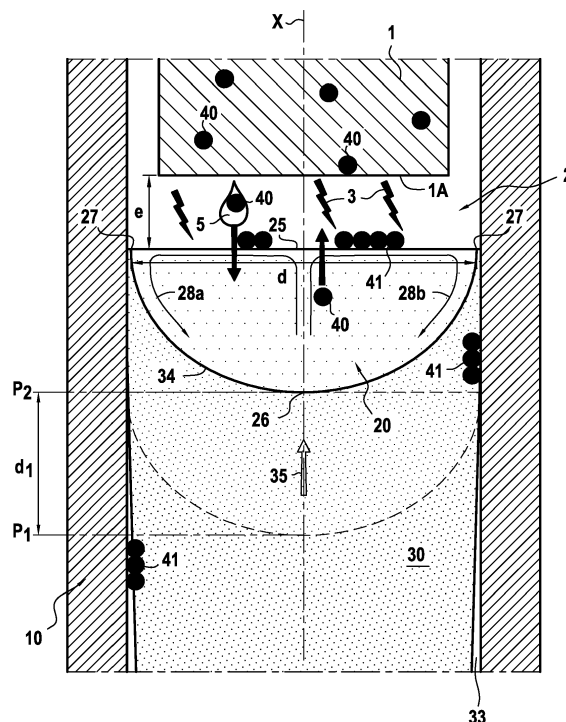


FIG.2

DescriptionArrière-plan de l'invention

- 5 **[0001]** L'invention concerne des procédés de fabrication de lingots d'aciers faiblement alliés et des pièces en acier pouvant être obtenues par de tels procédés.
- [0002]** Dans le cas des pièces mécaniques à forte intégrité qui sont sollicitées alternativement sous fortes contraintes, il peut être nécessaire de dimensionner suivant des courbes minimales enveloppant tous les résultats caractérisant les propriétés recherchées dont les propriétés de résistance à la fatigue. Or, les courbes minimales de dimensionnement dépendent non seulement de la valeur moyenne mais aussi de la dispersion de résultats. Cela est particulièrement vrai pour les pièces utilisées dans le domaine aéronautique avec lesquelles une analyse statistique est généralement prise en compte. Le fait de réduire la dispersion des résultats permet donc de remonter les courbes minimales de dimensionnement et, par conséquent, d'améliorer les performances des pièces, par exemple en permettant d'alléger les pièces, d'allonger leur durée de vie ou d'augmenter les contraintes auxquelles elles peuvent être exposées. La réduction de la dispersion des résultats permet avantageusement de conférer une différenciation technique concurrentielle ainsi qu'un gain économique en matière employée.
- 10 **[0003]** La durée de vie durant des sollicitations en fatigue oligo-cyclique peut dépendre d'une part de l'énergie consommée au moment de l'amorçage sur une des particules présentes dans le matériau métallique conduisant à une microfissuration et, d'autre part, de la propagation de la fissure.
- 20 **[0004]** Du fait d'un manque d'accommodation, certaines particules peuvent subir une fissuration prématurée, réduisant l'énergie d'amorçage et, par conséquent, la durée de vie par rapport à une matrice seule. La nature de la particule, sa forme, sa taille individuelle, sa distribution spatiale et sa tendance à se rassembler avec d'autres particules peuvent directement influencer sur la réduction de cette énergie d'amorçage. Une dispersion dans les types d'amorces peut induire une grande dispersion des réductions d'énergies d'amorçage et peut, par conséquent, abaisser d'autant plus la courbe enveloppant les points minimums (abaissement de la moyenne et accroissement de l'écart-type).
- 25 **[0005]** Cela peut particulièrement être le cas pour les aciers et, en particulier, pour les aciers faiblement alliés refondus. Il est connu de fabriquer des nuances d'aciers par refusion d'un métal dans un four à arc électrique sous vide (mise en oeuvre d'un procédé de refusion à l'arc sous vide ; en anglais : « Vacuum arc remelting »). Une telle étape permet d'améliorer la propreté inclusionnaire par un filtrage de certaines particules déjà présentes dans le métal avant cette refusion.
- 30 **[0006]** Dans le cas des aciers faiblement alliés, la présence de particules inclusionnaires de type sulfures et/ou oxydes, isolées, agglomérées ou alignées peut avoir une influence sur les durées de vie en fatigue oligo-cyclique. Les opérations précédant la refusion mises en oeuvre actuellement visent à tenter de minimiser la probabilité de présence de telles particules.
- 35 **[0007]** Toutefois, il peut subsister soit des particules exogènes, soit des particules qui du fait d'une solubilité imparfaite peuvent se reformer lors du refroidissement.
- [0008]** En outre, il peut être souhaitable de mettre en oeuvre une méthode de refusion la plus stable que possible afin d'obtenir une flottation régulière des radeaux d'oxydes et de sulfures à la surface du liquide en partant du centre vers le bord du creuset du four. Cependant, chaque four de refusion présente une certaine dispersion, induisant une dispersion des tailles de ces amorces et, par conséquent, des disparités dans les durées de vie des produits obtenus.
- 40 **[0009]** Il existe un besoin pour obtenir des pièces en acier faiblement allié présentant des durées de vie améliorées.
- [0010]** Il existe un besoin pour obtenir des pièces en acier faiblement allié présentant des disparités réduites en termes de propriétés mécaniques.
- [0011]** Il existe un besoin pour obtenir des procédés de fabrication d'acier faiblement allié permettant de réduire l'impact des instabilités du four de refusion.
- 45 **[0012]** Il existe encore un besoin pour disposer de nouveaux procédés de fabrication de pièces en acier faiblement allié.

Objet et résumé de l'invention

- 50 **[0013]** A cet effet, l'invention propose, selon un premier aspect, un procédé pour fabriquer un lingot d'acier faiblement allié comportant les étapes suivantes:
- a) fusion de tout ou partie d'une électrode par un procédé de refusion à l'arc sous vide, l'électrode comportant, avant fusion, du fer et du carbone, la partie fondue de l'électrode étant recueillie dans un creuset et formant ainsi au sein du creuset un bain fondu, et
- 55 b) solidification du bain fondu par échange thermique entre le bain fondu et un fluide de refroidissement, l'échange thermique réalisé permettant d'imposer une vitesse moyenne de solidification durant l'étape b) inférieure ou égale à 45 $\mu\text{m/s}$ et d'obtenir un lingot d'acier faiblement allié.

[0014] Par « acier faiblement allié », il faut comprendre un acier pour lequel aucun élément d'alliage n'est présent en une teneur massique supérieure à 5,00%. En d'autres termes, dans un acier faiblement allié, chacun des éléments chimiques, autres que le fer, est présent en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%.

[0015] Le « bain fondu » comporte, au sens de l'invention, la partie liquide obtenue après fusion de l'électrode ainsi que la partie pâteuse située entre la partie liquide et le lingot obtenu.

[0016] Par « vitesse moyenne de solidification durant l'étape b) », on entend le rapport (distance parcourue par le front de solidification durant l'étape b))/(durée de l'étape b)). Le front de solidification correspond à la frontière entre le lingot obtenu et la zone pâteuse du bain fondu. La distance parcourue par le front de solidification est égale à la distance, mesurée le long de l'axe longitudinal du creuset, parcourue par le fond du bain fondu (i.e. par le point du bain fondu le plus proche du fond du creuset et situé au contact du front de solidification). La durée de l'étape b) est la durée pendant laquelle une solidification du bain fondu est réalisée.

[0017] L'invention permet avantageusement d'obtenir des lingots d'acier faiblement allié présentant des inclusions de taille et d'alignement réduits.

[0018] L'invention permet avantageusement d'obtenir des lingots d'acier faiblement allié présentant une dispersion de la population des inclusions obtenue durant la fabrication réduite par rapport aux lingots fabriqués par les procédés de l'état de l'art.

[0019] Les lingots obtenus par le procédé selon l'invention présentent avantageusement des propriétés mécaniques ainsi que des durées de vie améliorées par rapport aux lingots fabriqués par les procédés connus.

[0020] Dans l'invention, une vitesse de solidification du bain fondu suffisamment faible est imposée afin que tout ou partie des inclusions présentes dans le bain fondu « remontent » plus vite à la surface du bain fondu que le front de solidification. Ainsi, dans l'invention, la vitesse moyenne de solidification est choisie de manière à être inférieure à la vitesse de flottation (i.e. la vitesse de remontée à la surface du bain fondu) de tout ou partie des inclusions présentes dans le bain fondu. De ce fait, l'invention permet avantageusement aux inclusions de flotter en radeau à la surface du bain fondu et d'éviter qu'elles ne se retrouvent piégées dans le lingot obtenu.

[0021] Les mécanismes de flottation ou de décantation des inclusions au sein du bain fondu peuvent être décrits par les équations de Stokes. Par exemple, la vitesse v_f de flottation des inclusions est donnée par l'équation :

$$v_f = K \cdot r^2 \cdot \Delta(MV) \quad (\text{Equation 1})$$

où K est une constante physique décrivant la constante de l'accélération de la pesanteur et la viscosité dynamique à une température donnée, r est le rayon de l'inclusion et $\Delta(MV)$ est la différence de masse volumique entre l'inclusion et le bain fondu.

[0022] L'équation 1 montre que les petites inclusions mettent plus de temps à remonter à la surface que les grosses inclusions suivant un rapport du rayon au carré. Par ailleurs, l'équation 1 montre qu'une augmentation de la différence de masse volumique accroît la vitesse de flottation.

[0023] La durée de flottation $t_{\text{flottation}}$ d'une inclusion, correspondant à la durée nécessaire pour qu'une inclusion remonte à la surface du bain fondu, peut être estimée par l'équation suivante :

$$t_{\text{flottation}} = \Delta D / v_f \quad (\text{Equation 2})$$

où ΔD est l'accroissement de distance par rapport au fond du creuset, mesuré le long de l'axe longitudinal du creuset, entre la position initiale de l'inclusion et la position où l'inclusion est située à la surface du bain fondu.

[0024] Du fait du contrôle de la vitesse de solidification mise en oeuvre lors de l'étape b), la durée de flottation de tout ou partie des inclusions présentes dans le bain fondu est inférieure à la durée de l'étape b).

[0025] Dans un exemple de réalisation, la vitesse moyenne de solidification imposée durant l'étape b) peut avantageusement être inférieure à la vitesse de flottation de tout ou partie des inclusions non-métalliques présentes dans le bain fondu.

[0026] La vitesse moyenne de solidification imposée durant l'étape b) peut avantageusement être inférieure à la vitesse de flottation d'inclusions présentes dans le bain fondu et aptes à cristalliser dans le bain fondu mais pas dans le lingot obtenu. En particulier, la vitesse moyenne de solidification imposée durant l'étape b) peut avantageusement être inférieure à la vitesse de flottation des aluminés Al_2O_3 et/ou à la vitesse de flottation des aluminates de chaux de formule $[(Al_2O_3)_x(CaO)_y]$ présents dans le bain fondu.

[0027] Pour des inclusions d'aluminés ou d'aluminates de chaux qui ont des masses volumiques proches, les vitesses de flottation et, par conséquent, les durées de flottation peuvent être similaires. Pour des rayons d'inclusions de 2 μm , les durées de flottation peuvent, par exemple, être inférieures à 60 minutes.

[0028] Ainsi, la durée de l'étape b) peut, par exemple, être supérieure ou égale à 60 minutes, par exemple à 100 minutes.

[0029] Dans un exemple de réalisation, le procédé selon l'invention peut, en outre, comporter après l'étape b) une étape c) d'homogénéisation des éléments d'alliage présents dans le lingot obtenu. L'étape c) peut, par exemple, comporter un traitement thermique du lingot obtenu par soumission du lingot à une température inférieure à sa température de fusion.

[0030] Une telle étape est avantageuse dans la mesure où elle permet de faire diffuser les éléments d'alliage d'une zone fortement chargée en éléments d'alliage à une zone faiblement chargée en éléments d'alliage.

[0031] Dans un exemple de réalisation, le procédé selon l'invention peut, en outre, comporter après l'étape c), une étape d) de mise en forme à chaud du lingot. L'étape d) peut permettre d'obtenir à partir du lingot un demi-produit par exemple sous forme d'une barre ou d'une tôle.

[0032] La vitesse moyenne de solidification imposée durant l'étape b) peut de préférence être inférieure ou égale à 40 $\mu\text{m/s}$, de préférence à 35 $\mu\text{m/s}$, de préférence à 30 $\mu\text{m/s}$, de manière particulièrement préférée à 25 $\mu\text{m/s}$.

[0033] Il est particulièrement avantageux d'imposer de telles vitesses moyennes de solidification durant l'étape b). En effet, dans le procédé de refusion à l'arc sous vide, le four de refusion peut présenter des instabilités lesquelles peuvent conduire au renvoi vers le fond du bain fondu de radeaux d'inclusions. La présence de telles instabilités peut conduire à une augmentation de la durée nécessaire pour que les inclusions remontent à la surface du bain fondu et y demeurent. Opérer à de telles vitesses moyennes de solidification permet avantageusement d'augmenter encore la différence entre la durée nécessaire pour solidifier le bain fondu et la durée nécessaire pour qu'une inclusion remonte à la surface. Par conséquent, l'impact négatif des instabilités du four de refusion est avantageusement réduit car la solidification est plus lente, laissant ainsi le temps aux inclusions éventuellement renvoyées vers le fond du bain fondu de remonter à la surface.

[0034] Ainsi, la durée de flottation de tout ou partie des inclusions présentes dans le bain fondu peut avantageusement être inférieure ou égale aux deux-tiers, voire à la moitié, de la durée de l'étape b).

[0035] Le diamètre de l'électrode avant fusion peut, par exemple, être compris entre 650 mm et 1200 mm.

[0036] Par « diamètre de l'électrode », il faut comprendre la plus grande dimension de l'électrode mesurée perpendiculairement à l'axe longitudinal de l'électrode.

[0037] De préférence, l'électrode peut, avant fusion, être de forme cylindrique.

[0038] L'utilisation d'une électrode cylindrique permet avantageusement d'obtenir après sa fusion un mouvement de remontée des inclusions au sein du bain fondu essentiellement dirigé le long de l'axe longitudinal du creuset. Cela permet avantageusement de limiter encore la quantité d'inclusions piégées dans le lingot obtenu après solidification du fait d'une remontée des inclusions plus directe vers la surface du bain fondu.

[0039] L'invention n'est pas limitée à la mise en oeuvre d'une électrode de forme cylindrique avant fusion. En effet, l'électrode peut, en variante, être de forme conique ou parallélépipédique avant fusion.

[0040] Dans un exemple de réalisation, le diamètre du bain fondu peut, par exemple, être compris entre 650 mm et 1200 mm. Le diamètre du bain fondu peut encore être compris entre 700 mm et 950 mm. Le diamètre du bain fondu peut encore être compris entre 650 mm et 950 mm. Le diamètre du bain fondu peut encore être compris entre 700 mm et 1200 mm.

[0041] Sauf mention contraire, le diamètre du bain fondu correspond à sa plus grande dimension mesurée perpendiculairement à l'axe longitudinal du creuset. Par exemple, pour un creuset ayant une forme de cylindre, le diamètre du bain fondu est mesuré perpendiculairement à la hauteur du cylindre. Le diamètre du bain fondu est mesuré sans prendre en compte l'épaisseur de la paroi latérale du creuset.

[0042] De préférence, la vitesse moyenne de solidification imposée durant l'étape b) peut être supérieure ou égale à 9 $\mu\text{m/s}$ et plus préférentiellement supérieure ou égale à 14 $\mu\text{m/s}$.

[0043] L'utilisation de telles valeurs de vitesses de solidification est avantageuse car elle permet d'obtenir particulièrement peu de micro-ségrégations de solidification lors de l'étape b). Cela permet avantageusement d'améliorer encore les propriétés mécaniques du lingot obtenu, telles que la ténacité ou l'isotropie des propriétés mécaniques statiques.

[0044] Par ailleurs, plus le lingot comporte de micro-ségrégations, plus la durée de l'étape c) d'homogénéisation peut être importante.

[0045] Par conséquent, l'utilisation de telles valeurs de vitesses de solidification permet en outre avantageusement d'obtenir une meilleure efficacité industrielle pour le procédé en évitant par exemple d'avoir des durées d'homogénéisation supérieures à 200 heures, voire en évitant même d'avoir des durées d'homogénéisation supérieures à 100 heures.

[0046] L'utilisation de ces vitesses de solidification permet donc avantageusement de réduire le coût du procédé et d'améliorer la productivité.

[0047] L'homme du métier saura, grâce à ses connaissances générales, adapter le refroidissement réalisé afin d'obtenir les vitesses de solidification souhaitées durant l'étape b).

[0048] Le fluide de refroidissement peut, par exemple, être un liquide de refroidissement. Dans un exemple de réalisation, la combinaison d'un liquide de refroidissement et d'un gaz de refroidissement peut être utilisée lors de l'étape b) pour réaliser l'échange thermique. Dans ce cas, le gaz de refroidissement peut être choisi parmi : l'hélium, l'argon ou l'azote.

[0049] Le liquide de refroidissement peut, par exemple, être choisi parmi : l'eau, un fluide polymère ou le sodium

fondue. L'eau utilisée en tant que liquide de refroidissement peut éventuellement comporter des additifs tels que des additifs anti-calcaires et/ou anti-bactériens.

[0050] Le fluide de refroidissement peut, par exemple, être en mouvement par rapport au creuset durant tout ou partie de l'étape b). La vitesse de circulation du fluide de refroidissement réalisant l'échange thermique peut, par exemple, être supérieure ou égale à 1000 l/minute, de préférence comprise entre 2000 et 6000 l/minute, durant tout ou partie de l'étape b).

[0051] Par exemple, le fluide de refroidissement peut, avant le début de l'échange thermique, être à une température inférieure ou égale à 80°C.

[0052] Le creuset peut, par exemple, comporter, notamment consister en, un métal caloporteur. Le creuset peut, par exemple, comporter, notamment consister en, du cuivre ou du laiton.

[0053] Dans un exemple de réalisation, le carbone peut être présent dans l'électrode avant sa fusion en une teneur massique comprise entre 0,09% et 1,00%.

[0054] Dans un exemple de réalisation, l'électrode peut, en outre, comporter avant fusion du chrome en une teneur massique comprise entre 0,10% et 5,50%.

[0055] Dans un exemple de réalisation, l'électrode peut, en outre, comporter avant fusion du molybdène en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,05% et 5,00%.

[0056] La mise en oeuvre de ces éléments à de telles teneurs massiques confère avantageusement au lingot obtenu des propriétés mécaniques satisfaisantes.

[0057] Dans un exemple de réalisation, l'électrode peut comporter, avant fusion, du fer ainsi que :

- du carbone en une teneur massique comprise entre 0,09% et 1,00%,
- du manganèse en une teneur massique inférieure ou égale à 6,00%, par exemple comprise entre 0,010% et 6,00%,
- du nickel en une teneur massique inférieure ou égale à 5,50%, par exemple comprise entre 0,010% et 5,50%,
- du silicium en une teneur massique inférieure ou égale à 3,00%, par exemple comprise entre 0,010% et 3,00%,
- du chrome en une teneur massique comprise entre 0,10% et 5,50%,
- du molybdène en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,05% et 5,00%,
- du vanadium en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,005% et 5,00%, et
- optionnellement un ou plusieurs autres éléments d'alliage, l'ensemble des autres éléments d'alliage étant présent en une teneur massique inférieure ou égale à 3,00%, par exemple comprise entre 0,010% et 3,00%.

[0058] Dans un exemple de réalisation, l'électrode peut présenter, avant fusion, la composition suivante :

- carbone en une teneur massique comprise entre 0,09% et 1,00%,
- manganèse en une teneur massique inférieure ou égale à 6,00%, par exemple comprise entre 0,010% et 6,00%,
- nickel en une teneur massique inférieure ou égale à 5,50%, par exemple comprise entre 0,010% et 5,50%,
- silicium en une teneur massique inférieure ou égale à 3,00%, par exemple comprise entre 0,010% et 3,00%,
- chrome en une teneur massique comprise entre 0,10% et 5,50%,
- molybdène en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,05% et 5,00%,
- vanadium en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,005% et 5,00%,
- optionnellement un ou plusieurs autres éléments d'alliage, l'ensemble des autres éléments d'alliage étant présent en une teneur massique inférieure ou égale à 3,00%, par exemple comprise entre 0,010% et 3,00%, et
- fer en complément à 100,00%.

[0059] La présente invention vise également une pièce en acier faiblement allié comportant du fer et du carbone, la pièce s'étendant le long d'un axe longitudinal, la pièce étant telle que, lorsqu'elle est évaluée selon la méthode D de la norme ASTM E 45-10, les résultats suivants sont obtenus en analyse le long de l'axe longitudinal :

- le nombre de champs comportant des inclusions de type D de niveau de sévérité égal à 0,5 est inférieur à 5,
- aucun champ comportant des inclusions de type D de niveau de sévérité égal à 1 n'est obtenu, et
- aucun champ comportant des inclusions de type B de niveau de sévérité égal à 0,5 n'est obtenu.

[0060] Sauf indication contraire, à la fois les inclusions fines (« thin ») et les inclusions épaisses (« heavy ») sont comptabilisées.

[0061] Une telle pièce selon l'invention présente avantageusement une résistance à la fatigue améliorée par rapport aux pièces de l'état de la technique. En outre, lorsqu'une pluralité de ces pièces est analysée, on constate que la dispersion des résultats obtenus en termes de durée de vie est inférieure à celle présentée par un échantillon de pièces produites par les procédés connus.

[0062] La pièce peut être obtenue par mise en oeuvre d'un procédé tel que décrit plus haut. La pièce peut comporter

EP 3 536 815 A1

des inclusions non-métalliques. La pièce peut correspondre au lingot obtenu à l'issue de l'étape b) ou éventuellement de l'étape c) décrites plus haut. La pièce peut encore correspondre au demi-produit obtenu après mise en oeuvre de l'étape d) décrite plus haut.

[0063] Dans un exemple de réalisation, lorsque la pièce est évaluée selon la méthode D de la norme ASTM E 45-10, le résultat suivant peut être obtenu en additionnant les trois résultats de mesure obtenus le long de l'axe longitudinal de la pièce et le long des deux axes perpendiculaires à cet axe longitudinal :

- le nombre de champs total comportant des inclusions de type D de niveau de sévérité égal à 0,5 est inférieur ou égal à 15, de préférence à 10.

[0064] Dans un exemple de réalisation, le carbone peut être présent dans la pièce en une teneur massique comprise entre 0,09% et 1,00%.

[0065] Dans un exemple de réalisation, la pièce peut, en outre, comporter du chrome en une teneur massique comprise entre 0,05% et 5,00%.

[0066] Dans un exemple de réalisation, la pièce peut, en outre, comporter du molybdène en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,05% et 5,00%.

[0067] Dans un exemple de réalisation, la pièce peut comporter du fer ainsi que :

- du carbone en une teneur massique comprise entre 0,09% et 1,00%,
- du manganèse en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,005% et 5,00%,
- du nickel en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,010% et 5,00%,
- du silicium en une teneur massique inférieure ou égale à 3,00%, par exemple comprise entre 0,010% et 3,00%,
- du chrome en une teneur massique comprise entre 0,05% et 5,00%,
- du molybdène en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,05% et 5,00%,
- du vanadium en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,005% et 5,00%, et
- optionnellement un ou plusieurs autres éléments d'alliage, l'ensemble des autres éléments d'alliage étant présent en une teneur massique inférieure ou égale à 3,00%, par exemple comprise entre 0,010% et 3,00%.

[0068] Dans un exemple de réalisation, la pièce peut présenter la composition suivante :

- carbone en une teneur massique comprise entre 0,09% et 1,00%,
- manganèse en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,005% et 5,00%,
- nickel en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,010% et 5,00%,
- silicium en une teneur massique inférieure ou égale à 3,00%, par exemple comprise entre 0,010% et 3,00%,
- chrome en une teneur massique comprise entre 0,05% et 5,00%,
- molybdène en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,05% et 5,00%,
- vanadium en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, par exemple comprise entre 0,005% et 5,00%,
- optionnellement un ou plusieurs autres éléments d'alliage, l'ensemble des autres éléments d'alliage étant présent en une teneur massique inférieure ou égale à 3,00%, par exemple comprise entre 0,010% et 3,00%, et
- fer en complément à 100,00%.

[0069] La pièce selon l'invention peut, par exemple, comporter différents éléments d'alliage aux proportions indiquées dans le tableau 1 donné ci-dessous.

Tableau 1

	%C	%Mn	%Ni	%Si	%Cr	%Mo	% V
Pièce 1	0,13	0,2	3,4	0,2	4,1	4,3	1,2
Pièce 2	0,15	0,5	3,2	0,3	1,0	0,3	<0,1
Pièce 3	0,20	0,5	3,2	0,3	1,0	0,3	<0,1
Pièce 4	0,32	0,7	<0,4	0,3	3,3	2,0	0,3
Pièce 5	0,35	0,5	3,9	0,3	1,8	0,4	<0,1
Pièce 6	0,40	<0,5	1,8	<0,5	0,8	0,3	<0,1
Pièce 7	0,40	0,5	<0,4	0,2	3,2	1,0	0,2

(suite)

	%C	%Mn	%Ni	%Si	%Cr	%Mo	% V
Pièce 8	0,40	0,3	<0,4	0,9	5,0	1,3	0,5
Pièce 9	0,41	0,8	1,8	1,7	0,8	0,4	0,08
Pièce 10	0,81	0,2	<0,4	0,2	4,1	4,3	1,0

[0070] Avantageusement, la pièce peut présenter une forme cylindrique. En variante, la pièce peut, par exemple, présenter une forme conique ou parallélépipédique.

[0071] Selon encore un autre de ses aspects, la présente invention concerne une pièce en acier faiblement allié comportant du fer et du carbone et susceptible d'être obtenue par mise en oeuvre d'un procédé tel que décrit plus haut.

[0072] Une telle pièce peut, par exemple, comporter les mêmes constituants présents aux mêmes teneurs massiques que pour la pièce décrite plus haut.

Brève description des dessins

[0073] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description suivante de modes particuliers de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemples non limitatifs, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- les figures 1 et 2 représentent, de manière schématique et partielle la mise en oeuvre d'un procédé selon l'invention.

Description détaillée de modes de réalisation

[0074] Comme illustré à la figure 1, l'électrode 1 destinée à être fondue est présente dans le volume intérieur délimité par le creuset 10. L'électrode 1 peut, au préalable, avoir été élaborée par tout moyen connu comme l'élaboration à l'air ou l'élaboration par induction sous vide. L'électrode 1 peut, comme représenté, avoir avant fusion une forme cylindrique. Comme expliqué plus haut, on ne sort pas du cadre de la présente invention si une électrode présentant une autre forme avant fusion est mise en oeuvre.

[0075] Le creuset 10 est, par exemple, en cuivre. Le creuset 10 s'étend le long d'un axe longitudinal X. Un générateur G impose une différence de potentiel entre le creuset 10 et l'électrode 1. Une première borne du générateur G peut, comme représenté, être connectée à l'électrode 1 et une deuxième borne du générateur G peut, comme représenté, être connectée au fond 11 du creuset 10. La différence de potentiel imposée entre le creuset 10 et l'électrode 1 par le générateur G permet de créer des arcs électriques 3 dans l'espace 2 dans lequel règne un vide. Ces arcs électriques 3 permettent de faire fondre l'électrode 1 et de réaliser l'étape a).

[0076] La partie fondue de l'électrode 1 est recueillie dans le creuset 10 et forme ainsi un bain fondu 20. Le bain fondu 20 comporte une partie liquide 21 située du côté de l'électrode 1 et une partie pâteuse 22 située entre la partie liquide 21 et le lingot 30. Le lingot 30 est obtenu par refroidissement de la partie fondue de l'électrode. Le front de solidification 34 sépare le lingot obtenu 30 du bain fondu 20 et se propage durant l'étape b) vers la surface libre du bain fondu 20. De l'eau circule autour du creuset 10 afin de continuellement refroidir le creuset 10 ainsi que le bain fondu 20 et d'assurer la solidification de ce dernier.

[0077] En outre, comme représenté à la figure 1, un canal de refroidissement 13 est présent au sein de la paroi latérale 12 et de la paroi de fond 14 du creuset 10. Un liquide de refroidissement peut circuler au sein du canal de refroidissement 13 afin de participer aussi à la solidification du bain fondu 20.

[0078] Comme représenté, le lingot 30 est présent, durant l'étape b), entre le bain fondu 20 et le fond 11 du creuset 10 ainsi qu'entre le bain fondu 20 et la paroi latérale 12 du creuset 10. En outre, au moins une partie de la surface périphérique 31 du lingot 30 peut ne pas être au contact de la paroi latérale 12 du creuset 10 et être séparée de cette dernière par un espace 33. Dans certains cas, dans cet espace 33, un gaz (par exemple He, Ar, N₂) peut être injecté afin d'améliorer le refroidissement.

[0079] Au terme de l'étape b), le lingot obtenu 30 peut avoir une forme cylindrique.

[0080] La figure 2 fournit une représentation simplifiée de certains détails du procédé selon l'invention. L'électrode 1 comporte avant fusion des inclusions 40. Ces inclusions 40 peuvent être des inclusions non métalliques. Comme représenté, l'extrémité la de l'électrode 1 est, durant la fusion, fondue par l'énergie des arcs électriques 3. Des gouttes 5 d'électrode fondue sont produites lesquelles vont être recueillies par le creuset 10. Le creuset 10 est, comme expliqué plus haut, refroidi avec de l'eau. Le bain fondu 20 a un diamètre $\underline{d}$ égal au diamètre interne du creuset 10.

[0081] Le bain fondu 20 peut, comme représenté, avoir durant tout ou partie de l'étape b) une forme hémisphérique. Une telle forme peut par exemple être obtenue lorsque l'on utilise un creuset 10 de forme cylindrique. Le bain fondu 20

peut prendre d'autres formes, par exemple une forme semi-quasi-ovoïde. Une telle forme peut par exemple être obtenue lorsque l'on utilise un creuset de forme parallélépipédique.

[0082] La distance e entre la surface libre 25 du bain fondu 20 et l'électrode 1 est avantageusement maintenue constante durant l'étape b). Cette distance e peut être pilotée soit en tension (V), soit en impulsions liées à la fréquence de chute des gouttes 5. Dans l'exemple illustré, l'électrode 1 est durant l'étape b) déplacée le long de l'axe longitudinal X du creuset 10 afin de maintenir la distance e constante.

[0083] Lors de la fusion de l'électrode 1, les gouttes 5 tombent et sont recueillies par le creuset 10. Les gouttes 5 peuvent comporter des inclusions 40 qui étaient initialement présentes dans l'électrode 1. Une fois apportées dans le bain fondu 20, les inclusions 40 peuvent être entraînées vers le fond 26 du bain fondu 20 (i.e. le point du bain fondu 20 le plus proche du fond 11 du creuset et en contact avec le front de solidification 34).

[0084] Du point de vue thermique, le bain fondu 20 présente une partie axiale présentant une température supérieure à celle de sa partie périphérique. Cela conduit à une convection naturelle, correspondant aux forces engagées de flottabilité, qui part du fond 26 du bain fondu 20, rejoint la surface libre 25 du bain fondu 20 et se dirige vers le bord 27 du bain fondu 20. Cette convection est schématisée à la figure 2 par les flèches 28a et 28b.

[0085] Pendant la refusion, les inclusions 40 soit solides soit liquides de densité inférieure à celle du bain fondu 20 auront tendance à remonter à la surface 25 avec une certaine vitesse par des mécanismes de flottation comme expliqué plus haut.

[0086] Sur la surface libre 25 du bain fondu 20 sont présents des agrégats 41 formés d'inclusions 40 agglomérées. Ces agrégats 41 sont entraînés vers la périphérie du lingot 30 où ils seront figés.

[0087] Comme représenté à la figure 2, le front de solidification 34 se propage depuis le fond 11 du creuset 10 vers la surface libre 25 du bain fondu. Le front de solidification 34 se propage durant l'étape b) le long de l'axe longitudinal X du creuset 10 comme matérialisé par la flèche 35. Comme représenté, le front de solidification 34 peut conserver sa forme durant tout ou partie de l'étape b). La vitesse moyenne de remontée du front de solidification 34 est pilotée de manière à être inférieure à la vitesse de remontée à la surface de tout ou partie des inclusions 40 comme expliqué plus haut. On a représenté à la figure 2 les positions successives P_1 et P_2 occupées par le fond 26 du bain fondu 20. La distance d_1 parcourue par le fond 26 du bain fondu est mesurée le long de l'axe longitudinal X du creuset 10.

Exemples

Exemple 1

[0088] Une électrode ayant la composition chimique suivante : C 0,42% - Mn 0,82% - Ni 1,80% - Si 1,70% - Cr 0,80% - Mo 0,40% - V 0,08% et Fe en complément (les teneurs sont massiques) a été fondue par un procédé de refusion à l'arc sous vide. Le diamètre de l'électrode avant fusion était de 920mm.

[0089] Les conditions appliquées durant la refusion à l'arc sous vide sont les suivantes :

- tension appliquée : 25 Volts,
- intensité appliquée : 9 kA, et
- impulsion : 250 gouttes coupe-circuit d'électrode fondue produites par minute.

[0090] Ces conditions permettent d'obtenir un débit de gouttes d'électrode fondue égal à 9,5 kg / minute.

[0091] Les gouttes d'électrode fondues sont recueillies dans un creuset de diamètre égal à 975 mm et forment un bain fondu au sein du creuset en cuivre.

[0092] On réalise ensuite une solidification du bain fondu par échange thermique entre le bain fondu et de l'eau circulant à 3000 l/minute avec une température thermostatée à 38°C à l'entrée et une injection continue d'He à 20mbar

[0093] L'échange thermique réalisé permet d'imposer une vitesse moyenne de solidification durant l'étape b) égale à 24 $\mu\text{m/s}$.

[0094] Après solidification, on obtient un lingot d'acier faiblement allié ayant la composition chimique suivante : C 0,41% - Mn 0,80% - Ni 1,80% - Si 1,70% - Cr 0,80% - Mo 0,40% - V 0,08% et Fe en complément (les teneurs sont massiques).

[0095] Les résultats obtenus en termes de propreté inclusionnaire suivant la méthode D de la norme ASTM E 45-10 sont donnés ci-dessous en nombre de champs le long de l'axe longitudinal :

Niveau de sévérité	taille	A	B	C	D
0,5	fin	0	0	0	3
0,5	épais	0	0	0	1

EP 3 536 815 A1

(suite)

Niveau de sévérité	taille	A	B	C	D
1	Fin	0	0	0	0
1	épais	0	0	0	0
1,5	Fin	0	0	0	0
1,5	épais	0	0	0	0

[0096] La somme des champs comportant des inclusions de type D dans les 3 directions est de 7.

Exemple 2 (comparatif)

[0097] Une électrode ayant la composition chimique suivante : C 0,42% - Mn 0,83% - Ni 1,81% - Si 1,72% - Cr 0,85% - Mo 0,38% - V 0,09% et Fe en complément (les proportions sont massiques) a été fondue par un procédé de refusion à l'arc sous vide.

[0098] Le diamètre de l'électrode avant fusion était de 550mm.

[0099] Les conditions appliquées durant la refusion à l'arc sous vide sont les suivantes :

- tension appliquée : 25 Volts,
- intensité appliquée : 11 kA, et
- impulsion : 330 gouttes coupe-circuit d'électrode fondue produites par minute.

[0100] Ces conditions permettent d'obtenir un débit de gouttes d'électrode fondue supérieur ou égal à 12 kg / minute +/- 0,6 kg/minute.

[0101] Les gouttes d'électrode fondues sont recueillies dans un creuset de diamètre égal à 600 mm et forment un bain fondu au sein du creuset en cuivre.

[0102] On réalise ensuite une solidification du bain fondu par échange thermique entre le bain fondu et de l'eau circulant à 1500 l/min avec une température thermostatée à 38°C à l'entrée et sans injection de gaz.

[0103] L'échange thermique réalisé permet d'imposer une vitesse moyenne de solidification durant l'étape b) égale à 49µm/s.

[0104] Après solidification, on obtient un lingot d'acier faiblement allié ayant la composition chimique suivante : C 0,41% - Mn 0,81% - Ni 1,82% - Si 1,73% - Cr 0,85% - Mo 0,38% - V 0,09% et Fe en complément (les teneurs sont massiques).

[0105] Les résultats obtenus en termes de propreté inclusionnaire suivant la méthode D de la norme ASTM E 45-10 sont donnés ci-dessous en nombre de champs le long de l'axe longitudinal :

Niveau de sévérité	taille	A	B	C	D
0,5	fin	0	5	0	28
0,5	épais	0	1	0	15
1	Fin	0	1	0	2
1	épais	0	0	0	0
1,5	Fin	0	0	0	0
1,5	épais	0	0	0	0

[0106] La somme des champs comportant des inclusions de type B ou D dans les 3 directions est de 87. Un tel lingot présente des propriétés mécaniques significativement inférieures à celles du lingot selon l'invention.

[0107] L'expression « comportant/contenant un(e) » doit se comprendre comme « comportant/contenant au moins un(e) ».

[0108] L'expression « compris(e) entre ... et ... » ou « allant de ... à ... » doit se comprendre comme incluant les bornes.

Revendications

1. Pièce (30) en acier faiblement allié comportant du fer et du carbone, la pièce (30) s'étendant le long d'un axe longitudinal, la pièce (30) étant telle que, lorsqu'elle est évaluée selon la méthode D de la norme ASTM E 45-10, les résultats suivants sont obtenus en analyse le long de l'axe longitudinal :

- le nombre de champs comportant des inclusions de type D de niveau de sévérité égal à 0,5 est inférieur à 5,
- aucun champ comportant des inclusions de type D de niveau de sévérité égal à 1 n'est obtenu, et
- aucun champ comportant des inclusions de type B de niveau de sévérité égal à 0,5 n'est obtenu.

2. Pièce (30) selon la revendication 1, **caractérisée en ce que** lorsqu'elle est évaluée selon la méthode D de la norme ASTM E 45-10, le résultat suivant est obtenu en additionnant les trois résultats de mesure obtenus le long de l'axe longitudinal de la pièce et le long des deux axes perpendiculaires à cet axe longitudinal :

- le nombre de champs total comportant des inclusions de type D de niveau de sévérité égal à 0,5 est inférieur ou égal à 15.

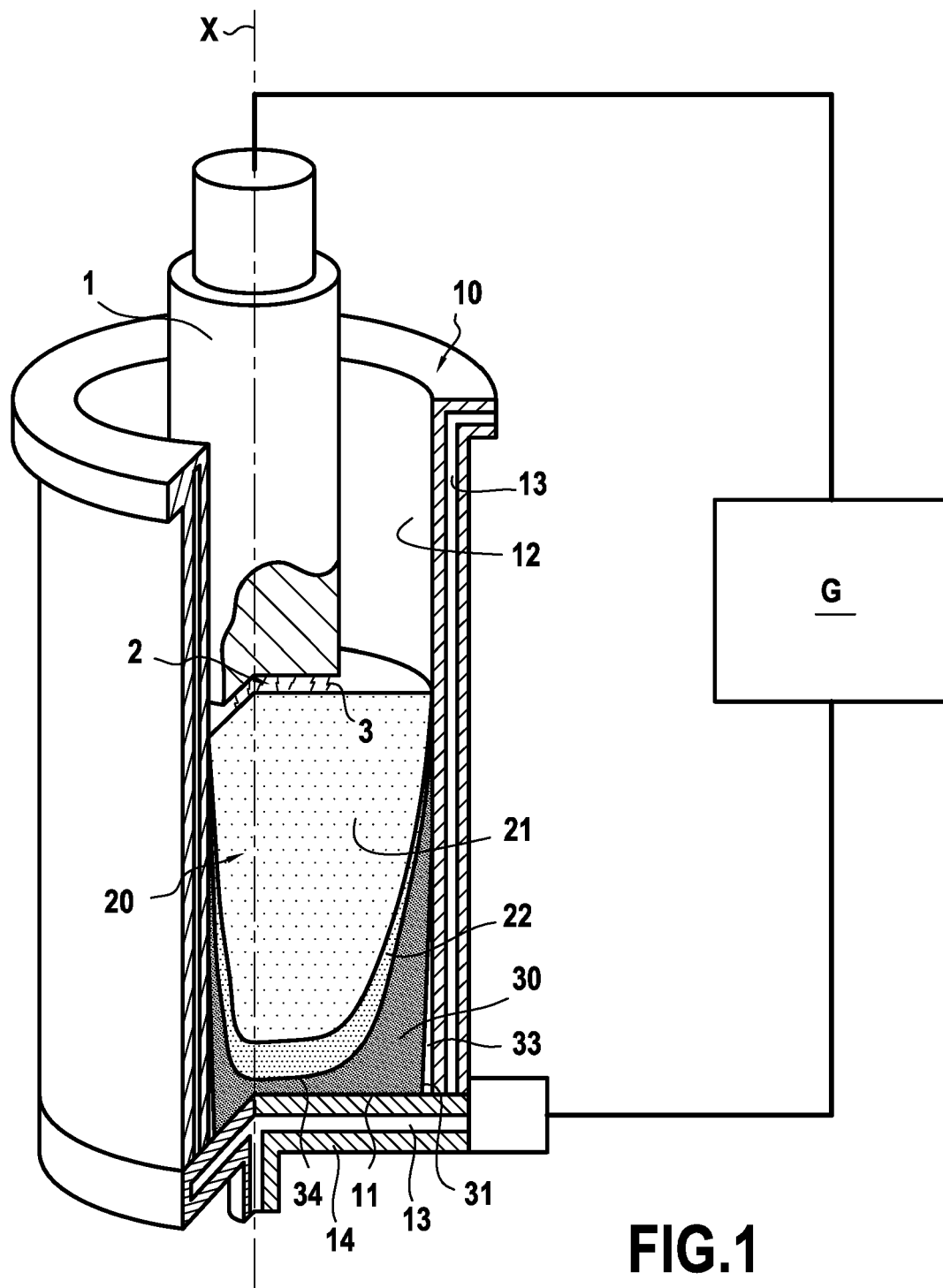
3. Pièce (30) selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, **caractérisée en ce que** le carbone est présent en une teneur massique comprise entre 0,09% et 1,00%.

4. Pièce (30) selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, **caractérisée en ce qu'elle** comporte, en outre, du chrome en une teneur massique comprise entre 0,05% et 5,00%.

5. Pièce (30) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, **caractérisée en ce qu'elle** comporte, en outre, du molybdène en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%.

6. Pièce (30) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, **caractérisée en ce qu'elle** comporte du fer ainsi que :

- du carbone en une teneur massique comprise entre 0,09% et 1,00%,
- du manganèse en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%,
- du nickel en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%,
- du silicium en une teneur massique inférieure ou égale à 3,00%,
- du chrome en une teneur massique comprise entre 0,05% et 5,00%,
- du molybdène en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%, et
- du vanadium en une teneur massique inférieure ou égale à 5,00%.



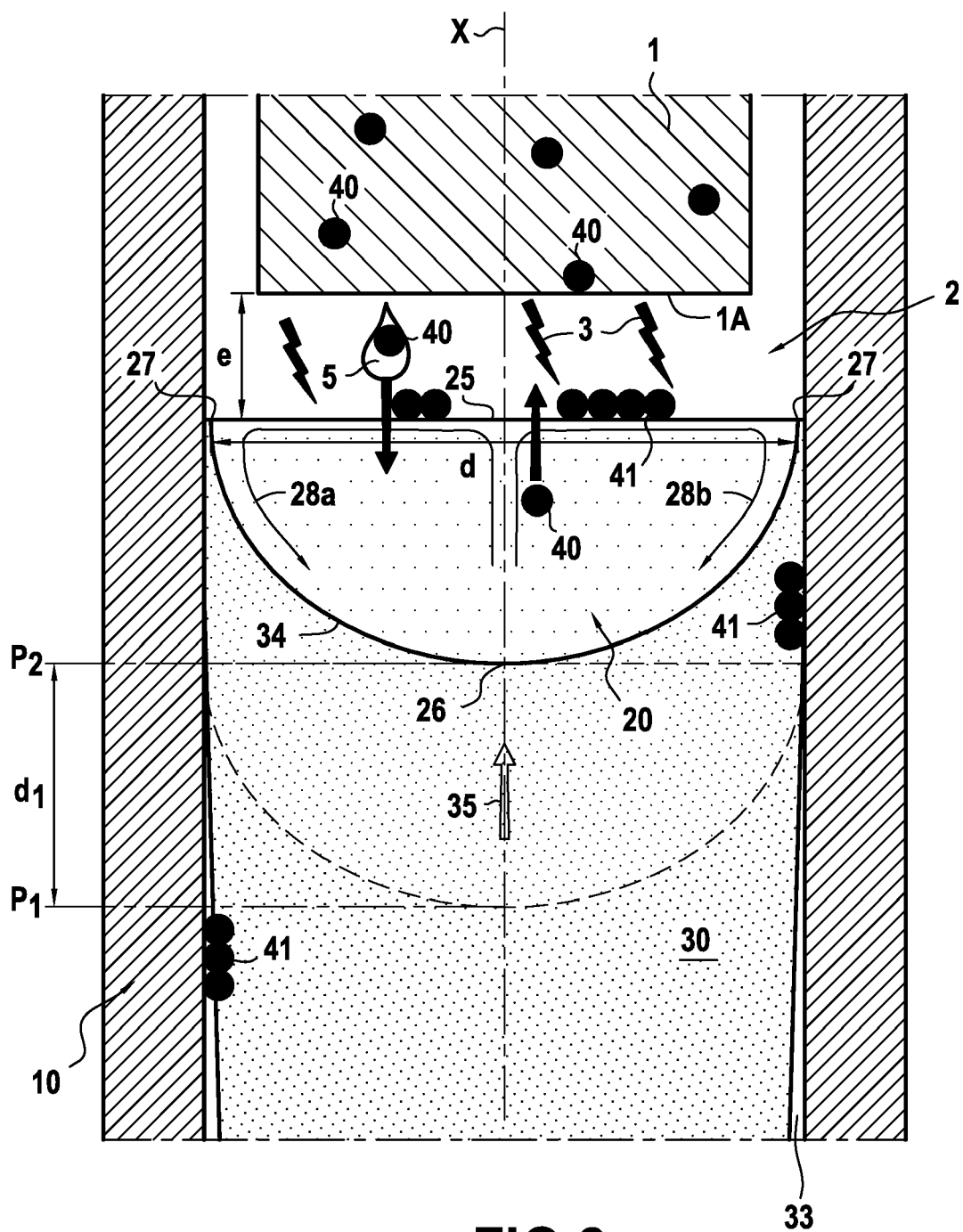


FIG.2



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 19 16 9956

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X	MARCOMINI J B ET AL: "Characterization of a New Fe-C-Mn-Si-Cr Bearing Alloy: Tempered Martensite Embrittlement Susceptibility", JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE, ASM INTERNATIONAL, MATERIALS PARK, OH, US, vol. 23, no. 3, 3 décembre 2013 (2013-12-03), pages 780-785, XP035372446, ISSN: 1059-9495, DOI: 10.1007/S11665-013-0800-Z [extrait le 2013-12-03] * 3. Results; page 781; tableaux 1,2 *	1-6	INV. C22B9/00 C22B9/04 C22B9/20
A	JOHN M. TARTAGLIA ET AL: "A Comparison of Mechanical Properties and Hydrogen Embrittlement Resistance of Austempered vs Quenched and Tempered 4340 Steel", METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A: PHYSICAL METALLURGY & MATERIALS SCIENCE., vol. 39, no. 3, 1 février 2008 (2008-02-01), pages 559-576, XP055603924, US ISSN: 1073-5623, DOI: 10.1007/s11661-007-9451-8 * tableaux I, II *	1-6	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) C22B
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche Munich		Date d'achèvement de la recherche 10 juillet 2019	Examineur Nikolaou, Ioannis
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 19 16 9956

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	L.T. SANDOR ET AL: "Fatigue crack propagation in nine steels, type SAE 43XX, from 0.20 to 1.00 % C, for the simulation of the fatigue behavior in a carburized layer of the SAE 4320", PROCEDIA ENGINEERING, vol. 2, no. 1, 1 avril 2010 (2010-04-01), pages 735-742, XP055604130, AMSTERDAM, NL ISSN: 1877-7058, DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.079 * tableaux 1, 2 *	1-6	
A	----- KR 101 302 693 B1 (SEAH BESTEEL CORP [KR]) 3 septembre 2013 (2013-09-03) * alinéa [0062]; tableaux 1,2 *	1-6	
A	----- XINHUA WANG ET AL: "Control of Stringer Shaped Non-Metallic Inclusions of CaO-Al ₂ O ₃ System in API X80 Linepipe Steel Plates", STEEL RESEARCH INTERNATIONAL., vol. 85, no. 2, 19 juin 2013 (2013-06-19), pages 155-163, XP055603935, DE ISSN: 1611-3683, DOI: 10.1002/srin.201300044 * abrégé; tableaux 1,2 *	1-6	
A	----- JP H07 238344 A (DAIDO STEEL CO LTD) 12 septembre 1995 (1995-09-12) * abrégé; tableaux 1,2 *	1-6	
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
Munich		10 juillet 2019	Nikolaou, Ioannis
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES			
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 19 16 9956

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

10-07-2019

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
KR 101302693 B1	03-09-2013	AUCUN	
JP H07238344 A	12-09-1995	AUCUN	

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82