

(19)



(11)

EP 3 378 957 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:

26.09.2018 Bulletin 2018/39(21) Numéro de dépôt: **18163690.3**(22) Date de dépôt: **23.03.2018**

(51) Int Cl.:

C21D 6/00 (2006.01)	C21D 8/00 (2006.01)
C21D 9/00 (2006.01)	C21D 1/18 (2006.01)
C21D 11/19 (2006.01)	C21D 1/20 (2006.01)
C22C 38/02 (2006.01)	C22C 38/04 (2006.01)
C22C 38/18 (2006.01)	C22C 38/44 (2006.01)
C22C 38/46 (2006.01)	C22C 38/50 (2006.01)
C22C 38/54 (2006.01)	C22C 38/58 (2006.01)
C22C 38/60 (2006.01)	

(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**

Etats d'extension désignés:

BA ME

Etats de validation désignés:

KH MA MD TN(30) Priorité: **23.03.2017 FR 1752403**(71) Demandeur: **Ascometal France Holding SAS
57300 Hagondange (FR)**

(72) Inventeurs:

- **SOURMAIL, Thomas
54700 NORROY LES PONT-A-MOUSSON (FR)**
- **MAMINSKA, Karolina
57300 HAGONDANGE (FR)**
- **GALTIER, André
57300 HAGONDANGE (FR)**

(74) Mandataire: **Lavoix**

**2, place d'Estienne d'Orves
75441 Paris Cedex 09 (FR)**

(54) **ACIER, PROCÉDÉ POUR LA FABRICATION DE PIÈCES MÉCANIQUES EN CET ACIER, ET
PIÈCES AINSI FABRIQUÉES**

(57) Acier pour pièce sécable mise en forme à chaud. Sa composition consiste en, exprimée en pourcentages pondéraux : $0,15\% \leq C \leq 0,40\%$; de préférence $0,20\% \leq C \leq 0,35\%$; $0,60\% \leq Mn \leq 1,80\%$; de préférence $0,80\% \leq Mn \leq 1,60\%$; Traces $\leq Cr \leq 1,60\%$; Traces $\leq Mo \leq 0,40\%$; Traces $\leq Ni \leq 1,50\%$; - Traces $\leq Cu \leq 0,80\%$; $0,02\% \leq V \leq 0,70\%$; Traces $\leq Nb \leq 0,08\%$; Traces $\leq Si \leq 1,20\%$; de préférence traces $\leq Si \leq 0,60\%$; Traces $\leq Al \leq 0,10\%$; Traces $\leq B \leq 0,010\%$; Traces $\leq Ti \leq 0,10\%$; Traces $\leq S \leq 0,15\%$; de préférence $0,005\% \leq S \leq 0,15\%$; Traces $\leq P \leq 0,10\%$; Traces $\leq Ca \leq 0,010\%$; Traces $\leq Te \leq 0,030\%$; Traces $\leq Se \leq 0,050\%$; Traces $\leq Bi \leq 0,10\%$; Traces $\leq Pb \leq 0,20\%$; Traces $\leq N \leq 0,025\%$; Traces $\leq O \leq 0,008\%$; le reste étant du fer et des impuretés liées à l'élaboration ; et :

* $V' \% = V \% + 2 Nb \% + Cu \% / 5 \geq 0,18\%$;* $Bs = 830 - 270C \% - 90Mn \% - 37Ni \% - 70Cr \% - 83 Mo \% - 50Cu \% - 100V \% \leq Bs_{lim}$, avec Bs_{lim} calculé comme suit :
$$Bs_{lim} = 530 + 330 (V' - 0,18), \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est inférieur à } 600 ;$$

$$Bs_{lim} = 600, \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est supérieur ou égal à } 600.$$

Sa microstructure comporte au moins 60% d'un mélange de ferrite bainitique et de carbures ou d'austénite résiduelle, le reste comportant au plus 40% de martensite et/ou de ferrite pro-eutectoïde et/ou de perlite, la présence de ferrite pro-eutectoïde et/ou de perlite étant limitée à au plus 10%.

Procédé de fabrication d'une pièce mécanique à partir de cet acier, et pièce mécanique ainsi réalisée.

EP 3 378 957 A1

Description

[0001] La présente invention concerne l'utilisation d'un acier de composition déterminée pour la fabrication d'une pièce mécanique, typiquement une pièce sécable, et notamment pour la fabrication d'une bielle sécable pour moteur à combustion interne, et le procédé d'obtention de cette pièce.

[0002] Certaines pièces mécaniques, telles que les bielles de moteur à combustion interne, sont constituées de deux éléments séparables assemblés par des moyens de fixation tels que des vis. Si, historiquement, dans le cas des bielles, les deux parties étaient fabriquées indépendamment puis usinées et assemblées, le développement du procédé de casse contrôlée s'est généralisé sur les quinze dernières années. Ce procédé, par lequel une seule pièce est désormais formée, par exemple par forgeage, puis cassée de manière contrôlée avant un réassemblage à l'aide de moyens de fixation, a permis une simplification considérable des chaînes de fabrication.

[0003] Pour les pièces sécables fabriquées en acier, comme c'est souvent le cas pour les moteurs à combustion interne modernes, des nuances spécifiques sont utilisées (par exemple la nuance dite C70S6) ou ont été développées spécialement pour cet usage.

[0004] Par exemple, le document EP-B1-0 779 375 décrit un procédé de fabrication d'une pièce sécable et l'acier utilisé à cet effet, ce dernier ayant une composition spécifiquement ajustée pour rendre l'acier apte à l'opération de casse contrôlée. De même, le document EP-B1-1 051 531 s'applique au même domaine technique, et décrit une nuance conçue pour améliorer les performances des pièces fabriquées, notamment par l'utilisation d'une addition de vanadium significative (0,20-0,50 % en poids).

[0005] D'autres solutions ont été développées pour proposer des aciers adaptés à la fabrication de pièces forgées sécables telle que les bielles. On peut citer, notamment, les documents EP-B2-0 856 590, EP-B1-1 070 153, EP-A1-1 243 665, US-A-2006/000088, JP-A-2002356743.

[0006] Il convient de noter deux points importants sur l'ensemble des aciers décrits dans les documents précédemment cités.

[0007] Tout d'abord, l'ensemble des aciers des documents précités ont une structure ferrito-perlitique avec, dans certains cas, un taux de ferrite contrôlé.

[0008] D'autre part, ces nuances sont spécifiquement conçues pour ne pas nécessiter de traitement thermique après le forgeage.

[0009] Ces nuances sont ainsi mises en oeuvre dans un procédé comportant typiquement les étapes suivantes :

Dans un premier temps, on approvisionne un lopin obtenu par sciage ou cisailage d'une barre laminée.

[0010] Puis on réchauffe le lopin à des températures typiquement comprises entre 1050 et 1280°C.

[0011] Puis on donne à la pièce ainsi chauffée la forme souhaitée, par forgeage.

[0012] Puis on laisse la pièce se refroidir, le plus souvent à l'air.

[0013] Puis on procède à un nettoyage, par exemple par sablage, et à l'usinage de la pièce.

[0014] Enfin, on procède à la casse contrôlée de la pièce, et à son réassemblage, avec éventuellement des opérations d'usinage de finition.

[0015] Dans la très grande majorité des procédés, les caractéristiques mécaniques sont obtenues à la fin du refroidissement, et peuvent d'ailleurs être modulées par l'utilisation d'un refroidissement accéléré (utilisation de ventilateurs pour obtenir une convection forcée) ou ralenti (mise en caisse de la pièce) par rapport à un refroidissement naturel à l'air libre et calme. Dans de très rares cas et sur des applications très spécifiques, un traitement thermique de trempe et revenu peut être utilisé, pour atteindre des caractéristiques mécaniques supérieures, mais de telles gammes de fabrication ne sont pas compatibles avec la fabrication de bielles sécables.

[0016] Afin de répondre aux sollicitations toujours plus élevées rencontrées par les pièces mécaniques dans les moteurs à combustion interne, les aciers spéciaux pour la fabrication de pièces forgées ont subi une évolution constante. Dans le cas des aciers ferrito-perlitiques, l'utilisation de teneurs en vanadium de l'ordre de 0,2-0,3% a permis d'atteindre des niveaux élevés de caractéristiques mécaniques sans pour autant nécessiter de traitement thermique (EP-B1-1 051 531). Ainsi, par exemple, sur les bielles sécables pour l'automobile (de section typique équivalente à un cylindre de 10 à 25 mm de diamètre) utilisant les nuances ferrito-perlitiques 36MnV4S ou 46MnVS6mod (K. Lipp and H. Kauffman, Schmiede- und Sinterschmiede-Werkstoffe für PKW-Pleuel, MTZ, 2011), on mesure des limites d'élasticité pouvant atteindre 850 MPa, contre 600-650 MPa sur des matériaux plus conventionnels. Ceci s'accompagne, bien entendu, de valeurs élevées de résistance mécanique, mais avec pour contrepartie une diminution importante de l'usinabilité.

[0017] Les nuances de ce type ont toutefois atteint leurs limites pour ce type d'application. Une première limitation réside dans le fait que les propriétés mécaniques citées précédemment ne peuvent être obtenues que sur des pièces de dimensions modestes (bielles pour moteurs de véhicules légers par exemple), et elles diminuent rapidement avec l'augmentation de la dimension des composants. Ainsi, la nuance 36MnV4S, qui permet d'obtenir une limite élastique conventionnelle $R_{p0,2}$ de 850 MPa sur une bielle automobile (K. Lipp and H. Kauffman, Schmiede- und Sinterschmiede-Werkstoffe für PKW-Pleuel, MTZ, 2011), présente une $R_{p0,2}$ de 700 MPa sur une barre de diamètre 55 mm. Une seconde limitation tient à la grande sensibilité aux conditions de refroidissement des résultats obtenus avec ces nuances (déjà

reflétée dans la sensibilité aux dimensions de la pièce), lorsqu'elles sont utilisées au maximum de leurs performances. De ce fait, s'il est possible, en laboratoire, d'obtenir des valeurs de $R_{p0,2}$ atteignant 900-940 MPa, ces résultats sont difficilement transposables à une production industrielle.

[0018] Les solutions techniques actuelles pour la fabrication de pièces sécables, et en particulier de bielles, sont donc aujourd'hui limitées aux niveaux de performances mentionnés ci-dessus.

[0019] Une évolution à première vue évidente pour l'homme de métier consisterait, par exemple, à augmenter encore les teneurs en V. Ceci serait toutefois peu efficace car seul le vanadium en solution solide avant refroidissement peut contribuer au durcissement par précipitation. Or, à des teneurs supérieures à 0,35-0,40%, il devient difficile d'effectuer une remise en solution complète des précipités contenant du V, même pour les températures de forgeage communément utilisées (de l'ordre de 1250°C).

[0020] Le but de l'invention est de proposer une nuance et un procédé de fabrication de pièces sécables permettant de dépasser les limitations soulignées ci-dessus avec en particulier :

- la possibilité d'obtenir des caractéristiques mécaniques élevées, se traduisant par un bénéfice mesurable sur les performances en fatigue et en tassement ;
- la possibilité d'obtenir ces caractéristiques mécaniques de manière robuste, c'est-à-dire de rendre ces caractéristiques peu sensibles aux fluctuations des paramètres du procédé de mise en forme.

[0021] A cet effet, l'invention a pour objet un acier pour pièce sécable mise en forme à chaud, caractérisé en ce que sa composition consiste en, exprimée en pourcentages pondéraux :

- $0,15\% \leq C \leq 0,40\%$; de préférence $0,20\% \leq C \leq 0,35\%$;
- $0,60\% \leq Mn \leq 1,80\%$; de préférence $0,80\% \leq Mn \leq 1,60\%$;
- Traces $\leq Cr \leq 1,60\%$;
- Traces $\leq Mo \leq 0,40\%$;
- Traces $\leq Ni \leq 1,50\%$; de préférence traces $\leq Ni \leq 1,0\%$; mieux traces $\leq Ni \leq 0,60\%$;
- Traces $\leq Cu \leq 0,80\%$;
- $0,02\% \leq V \leq 0,70\%$;
- Traces $\leq Nb \leq 0,08\%$;
- Traces $\leq Si \leq 1,20\%$; de préférence traces $\leq Si \leq 0,60\%$;
- Traces $\leq Al \leq 0,10\%$;
- Traces $\leq B \leq 0,010\%$;
- Traces $\leq Ti \leq 0,10\%$;
- Traces $\leq S \leq 0,15\%$; de préférence $0,005\% \leq S \leq 0,15\%$;
- Traces $\leq P \leq 0,10\%$;
- Traces $\leq Ca \leq 0,010\%$;
- Traces $\leq Te \leq 0,030\%$;
- Traces $\leq Se \leq 0,050\%$;
- Traces $\leq Bi \leq 0,10\%$;
- Traces $\leq Pb \leq 0,20\%$;
- Traces $\leq N \leq 0,025\%$;
- Traces $\leq O \leq 0,008\%$;

le reste étant du fer et des impuretés liées à l'élaboration ; et pour laquelle les relations suivantes sont vérifiées :

$$* V' = V\% + 2 Nb\% + Cu\%/5 \geq 0,18\% ;$$

$$* Bs = 830 - 270C\% - 90Mn\% - 37Ni\% - 70Cr\% - 83 Mo\% - 50Cu\% - 100V\% \leq Bs_{lim}, \text{ avec } Bs_{lim} \text{ calculé comme suit :}$$

$$Bs_{lim} = 530 + 330 (V' - 0,18), \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est inférieur à } 600 ;$$

$$Bs_{lim} = 600, \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est supérieur ou égal à } 600 ;$$

et en ce que sa microstructure comporte au moins 60% d'un mélange de ferrite bainitique et de carbures ou d'austénite résiduelle, le reste de la microstructure comportant au plus 40% de martensite et/ou de ferrite pro-eutectoïde et/ou de perlite, la présence de ferrite pro-eutectoïde et/ou de perlite étant limitée à au plus 10%.

EP 3 378 957 A1

[0022] De préférence, $Ti \geq 3,5 \text{ N\%}$ si $B \geq 0,0010\%$.

[0023] Dans ce cas, de préférence traces $\leq N \leq 0,010\%$.

[0024] L'invention a également pour objet un procédé de fabrication d'une pièce mécanique, caractérisé en ce que :

- 5 - on met en forme à chaud en phase austénitique un demi-produit en acier dont la composition consiste en, exprimée en pourcentages pondéraux :

* $0,15\% \leq C \leq 0,40\%$; de préférence $0,20\% \leq C \leq 0,35\%$;

* $0,60\% \leq Mn \leq 1,80\%$; de préférence $0,80\% \leq Mn \leq 1,60\%$;

10 * Traces $\leq Cr \leq 1,60\%$;

* Traces $\leq Mo \leq 0,40\%$;

* Traces $\leq Ni \leq 1,50\%$; de préférence traces $\leq Ni \leq 1,0\%$; mieux traces $\leq Ni \leq 0,60\%$;

* Traces $\leq Cu \leq 0,80\%$;

* $0,02\% \leq V \leq 0,70\%$;

15 * Traces $\leq Nb \leq 0,08\%$;

* Traces $\leq Si \leq 1,20\%$; de préférence traces $\leq Si \leq 0,60\%$;

* Traces $\leq Al \leq 0,10\%$;

* Traces $\leq B \leq 0,010\%$;

* Traces $\leq Ti \leq 0,10\%$;

20 * Traces $\leq S \leq 0,15\%$; de préférence $0,005\% \leq S \leq 0,15\%$;

* Traces $\leq P \leq 0,10\%$;

* Traces $\leq Ca \leq 0,010\%$;

* Traces $\leq Te \leq 0,030\%$;

* Traces $\leq Se \leq 0,050\%$;

25 * Traces $\leq Bi \leq 0,10\%$;

* Traces $\leq Pb \leq 0,20\%$;

* Traces $\leq N \leq 0,025\%$;

* Traces $\leq O \leq 0,008\%$;

30 le reste étant du fer et des impuretés liées à l'élaboration ; et pour laquelle les relations suivantes sont vérifiées :

* $V' = V\% + 2 Nb\% + Cu\%/5 \geq 0,18\%$;

* $Bs = 830 - 270C\% - 90Mn\% - 37Ni\% - 70Cr\% - 83Mo\% - 50Cu\% - 100V\% \leq Bs_{lim}$, avec Bs_{lim} calculé comme suit :

35
$$Bs_{lim} = 530 + 330 (V' - 0,18), \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est inférieur à } 600 ;$$

$$Bs_{lim} = 600, \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est supérieur ou égal à } 600 ;$$

- 40 - on réalise un refroidissement à l'air calme, ou à l'air pulsé, ou sous un capot ou en caisse dudit demi-produit, de préférence à des vitesses de refroidissement supérieures ou égales à $0,3^\circ\text{C/s}$ dans l'intervalle $750-550^\circ\text{C}$ et comprises entre $0,1$ et 5°C/s dans l'intervalle $550-300^\circ\text{C}$;

- 45 - on réalise au moins un revenu dudit demi-produit refroidi à une température T_{rev} comprise entre 450 et 680°C pendant une durée totale de 15 min à 10 h .

[0025] De préférence, $Ti \geq 3,5 \text{ N\%}$ si $B \geq 0,0010\%$.

[0026] Dans ce cas, de préférence traces $\leq N \leq 0,010\%$.

50 **[0027]** On peut réaliser après le refroidissement suivant la mise en forme à chaud une mise en forme du demi-produit, par exemple par usinage ou conformage, qui rapproche les dimensions du demi-produit des dimensions définitives précises du produit sans modifier sa microstructure.

[0028] On peut réaliser après le revenu une mise en forme du demi-produit, par exemple par usinage ou conformage, qui confère au demi-produit les dimensions définitives précises du produit sans modifier sa microstructure.

[0029] On peut procéder à une casse contrôlée de ladite pièce mécanique, si celle-ci est une pièce mécanique sécable.

55 **[0030]** On peut procéder à au moins un traitement thermique supplémentaire ultérieurement audit revenu, ledit traitement supplémentaire ayant un paramètre de revenu inférieur à celui dudit revenu.

[0031] L'invention a également pour objet une pièce mécanique en acier, caractérisée en ce que :

EP 3 378 957 A1

- sa composition consiste en, exprimée en pourcentages pondéraux :

* $0,15\% \leq C \leq 0,40\%$; de préférence $0,20\% \leq C \leq 0,35\%$;
 * $0,60\% \leq Mn \leq 1,80\%$; de préférence $0,80\% \leq Mn \leq 1,60\%$;
 * Traces $\leq Cr \leq 1,60\%$;
 * Traces $\leq Mo \leq 0,40\%$;
 * Traces $\leq Ni \leq 1,50\%$; de préférence traces $\leq Ni \leq 1,0\%$; mieux traces $\leq Ni \leq 0,60\%$;
 * Traces $\leq Cu \leq 0,80\%$;
 * $0,02\% \leq V \leq 0,70\%$;
 * Traces $\leq Nb \leq 0,08\%$;
 * Traces $\leq Si \leq 1,20\%$; de préférence traces $\leq Si \leq 0,60\%$;
 * Traces $\leq Al \leq 0,10\%$;
 * Traces $\leq B \leq 0,010\%$;
 * Traces $\leq Ti \leq 0,10\%$;
 * Traces $\leq S \leq 0,15\%$; de préférence $0,005\% \leq S \leq 0,15\%$;
 * Traces $\leq P \leq 0,10\%$;
 * Traces $\leq Ca \leq 0,010\%$;
 * Traces $\leq Te \leq 0,030\%$;
 * Traces $\leq Se \leq 0,050\%$;
 * Traces $\leq Bi \leq 0,10\%$;
 * Traces $\leq Pb \leq 0,20\%$;
 * Traces $\leq N \leq 0,025\%$;
 * Traces $\leq O \leq 0,008\%$;

le reste étant du fer et des impuretés liées à l'élaboration ; et pour laquelle les relations suivantes sont vérifiées :

$$* V' = V\% + 2 Nb\% + Cu\%/5 \geq 0,18\% ;$$

$$* Bs = 830 - 270C\% - 90Mn\% - 37Ni\% - 70Cr\% - 83Mo\% - 50Cu\% - 100V\% \leq Bs_{lim}, \text{ avec } Bs_{lim} \text{ calculé comme suit :}$$

$$Bs_{lim} = 530 + 330 (V' - 0,18), \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est inférieur à } 600 ;$$

$$Bs_{lim} = 600, \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est supérieur ou égal à } 600 ;$$

et dont la microstructure comporte au moins 60% d'un mélange de ferrite bainitique et de carbures ou d'austénite résiduelle, le reste de la microstructure comportant au plus 40% de martensite et/ou de ferrite pro-eutectoïde et/ou de perlite, la présence de ferrite proeutectoïde et/ou de perlite étant limitée à au plus 10%.

[0032] De préférence, $Ti \geq 3,5 N\%$ si $B \geq 0,0010\%$.

[0033] Dans ce cas, de préférence traces $\leq N \leq 0,010\%$.

[0034] Il peut s'agir d'une pièce sécable.

[0035] Il peut s'agir d'une bielle de moteur à explosion.

[0036] Comme on l'aura compris, l'invention consiste d'abord à préparer un acier de composition précise, lui conférant une température Bs de début de formation de la bainite relativement basse et une relation liant les teneurs en V, Nb et Cu assurant d'une part les performances élevées de la pièce, et d'autre part une bonne sécabilité du produit final de par la facilitation de la rupture de type fragile. La mise en forme à chaud et le refroidissement qui suit, qui est un refroidissement à une vitesse modérée assurée par de l'air calme, de l'air pulsé ou une mise sous capot ou en caisse du demi-produit, procurent au demi-produit une structure majoritairement bainitique, dont le restant (à hauteur de 40% au maximum) est essentiellement de la martensite avec une quantité de ferrite pro-eutectoïde + perlite ne dépassant pas 10%. Un revenu de précipitation est ensuite pratiqué pour ajuster les propriétés mécaniques.

[0037] Dans un tout autre domaine que celui des pièces sécables, les nuances dites « bainitiques » (voir les documents EP-B1-0 787 812, S. Engineer, H. Justinger, P. Janssen, M. Härtel, C. Hampel, F. Randelhoff, Int Conf Steel in Cars and Trucks, Salzburg, Austria, 2011, et H. Roelofs, S. Hasler, M. Lembke, F.G. Caballero, Int Conf Steel in Cars and Trucks, Salzburg, Austria, 2011) connaissent une popularité croissante dans le cadre de la substitution aux aciers trempé-revenus (par rapport auxquels elles permettent d'éviter un traitement thermique), ou pour remplacer les aciers ferrito-perlitiques microalliés (par exemple le 38MnSiV5) avec un gain de performances.

[0038] On rappelle que ces nuances bainitiques ont des compositions adaptées de manière à obtenir, avec peu voire sans contrôle du refroidissement, une microstructure majoritairement bainitique dans la chaude de forge. L'emploi du terme « nuance bainitique » dans la suite du document devra se comprendre dans ce sens, et ce qu'on entend par « majoritairement bainitique » sera explicité plus loin.

[0039] Outre l'avantage de permettre de supprimer les traitements thermiques de trempe et revenu dans certaines chaînes de fabrication, ces nuances présentent en général des résistances à la flexion par choc (résilience) supérieures à celles des nuances ferrito-perlitiques de même résistance mécanique. Dans le cadre des pièces sécables, toutefois, cet avantage devient un inconvénient majeur, car l'opération de casse contrôlée nécessite une faible résistance à la flexion par choc.

[0040] Un autre inconvénient majeur des nuances bainitiques de refroidissement continu est qu'elles présentent souvent des valeurs modestes pour leur rapport $R_{p0,2}/R_m$. Ainsi, il est fréquent d'obtenir des $R_{p0,2}$ de l'ordre de 650-750 MPa, pour des résistances mécaniques, toutefois, de l'ordre de 1100-1200 MPa. Cette différence de comportement est d'autant plus marquée si l'on considère la limite d'élasticité vraie, qui peut-être bien plus faible que la limite conventionnelle pour les microstructures bainitiques telles qu'obtenues après refroidissement continu (et ce, par comparaison avec les microstructures ferrito-perlitiques).

[0041] Or, au moins pour le cas particulier des bielles sécables, un des critères de dimensionnement est, en plus de la résistance à la fatigue, la résistance au tassement en compression. Il s'agit, de manière simplifiée, de prévenir toute déformation permanente de la bielle lors d'une ou de quelques surcharge(s) importante(s) mais de durée limitée. Cette résistance est en général évaluée sur quelques cycles seulement (ordre de grandeur de la dizaine). En première approximation, elle est corrélée à la limite d'élasticité vraie, de sorte que l'utilisation de nuances bainitiques telles que définies à l'heure actuelle conduit à des performances très en retrait par rapport à celles des nuances ferrito-perlitiques.

[0042] De manière corollaire, un second inconvénient majeur du faible rapport $R_{p0,2}/R_m$ des nuances bainitiques est qu'il faudra, pour obtenir une limite d'élasticité conventionnelle proche de celle des nuances ferrito-perlitiques, augmenter le R_m de manière importante, avec pour conséquence une très forte détérioration de l'usabilité.

[0043] Il est donc clair que les nuances bainitiques de refroidissement continu, telles qu'elles sont actuellement utilisées, ne permettent pas d'envisager aisément leur utilisation pour la fabrication d'une pièce sécable, et tout particulièrement d'une bielle pour moteur à combustion interne. Cette solution ne présenterait en effet que des inconvénients par rapport aux aciers ferrito-perlitiques micro-alliés, ce qui se reflète bien dans le fait que seule cette microstructure se retrouve sur ce type de pièces telles qu'elles sont actuellement commercialisées.

[0044] De manière surprenante, les inventeurs ont conclu que, pour pallier les difficultés mentionnées ci-dessus, il était possible d'utiliser une nuance conduisant à une microstructure majoritairement bainitique dans la chaude de forge, même en l'absence de contrôle du refroidissement, ou seulement avec un contrôle peu contraignant, tel que permis par des équipements communément trouvés chez les forgerons, à savoir un convoyeur avec ou sans capot, des ventilateurs ou une caisse de refroidissement). L'invention consiste, de plus, à modifier le procédé de fabrication de la pièce, pour y intégrer un revenu de précipitation après forge, et à utiliser des ajustements très spécifiques de la composition, qui sont tels que des gains en performance spectaculaires sont obtenus, et compensent largement le coût de l'allongement de la fabrication qu'entraîne l'exécution du revenu de précipitation.

[0045] On précise ici ce qu'on entend par « bainite majoritaire » au sens de l'invention :

- la microstructure comporte un mélange de ferrite bainitique (soit conventionnelle, c'est à dire germée aux joints de grains, soit germée de manière intragranulaire, ce qui donne une structure également appelée « ferrite aciculaire ») et de carbures ou d'austénite résiduelle, l'ensemble, communément désigné « bainite » par l'homme du métier, étant présent à hauteur de 60% minimum ;
- le reste de la microstructure, à hauteur de 40% maximum, est constitué principalement de martensite en complément ;
- on interdit, par contre, la présence de ferrite pro-eutectoïde ou de perlite à des teneurs supérieures à 10% pour le total de ces deux constituants ; en effet, dans la ferrite pro-eutectoïde (telle que présente dans les nuances ferrito-perlitiques), le vanadium tend à précipiter au cours de la transformation, de sorte que le potentiel de durcissement au revenu est faible voir nul ; il en va de même pour la ferrite lamellaire présente dans la perlite, et qui est donc incluse dans les constituants qui, pris ensemble, ne doivent pas dépasser 10% de la microstructure.

[0046] Autrement dit, la microstructure de l'acier doit contenir au moins 60% de bainite au sens classique pour l'homme du métier et au plus 40% d'autres constituants, parmi lesquelles la ferrite pro-eutectoïde et la perlite ne doivent pas, prises ensemble, représenter plus de 10% de la microstructure.

[0047] Selon l'invention, l'acier a la composition, en pourcentage pondéraux :

- $0,15\% \leq C \leq 0,40\%$; de préférence $0,20\% \leq C \leq 0,35\%$;
- $0,60\% \leq Mn \leq 1,80\%$; de préférence $0,80\% \leq Mn \leq 1,60\%$;
- Traces $\leq Cr \leq 1,60\%$;

EP 3 378 957 A1

- Traces $\leq \text{Mo} \leq 0,40\%$;
- Traces $\leq \text{Ni} \leq 1,50\%$; de préférence traces $\leq \text{Ni} \leq 1,0\%$; mieux traces $\leq \text{Ni} \leq 0,60\%$;
- Traces $\leq \text{Cu} \leq 0,80\%$;
- $0,02\% \leq \text{V} \leq 0,70\%$;
- 5 - Traces $\leq \text{Nb} \leq 0,08\%$;
- Traces $\leq \text{Si} \leq 1,20\%$; de préférence traces $\leq \text{Si} \leq 0,60\%$;
- Traces $\leq \text{Al} \leq 0,10\%$;
- Traces $\leq \text{B} \leq 0,010\%$;
- Traces $\leq \text{Ti} \leq 0,10\%$;
- 10 - Traces $\leq \text{S} \leq 0,15\%$; de préférence $0,005\% \leq \text{S} \leq 0,15\%$;
- Traces $\leq \text{P} \leq 0,10\%$;
- Traces $\leq \text{Ca} \leq 0,010\%$;
- Traces $\leq \text{Te} \leq 0,030\%$;
- Traces $\leq \text{Se} \leq 0,050\%$;
- 15 - Traces $\leq \text{Bi} \leq 0,10\%$;
- Traces $\leq \text{Pb} \leq 0,20\%$;
- Traces $\leq \text{N} \leq 0,025\%$;
- Traces $\leq \text{O} \leq 0,008\%$;

20 le reste étant du fer et des impuretés liées à l'élaboration ; et pour laquelle les relations suivantes sont vérifiées :

$$* V' = V\% + 2 \text{ Nb}\% + \text{Cu}\%/5 \geq 0,18\%.$$

$$* \text{Bs} = 830 - 270\text{C}\% - 90\text{Mn}\% - 37\text{Ni}\% - 70\text{Cr}\% - 83 \text{ Mo}\% - 50\text{Cu}\% - 100\text{V}\% \leq \text{Bs}_{\text{lim}}, \text{ avec } \text{Bs}_{\text{lim}} \text{ calculé comme suit :}$$

$$\text{Bs}_{\text{lim}} = 530 + 330 (V' - 0,18), \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est inférieur à } 600 ;$$

$$\text{Bs}_{\text{lim}} = 600, \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est supérieur ou égal à } 600.$$

[0048] De préférence, $\text{Ti} \geq 3,5 \text{ N}\%$ si $\text{B} \geq 0,0010\%$.

[0049] Dans ce cas, de préférence traces $\leq \text{N} \leq 0,010\%$.

[0050] On utilise ledit acier pour la fabrication d'une pièce mécanique, typiquement d'une pièce sécable, selon un procédé caractérisé en ce qu'il présente au moins les étapes suivantes :

- on coule et solidifie un acier de composition conforme à la description ci-dessus ;
- on réalise un ou plusieurs formage(s) à chaud, dans le domaine austénitique, typiquement par laminage et/ou forgeage à chaud ;
- 40 - on laisse refroidir le produit obtenu à l'air, en modulant éventuellement la vitesse de refroidissement à l'aide des outils standards qui sont à la disposition des forgerons (caisse, convoyeur avec ou sans capot, ventilateurs) ; ce refroidissement naturel, éventuellement ralenti ou accéléré dans des proportions modérées doit conférer à la pièce une structure majoritairement bainitique selon la définition qu'on en a donné précédemment ; il correspond typiquement à des vitesses de refroidissement supérieures ou égales à $0,3 \text{ }^\circ\text{C/s}$ dans l'intervalle $750\text{-}550 \text{ }^\circ\text{C}$ et comprises entre $0,1$ et $5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ dans l'intervalle $550\text{-}300 \text{ }^\circ\text{C}$; il doit être entendu que ces conditions sont visées pour toutes les portions de la pièce, et que les dimensions de celle-ci peuvent nécessiter des adaptations particulières de la méthode de refroidissement pour éviter une hétérogénéité trop importante de la microstructure et obtenir la microstructure visée dans l'ensemble de la pièce, notamment pour que la sécabilité de la pièce soit uniformément satisfaisante si c'est l'objectif recherché ; mais cette problématique est familière à l'homme du métier qui doit procéder à des traitements thermiques de pièces volumineuses et/ou de formes complexes ;
- 50 - on procède à un revenu à une température Trev comprise entre 450 et $680 \text{ }^\circ\text{C}$, pour une durée de 15 min à 10 h selon les dimensions de la pièce et les équipements disponibles, dans l'objectif double d'augmenter la limite d'élasticité vraie de la pièce par précipitation tout en conservant ou diminuant sensiblement sa résistance mécanique, et d'en diminuer fortement la résistance à la flexion par choc pour rendre le matériau sécable ;
- 55 - on procède à une opération de casse contrôlée de la pièce par un procédé classique exploitant la faible résistance à la flexion par choc du matériau.

[0051] Une ou plusieurs opérations d'usinage pourront prendre place à différentes étapes de la mise en oeuvre décrite

ci-dessus.

[0052] Un ou plusieurs traitements thermiques supplémentaires, chacun effectué à une température T pendant une durée t, pourront être réalisés au cours de la mise en oeuvre décrite ci-dessus, ultérieurement au revenu de précipitation.. Pour autant, le paramètre de revenu total de ces traitements supplémentaires ne doit pas excéder le paramètre de revenu du revenu de durcissement par précipitation qui a permis l'établissement des caractéristiques mécaniques, afin de ne pas franchement modifier celles-ci. On rappelle que le « paramètre de revenu » est classiquement défini, pour chaque traitement, par $M = T (20 + \log t) \cdot 10^{-3}$ (avec T en K et t en h).

[0053] La pièce concernée pourra être, mais sans limitation, une bielle pour moteur à combustion interne.

[0054] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui suit.

[0055] Le tableau 1 compare les possibilités typiquement offertes par les différentes solutions ferrito-perlitiques mentionnées précédemment avec celles de la présente invention.

Tableau 1 : Limites d'élasticité conventionnelles et résistances à la traction typiques de bielles réalisées selon l'art antérieur et selon l'invention

Nuance	Rp _{0,2} / Rm typiques, bielle automobile MPa	Rp _{0,2} / Rm typiques, bielle poids lourd MPa
C70S6 (état forgé)	650 - 700 / 950-1050	520 - 570 / 900-1000
36MnV4S (état forgé)	850 - 920 / 1100-1200	720 - 750 / 1000-1100
Invention (état forgé puis revenu)	≥ 900 / ≥ 1100	≥ 900 / ≥ 1100

[0056] Le tableau 1 ci-dessus montre les limites d'élasticité conventionnelles Rp_{0,2} et les résistances à la traction Rm typiquement attendues sur des pièces de dimensions différentes (bielles pour automobiles d'une part, bielles pour poids lourds d'autre part), les valeurs maximales pour les nuances de référence étant celles qui sont accessibles si le refroidissement suivant le forgeage est réalisé dans des conditions optimisées.

[0057] La nuance standard C70S6 ne permet pas de dépasser une limite d'élasticité d'environ 650 MPa, et ce même sur des pièces de petites dimensions. La nuance 36MnV4S présente à l'heure actuelle les meilleures performances mécaniques (voir par exemple Lipp et Kaufmann, MTZ, 2011, p.70), mais reste néanmoins, le plus typiquement, limitée à une limite d'élasticité de 850 MPa sur petite pièce, qui chute à 720-750 MPa sur grosse pièce.

[0058] En comparaison, la nuance utilisée dans l'invention permet, à l'état forgé et revenu, d'atteindre et de dépasser largement une limite d'élasticité conventionnelle Rp_{0,2} de 900 MPa. Or, la limite d'élasticité conventionnelle est, en première approximation, un bon indicateur des performances en service des bielles. Comme le montre le tableau 1, ceci est, de plus, possible de manière bien moins dépendante de la taille de la bielle que pour les nuances ferrito-perlitiques. De plus, une excellente résistance à la traction est conservée, là encore indépendamment de la taille de la bielle.

[0059] Il est à noter que l'ensemble des nuances des exemples du tableau 1 présente des valeurs de KV typiquement inférieures à 10J, et correspond donc bien, de ce point de vue, à une utilisation pour la fabrication de pièces sécables.

[0060] On va à présent justifier le choix des gammes de composition pour les divers éléments de l'invention. Comme on l'a dit, toutes les teneurs sont données en pourcentages pondéraux.

[0061] La teneur en C est comprise entre 0,15 et 0,40%, de préférence entre 0,20 et 0,35%.

[0062] Comme on l'a vu, la microstructure exigée pour l'invention est majoritairement bainitique, et cette microstructure doit être obtenue au cours du refroidissement après mise en forme à chaud. Une teneur en C supérieure à 0,15% permet de limiter les additions nécessaires à la suppression de la ferrite pro-eutectoïde (Mo par exemple), dont la présence n'est pas souhaitable dans le contexte de l'invention. Toutefois, C ayant un effet retardant sur la transformation bainitique, on limite sa teneur à 0,40% pour éviter une formation excessive de martensite.

[0063] Le choix de la gamme préférée 0,20-0,35% permet d'éviter plus assurément à la fois une présence excessive de ferrite (pour la limite basse) et de martensite (pour la limite haute).

[0064] La teneur en Mn est comprise entre 0,60 et 1,80%, de préférence entre 0,80 et 1,60%.

[0065] Mn est utilisé, conjointement avec Cr, pour abaisser la température Bs de début de formation de la bainite lors d'un refroidissement continu. Cet effet est significativement obtenu à partir de 0,60% de Mn. Toutefois, il est bien connu que Mn contribue de manière importante à la formation de bandes ségréguées qui seront, étant données les teneurs en C utilisées, particulièrement néfastes car elles pourront conduire, selon le chemin de refroidissement, à la formation de bandes martensitiques de très haute dureté. Pour cette raison, la teneur maximale en Mn est limitée à 1,80%. La gamme préférée de 0,80-1,60% permet d'obtenir plus assurément l'abaissement de Bs et d'éviter plus assurément des ségrégations excessives.

[0066] La teneur en Cr est comprise entre des traces et 1,60%.

[0067] Dans la présente invention, Cr est utilisé au même titre que Mn, pour abaisser la température Bs de début de transformation bainitique. Dans les limites imposées, il peut être utilisé en substitution partielle ou totale d'une partie du Mn et/ou de tout ou partie du Ni, pour peu que la condition sur Bs_{lim} reste vérifiée (cette condition étant détaillée plus loin). La teneur en Cr est limitée à 1,60% pour limiter les problèmes de ségrégation. Cr peut n'être présent qu'à l'état de traces résultant de l'élaboration et, donc, ne pas être ajouté volontairement, si par ailleurs les teneurs des autres éléments permettent de respecter la condition requise sur Bs_{lim} .

[0068] La teneur en Mo est comprise entre des traces et 0,40%.

[0069] Le rôle de Mo sur la trempabilité est bien établi : il permet d'éviter la formation de ferrite et de perlite, mais, pour autant, il ne ralentit pas ou peu la formation de la bainite. Il peut donc être ajouté en quantités variables selon le diamètre de la pièce. La limite supérieure de 0,40% est établie principalement pour des raisons économiques.

[0070] La teneur en Ni est comprise entre des traces et 1,50% ; de préférence entre des traces et 1,0%, mieux entre des traces et 0,60%.

[0071] Il peut être présent uniquement de par son introduction par les matières premières en tant qu'élément résiduel, ou être ajouté en quantité suffisante pour contribuer à la diminution de la température Bs_{lim} , auquel cas il pourra en partie se substituer à Mn, Cr, ou Mo. Mais sa teneur est limitée à 1,50% pour des raisons de coût, le Ni étant onéreux et susceptible de voir son prix fortement fluctuer sur le marché.

[0072] La teneur en Cu est comprise entre des traces et 0,80%.

[0073] Cu peut être utilisé pour contribuer au durcissement secondaire qui communiquera à la pièce ses caractéristiques finales, mais des teneurs supérieures à 0,80% sont en général à proscrire car elles sont associées à des difficultés importantes de mise en forme à chaud. Son addition n'est pas obligatoire, pourvu que les teneurs d'autres éléments garantissent une température Bs_{lim} suffisamment basse et que la relation entre V, Nb et Cu qui sera vue plus loin soit respectée.

[0074] La teneur en V est comprise entre 0,02 et 0,70%.

[0075] L'ajout de V permet d'une part de contribuer à la trempabilité de l'acier, et d'autre part de contrôler, en coopération avec Cu et Nb s'ils sont présents, le durcissement secondaire qui donnera à la pièce ses caractéristiques mécaniques. Un minimum de V est nécessaire car, comme on peut le constater, le seul ajout de Cu ne permet pas la vérification du critère $V\% + 2 Nb\% + Cu\%/5 \geq 0,18\%$ qui sera vu plus loin. On sait de plus que les additions de Nb pour obtenir un durcissement secondaire par précipitation au revenu ne sont efficaces qu'en complément d'un minimum de V mais pas de manière indépendante. Son addition est par ailleurs limitée à 0,70% pour des raisons techniques (absence d'effet au-delà de cette teneur en raison de la non-remise en solution des précipités lors du réchauffage) et économiques (coût élevé).

[0076] Les teneurs en V, Nb et Cu doivent de plus vérifier la relation suivante :

$$V' = V\% + 2 Nb\% + Cu\%/5 \geq 0,18\%.$$

[0077] Cette relation est une condition importante de l'invention, car elle garantit non seulement une augmentation significative des propriétés mécaniques lors du revenu, mais également l'obtention de la fragilisation qui conduira à l'obtention d'une nuance sécable à hautes performances.

[0078] Les teneurs en C, Mn, Cr, Ni, Mo, Cu et V exprimées en % pondéraux doivent, de plus, vérifier la relation suivante qui détermine la température Bs (en °C) de début de formation de la bainite :

$$Bs = 830 - 270 C\% - 90 Mn\% - 37 Ni\% - 70 Cr\% - 83 Mo\% - 50 Cu\% - 100 V\% \leq Bs_{lim}$$

avec Bs_{lim} calculé comme suit :

$$Bs_{lim} = 530 + 330 (V' - 0,18)$$

dans le cas où $530 + 330 (V' - 0,18)$ est inférieur à 600 (en notant que l'exigence sur V' conduit à une valeur basse limite de 530) ;

$Bs_{lim} = 600$ dans le cas où $530 + 330 (V' - 0,18)$ est supérieur ou égal à 600.

[0079] La finesse de la microstructure permet, lorsque cette relation est vérifiée, d'obtenir des caractéristiques mécaniques après forgeage suffisamment élevées pour que le durcissement secondaire les amène à l'objectif de l'invention.

[0080] Comme on l'aura compris, toutefois, il est possible, dans certaines limites, de tolérer des caractéristiques mécaniques avant revenu d'autant plus faibles que le pouvoir durcissant du revenu (mesuré par V') est élevé.

[0081] Ainsi, on corrèle l'exigence sur Bs au pouvoir durcissant, de sorte que la valeur calculée Bs devra être inférieure ou égale à 530°C si la valeur de V' est à son minimum, mais pourra être inférieure ou égale à une autre température limite $B_{s_{lim}}$, pouvant aller jusqu'à 600°C, si le pouvoir durcissant, que traduit la formule V', est plus élevé que son minimum.

[0082] Au-delà de $B_{s_{lim}} = 600^\circ\text{C}$, toutefois, la compensation de la faiblesse des propriétés mécaniques par le revenu devient difficile, de même que la capacité à obtenir la microstructure de l'invention. Pour cette raison, on ne tolère pas de valeur de Bs supérieure à 600°C, et ce indépendamment de la valeur de V'.

[0083] La teneur en Nb est comprise entre des traces et 0,08%.

[0084] Cet élément optionnel peut être utilisé pour affiner la structure austénitique après forgeage ou laminage à chaud. Il intervient également dans la réaction de durcissement secondaire et peut, dans cette dernière, se substituer à une partie du V dans la mesure où l'équation définissant V' vue précédemment, reliant les éléments précipitant lors du revenu, est vérifiée. Son addition est limitée à 0,08%, non seulement parce qu'il est difficile de remettre en solution les précipités formés au-delà de cette teneur, mais aussi pour limiter la formation de carbonitrides primaires lors de la solidification.

[0085] La teneur en Si est comprise entre des traces et 1,20% ; de préférence Si est compris entre des traces et 0,60%.

[0086] Si est parfois utilisé pour ralentir la formation de la cémentite et favoriser le développement d'une microstructure présentant de l'austénite résiduelle à température ambiante. Dans le cadre de l'invention, l'austénite résiduelle étant déstabilisée lors du revenu et n'étant, de ce fait, pas utile, des additions importantes de Si ne sont pas nécessaires. Le silicium peut par ailleurs être utilisé pour la désoxydation du métal liquide, de manière alternative à l'aluminium.

[0087] La teneur en Al est comprise entre des traces et 0,10%.

[0088] Al est optionnellement ajouté pour assurer la désoxydation de l'acier, en particulier si la teneur en Si est relativement faible. Les ajouts sont plafonnés à 0,10% pour limiter les risques de formation d'inclusions de réoxydation par contact du métalliquide avec l'air.

[0089] La teneur en O est comprise entre des traces et 0,008%.

[0090] La présence d'oxygène est limitée à 0,008% pour éviter une détérioration des performances mécaniques des pièces.

[0091] La teneur en B est comprise entre des traces et 0,010%.

[0092] Cet élément optionnel peut être utilisé pour garantir l'homogénéité de la structure (limiter la présence de ferrite). Dans ce cas, il pourra être préférable de coupler l'addition de B avec une addition de Ti qui capte l'azote pour former des nitrures, et évite la formation de nitrures de B. Ainsi tout le B est disponible en solution pour jouer son rôle d'homogénéisateur de la structure.

[0093] La teneur en Ti est comprise entre des traces et 0,10%.

[0094] Comme on vient de le dire, cet élément optionnel peut être utilisé principalement pour les nuances au B. Dans le cas d'une élaboration au B (correspondant à $B \geq 0,0010\%$), de préférence on limite N à 100 ppm (0,010%) et on s'assure que l'addition de Ti vérifie la condition $Ti\% \geq 3,5 N\%$.

[0095] La teneur en S est comprise entre des traces et 0,15%.

[0096] Comme il est bien connu, cet élément peut, le cas échéant, être laissé à un niveau relativement élevé, voire ajouté volontairement, pour améliorer l'usinabilité de l'acier. On lui confère alors une teneur de 0,005 à 0,15%. De préférence, on peut accompagner alors cette présence significative de S par une addition de Ca jusqu'à 0,010%, et/ou de Te jusqu'à 0,030%, et/ou de Se jusqu'à 0,050%, et/ou de Bi jusqu'à 0,10% et/ou de Pb jusqu'à 0,20%.

[0097] La teneur en P est comprise entre des traces et 0,10%.

[0098] P peut être utilisé pour son pouvoir durcissant et pour son pouvoir fragilisant. Toutefois, on limite sa teneur à 0,10%, car ces teneurs peuvent conduire à des difficultés d'élaboration, de laminage et de forgeage.

[0099] La teneur en N est comprise entre des traces et 0,025%.

[0100] Dans le cas de l'utilisation conjointe de B et de Ti (c'est-à-dire de teneurs en B de au moins 0,0010% et en Ti de au moins 0,005%), de préférence on limite N à 0,010% pour limiter la formation de nitrures de bore.

[0101] Par contre, dans le cas contraire, on pourra accepter ou imposer des teneurs en N supérieures, de manière à obtenir une précipitation du V plus intense. La teneur en N est naturellement limitée par la solubilité de l'azote dans l'acier liquide à des teneurs approchant 0,025%.

[0102] Les autres éléments contenus dans l'acier selon l'invention sont du fer et des impuretés résultant de l'élaboration, présentes à des teneurs habituelles compte tenu des matières premières utilisées et du mode d'élaboration de l'acier liquide (utilisation d'un convertisseur ou d'un four électrique à arc pour obtenir le métal liquide, traitement sous vide ou non du métal liquide...).

[0103] Il doit être entendu que les teneurs préférentielles éventuelles de chaque élément pris isolément sont indépendantes les unes des autres. Autrement dit, on pourra se situer dans une gamme préférentielle pour l'un ou plusieurs de ces éléments et hors des gammes préférentielles pour les autres éléments qui en comportent une.

[0104] Industriellement, la pièce selon l'invention peut être produite par formage à chaud d'un demi-produit tel qu'un lopin, une barre ou un bloom, présentant la composition décrite précédemment. Typiquement, cette mise en forme à chaud est un forgeage à chaud ou un laminage à chaud ou une succession de telles étapes. La pièce selon l'invention

peut aussi être produite par usinage de barres prêtes à l'emploi, dans la mesure où le procédé de fabrication de ces dernières correspond aux étapes du procédé décrit.

[0105] Dans le premier cas, le procédé selon l'invention fait intervenir une étape de mise en forme à chaud effectuée en phase austénitique (typiquement mais non exclusivement de 1100 à 1300°C, comme il faut tenir compte de la composition précise de l'acier pour déterminer s'il est en phase austénitique à une température donnée mais également pour assurer la remise en solution complète des éléments provoquant le durcissement secondaire), suivie typiquement d'un refroidissement naturel (c'est-à-dire à l'air, sans utilisation d'un milieu refroidissant puissant tel que l'eau, l'huile, un milieu cryogénique comme la neige carbonique ou l'azote liquide).

[0106] Un des points importants de l'invention est la possibilité d'obtenir des caractéristiques mécaniques relativement constantes avant le revenu, indépendamment des dimensions de la pièce mise en forme, telles que sa section maximale.

[0107] Ceci repose notamment sur l'obtention d'une microstructure bainitique homogène au cours du refroidissement, qui pourra être effectué naturellement, à l'air calme.

[0108] Néanmoins, si les installations le permettent, une adaptation du refroidissement pourra dans certains cas être utilisée, notamment pour obtenir des caractéristiques mécaniques initiales supérieures à celles qui seraient obtenues par un refroidissement naturel à l'air calme. Un refroidissement par air soufflé peut suffire à atteindre cet objectif. On devra cependant faire attention à ce que le refroidissement ne soit pas trop rapide au point de provoquer une apparition massive de martensite qui ferait passer la proportion de bainite à moins de 60%.

[0109] Inversement, un refroidissement ralenti, notamment par un capot coiffant la pièce venant d'être mise en forme, ou une mise en caisse de la pièce mise en forme, peut être utilisé dans certains cas pour assurer une présence de bainite suffisante.

[0110] De préférence, ce refroidissement est effectué à des vitesses supérieures ou égales à 0,3 °C/s dans l'intervalle 750-550 °C et comprises entre 0,1 et 5°C/s dans l'intervalle 550-300 °C.

[0111] Optionnellement, on effectue ensuite une ou plusieurs opérations telles qu'un conformage, un usinage... destinées à au moins rapprocher les dimensions du demi-produit des dimensions définitives du produit final, au cours desquelles l'état thermique de la pièce n'est pas sensiblement affecté et sa microstructure est donc conservée.

[0112] Le procédé fait ensuite intervenir, selon l'invention, une étape de revenu, à une température choisie pour optimiser le durcissement secondaire par précipitation, ce qui conduit de manière concomitante à une diminution de la ductilité et rend la pièce « sécable ». Habituellement, les proportions des divers constituants obtenus après le refroidissement suivant la mise en forme à chaud ne sont pas affectées par ce revenu, ou le sont peu. Les modifications microstructurelles introduites par le revenu portent très principalement sur la nature et le nombre des divers précipités qui participent au durcissement secondaire.

[0113] Ce traitement de revenu est effectué à une température Trev comprise entre 450 et 680°C, pour une durée de 15 min à 10 h selon les dimensions de la pièce et les équipements disponibles. De manière alternative à un simple revenu, on pourra effectuer plusieurs revenus, dans la même gamme de temps et température, selon les principes habituels et bien connus dictant le choix des paramètres de revenu, sans pour autant que ceci puisse être considéré comme s'écarter de la présente invention.

[0114] Comme on l'a dit plus haut, il est envisageable que d'autres traitements thermiques soient effectués postérieurement au revenu de durcissement par précipitation. Mais leur paramètre de revenu total ne devra pas dépasser celui du revenu de précipitation.

[0115] On doit souligner qu'un tel traitement de mise en forme à chaud suivie d'un revenu est en complet décalage avec la pratique industrielle courante, qui se base quasiment exclusivement sur l'utilisation de nuances ferrito-perlitiques micro-alliées, pour lesquelles un tel revenu serait sans intérêt technique.

[0116] Optionnellement, on effectue ensuite une ou plusieurs opérations telles qu'un conformage, un usinage... ne modifiant pas la microstructure obtenue grâce au revenu selon l'invention, de façon à conférer à la pièce ses dimensions définitives précises si celles-ci n'ont pas déjà été atteintes à l'issue des étapes précédentes. Il est possible que, dans certains cas, les traitements thermiques aient conduit à une déformation de la pièce plus ou moins sensible, de sorte que cet ultime ajustement des dimensions précises de la pièce soit nécessaire, en particulier s'il n'y a pas eu d'usinage, conformage ou autre opération similaire depuis la mise en forme à chaud et le refroidissement qui a suivi.

[0117] Il est à noter qu'il existe des aciers qui présentent des compositions assez voisines de celle de l'invention pour ce qui est des teneurs individuelles de chaque élément pris séparément, et qui peuvent parfois, fortuitement, respecter aussi les conditions posées par l'invention sur V' et Bs. C'est, par exemple, le cas pour le document WO-A-2011/124851. Cependant, ce document n'a pas du tout les mêmes exigences que l'invention, du point de vue de la microstructure de ses aciers et du durcissement par précipitation obtenu lors du revenu final. WO-A-2011/124851 décrit des pièces mécaniques à caractéristiques élevées et à structure bainitique, obtenues de manière simple, c'est-à-dire sans contrôle particulier de leur refroidissement après mise en forme et sans traitement thermique final obligatoire. Mais elles ne présentent pas de propriétés particulières de sécabilité, contrairement à ce qui est généralement recherché dans la présente invention.

[0118] De fait, les microstructures de WO-A-2011/124851 et de l'invention diffèrent en ce que dans WO-A-

2011/124851, on accepte seulement jusqu'à 20% au total de martensite, ferrite pro-eutectoïde et perlite. En revanche, l'invention accepte jusqu'à 30% de martensite (si la ferrite pro-eutectoïde et la perlite sont à leur teneur totale maximale tolérable de 10%), voire jusqu'à 40% de martensite (si la ferrite pro-eutectoïde et la perlite sont totalement absentes).

[0119] Cette tolérance plus grande vis-à-vis de la présence de la martensite dans le cas de l'invention est due au fait que le revenu à relativement haute température obligatoire, qui suit le refroidissement de la pièce, rend cette présence de martensite moins dommageable, par exemple pour un usinage qui conclurait la mise en oeuvre de la pièce.

[0120] D'autre part, WO-A-2011/124851 accepte que l'on procède à un léger revenu final à 200-350°C pendant 30 min à 4 h, qui n'est qu'optionnel. En revanche, l'invention exige absolument l'exécution d'un revenu final, et à des températures toujours nettement plus hautes, et, parfois, pendant une durée plus élevée : 450-680°C pendant 15 min à 10 h, dans le but précis d'obtenir un durcissement secondaire par précipitation conférant à la pièce notamment des caractéristiques aptes à la rendre sécable.

[0121] Un léger revenu comme celui de WO-A-2011/124851 a pour but d'améliorer la limite d'élasticité $R_{p0,2}$, en la portant à environ 900-950 MPa. Mais il est insuffisant pour obtenir un durcissement secondaire par précipitation qui permet d'obtenir de façon fiable une $R_{p0,2}$ supérieure à 1000 MPa.

[0122] Surtout, le léger revenu de WO-A-2011/124851 permet d'améliorer la résistance à la flexion par choc (résilience). Or, cet objectif est contradictoire avec celui de l'invention puisqu'une résilience élevée rend la pièce non sécable. Le revenu de durcissement pratiqué dans l'invention de façon obligatoire va de pair avec une faible résistance à la flexion par choc. Une telle basse résistance à la flexion par choc n'est, en général, pas souhaitée sur une pièce mécanique, mais elle l'est dans le cas des pièces mécaniques sécables qui sont particulièrement visées par l'invention.

[0123] On va maintenant présenter des résultats obtenus en laboratoire sur des compositions d'acier selon l'invention (Inv.1 à 4), des compositions proches de celles-ci mais non totalement conformes à l'invention (Ref.1, 2 et 3), et des compositions de deux aciers de nuances connues pour la fabrication de bielles.

[0124] L'ensemble des compositions retenues est présenté ci-dessous dans le tableau 2, qui inclut les calculs des valeurs de Bs et V'. Il doit être entendu que le complément à 100% des compositions citées est du Fe, les éléments non mentionnés dans ce tableau n'étant présents que sous forme de traces y compris ceux pouvant n'être qu'optionnellement présents dans l'invention, comme les éléments d'usabilité Ca, Te, Se, Bi, Pb qui n'ont pas été ajoutés dans les exemples considérés. Les valeurs en gras sont celles qui sont non conformes à l'invention.

EP 3 378 957 A1

	C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Cu %	Mo %	V %	Nb %	Al %	B %	Ti %	S %	P %	N %	O %
36MnV4S	0,36	0,50	1,00	0,12	0,10	0,10	0,04	0,32	0,005	0,001	0,0004	0,001	0,079	0,007	0,0180	0,0027
C70S6	0,69	0,16	0,59	0,12	0,09	0,12	0,03	0,004	0,001	0,006	0,0004	0,001	0,059	0,013	0,0080	0,0012
Inv.1	0,32	0,78	1,17	1,10	0,16	0,65	0,11	0,19	0,003	0,013	0,0031	0,029	0,069	0,01	0,0075	0,0009
Inv.2	0,30	0,15	1,08	0,87	0,10	0,16	0,06	0,46	0,005	0,017	0,0031	0,025	0,054	0,012	0,0056	0,0027
Inv.3	0,35	0,15	1,37	0,76	0,10	0,16	0,06	0,35	0,002	0,018	0,0033	0,025	0,0056	0,012	0,0053	0,0021
Inv.4	0,16	0,16	1,40	0,79	0,15	0,29	0,10	0,70	0,000	0,014	0,0029	0,028	0,026	0,011	0,0075	0,0017
Ref.1	0,30	0,70	1,17	0,51	0,15	0,15	0,10	0,20	0,002	0,025	0,0003	0,002	0,08	0,025	0,0120	0,0015
Ref.2	0,37	0,38	1,33	0,73	0,15	0,15	0,08	0,12	0,003	0,012	0,0003	0,002	0,051	0,012	0,0136	0,0011
Ref.3	0,31	0,70	1,20	0,51	0,15	0,15	0,10	0,19	0,003	0,020	0,0004	0,002	0,08	0,03	0,0120	0,0015

	V' %	Bs _{lim} °C	Bs °C
36MnV4S	0,34	584	590
C70S6	0,03	530	570
Inv.1	0,33	578	495
Inv.2	0,50	600	528
Inv.3	0,39	598	507
Inv.4	0,82	600	501
Ref.1	0,23	530	567
Ref.2	0,16	530	529
Ref.3	0,23	547	562

Tableau 2 : Compositions des échantillons testés, avec leurs valeurs calculées pour V', Bs_{lim}, et Bs

[0125] On rappelle que l'invention exige $Bs \leq Bs_{lim}$ et $V' \geq 0,18$.

[0126] Comme on le voit, les compositions des différents exemples sont relativement proches, et les teneurs des différents éléments, prises individuellement, seraient, pour tous les exemples (sauf le V du C70S6), conformes aux exigences de l'invention. C'est sur le respect ou non d'au moins l'une des deux conditions sur Bs et V' que les exemples non conformes à l'invention et les exemples selon l'invention se distinguent essentiellement, ce qui montre l'importance du respect simultané de ces deux conditions.

[0127] Les résultats détaillés par la suite ont été obtenus en utilisant des lopins de section 25 x 25 mm, auxquels on a appliqué un traitement thermique tel que leur état était similaire, voire identique, à celui attendu sur une bielle forgée de masse et dimensions typiques d'une bielle d'automobile: austénitisation à au moins 1050 °C, suivie d'un refroidissement à l'air calme conduisant à des vitesses de refroidissement de, typiquement, 1°C/s entre 800 et 550 °C et 0,35°C/s entre 550 et 300 °C. On a ensuite déterminé les conditions de revenu optimales pour augmenter les caractéristiques mécaniques et appliqué le traitement optimisé pour chaque nuance, consistant en un maintien de 2 h à une température de 620 ± 10 °C. Enfin, on a procédé à des examens métallographiques et à des essais mécaniques dans le but d'évaluer le gain en performance attendu grâce à l'invention. Les résultats sont présentés dans le tableau 3, dans lequel B désigne une microstructure bainitique, M la martensite qui est éventuellement présente conjointement à la bainite, et F + P une microstructure ferrito-perlitique.

Tableau 3 : Microstructures et propriétés mécaniques des échantillons testés

	Microstructure	Etat	Rp _{0,2} MPa	Rm MPa	KV J
36MnV4S	F+P	Forgé	780	1057	9

(suite)

	Microstructure	Etat	Rp _{0,2} MPa	Rm MPa	KV J
C70S6	P	Forgé	590	990	7
Inv.1	B (20% M)	Forgé+Revenu	1000	1174	4
Inv.2	B	Forgé+Revenu	1043	1156	4
Inv.3	B (10% M)	Forgé+Revenu	965	1101	5
Inv.4	B	Forgé+Revenu	1075	1169	3
Ref.1	B	Forgé+Revenu	868	1018	14
Ref.2	B	Forgé+Revenu	860	1000	14
Ref.3	B + 15% F	Forgé+Revenu	870	1025	19

[0128] Les valeurs en gras concernent les résultats considérés comme non conformes à la présente invention. Ces résultats non conformes concernent en premier lieu les nuances standard 36MnV4S et C70S6, de type ferrito-perlitique ou perlitique, dont on a déjà souligné les limitations en termes de limite d'élasticité et d'absence de réponse significative à un revenu. Notons que pour le 36MnV4S, la précipitation du V a lieu pendant le développement de la microstructure, lors du refroidissement de la pièce après mise en forme à chaud. Elle confère donc des propriétés mécaniques intéressantes à cette nuance, de même qu'une faible résistance à la rupture par choc (≤ 10 J), ce qui explique le succès de cette nuance, et d'autres qui lui sont semblables, pour la fabrication de bielles sécables à hautes performances. Ainsi, si ces nuances standard ne peuvent atteindre la limite d'élasticité élevée des nuances de l'invention, leur résistance aux chocs telle que mesurée par la grandeur KV demeure néanmoins conforme à ce qui peut être requis pour la fabrication de bielles sécables.

[0129] D'autres nuances non conformes à l'invention (Ref.1, 2 et 3) éclairent davantage cette dernière. Notons que Ref.1 et 2 présentent des microstructures bainitiques homogènes à l'état forgé, ce qui est déjà en rupture complète avec les pratiques habituelles pour la fabrication des bielles.

[0130] L'exemple Ref.1 présente une valeur de Bs insuffisamment basse ($B_s = 567^\circ\text{C}$, alors que, selon l'invention, la limite $B_{s\text{lim}}$ telle que définie précédemment à ne pas dépasser serait de 530°C) avec toutefois une valeur de V' qui serait conforme à l'invention (0,23%, pour 0,18% au minimum dans l'invention). On note qu'en conséquence, la limite d'élasticité ne répond pas aux exigences de l'invention, qui vise à procurer un minimum de 900 MPa. Dans ce premier cas, ce sont des propriétés en traction trop basses à l'état forgé qui expliquent cette insuffisance, l'augmentation de ces propriétés en traction au cours du revenu, corrélée à V', n'étant pas inférieure à celle de plusieurs des exemples selon l'invention.

[0131] L'exemple Ref.2 présente une valeur de Bs conforme à l'invention ($B_s = 529^\circ\text{C}$ pour un maximum $B_{s\text{lim}}$ de 530), mais il a un potentiel de durcissement, tel que mesuré par V', qui est insuffisant ($V' = 0,16\%$, donc non conforme à l'invention).

[0132] L'exemple Ref.3 présente une Bs trop élevée, supérieure à $B_{s\text{lim}}$ et une microstructure qui contient 15% de ferrite proeutectoïde, donc plus que les 10% maximum de ferrite proeutectoïde + perlite tolérés par l'invention. En conséquence $R_{p0,2}$ et KV ne sont pas satisfaisantes. Il s'avère, dans son cas, que le vanadium, bien que présent en quantité, en principe, suffisante, a en partie précipité lors du refroidissement de la pièce, de sorte qu'il n'a pu jouer son rôle durcissant au cours du revenu, comme il n'y en avait plus suffisamment en solution au début du revenu. De manière générale, une structure bainitique ou martensitique permet d'obtenir un durcissement secondaire lors du revenu selon l'invention, ce que ne permet pas une microstructure ferritique ou perlitique, d'où la stricte limitation à 10% au plus de la teneur totale en ferrite pro-eutectoïde et perlite à l'issue du refroidissement de la pièce.

[0133] Pour l'ensemble des exemples selon l'invention, la microstructure bainitique forgée et revenue est soit de même nature très essentiellement bainitique que celle des exemples Ref.1 et Ref.2, soit contient 10 ou 20% de martensite conjointement à la bainite. Mais le respect des deux critères Bs et V' permet d'atteindre les caractéristiques mécaniques visées par l'invention qui sont une $R_{p0,2}$ d'au moins 900 MPa et, simultanément, une résistance à la traction Rm d'au moins 1100 MPa, et présentent des résistances à la flexion au choc KV conformes aux exigences d'une utilisation pour la fabrication de pièces sécables, à savoir au plus 12 J. Notons, de plus, qu'on a pu démontrer, par des essais de fatigue et de tassement en laboratoire, que cette augmentation de la résistance en traction se traduisait par une augmentation très significative des performances en fatigue et de la résistance au tassement. Les nuances bainitiques selon l'invention permettent de satisfaire les critères de dimensionnement des bielles déjà évoqués, ce que ne permettaient pas les nuances bainitiques considérées dans l'art antérieur.

[0134] Un second avantage de l'invention peut être souligné par les résultats, figurant dans le tableau 4, d'un essai supplémentaire réalisé sur l'exemple Inv.4. Pour cet essai, on a réalisé sur une barre de diamètre 80 mm un traitement

thermique tel que la microstructure après refroidissement naturel pouvait être considérée comme représentative de celle d'une pièce forgée à chaud. A la suite de ce traitement, on a réalisé le traitement de revenu optimisé tel que déjà mis au point sur les pièces de section 25 x 25 mm². On a ensuite procédé à des examens métallographiques et à des essais mécaniques de la même manière que précédemment.

Tableau 4 : Résultats d'essais supplémentaires sur l'exemple Inv.4

Section	Etat	Microstructure	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)
25 x 25 mm	Forgé + revenu	B	1075	1169
diamètre 80mm	Forgé + revenu	B	1071	1175

[0135] Comme le montrent ces résultats, un second avantage majeur de l'invention est de procurer les caractéristiques mécaniques visées sur des pièces de dimensions très différentes, alors que la sensibilité des nuances ferrito-perlitiques à ce paramètre est bien connue et a déjà été soulignée. On voit donc que la nuance de la présente invention pourra être utilisée, sans modification significative du procédé de fabrication ou de la composition précise de l'acier, pour la fabrication de pièces sécables destinées à des automobiles, mais aussi à des poids lourds, ou de pièces relevant de la grosse mécanique (transformateurs, moteurs marins, etc.).

[0136] Si cela apparaît utile, pour une pièce de dimensions données, on pourra optimiser la microstructure de la pièce, notamment en annulant ou en diminuant drastiquement sa teneur en ferrite proeutectoïde + perlite, par un ajustement précis de la composition de l'acier, en particulier sur les éléments dont on a dit qu'ils jouaient sur la teneur en ferrite, comme C, Mo et B, ou sur la valeur de Bs, comme C, Mn, Cr, Mo, Ni, Cu et V, et/ou par un ajustement des conditions de refroidissement après la mise en forme à chaud, tout en demeurant dans le cadre des teneurs et valeurs selon l'invention. Ce sera en particulier le cas pour des pièces de grandes dimensions ou de formes tourmentées, dans le but de mieux assurer que la microstructure et les propriétés mécaniques finales recherchées seront bien obtenues sur l'ensemble de la pièce.

Revendications

1. Acier pour pièce sécable mise en forme à chaud, **caractérisé en ce que** sa composition consiste en, exprimée en pourcentages pondéraux :

- $0,15\% \leq C \leq 0,40\%$; de préférence $0,20\% \leq C \leq 0,35\%$;
- $0,60\% \leq Mn \leq 1,80\%$; de préférence $0,80\% \leq Mn \leq 1,60\%$;
- Traces $\leq Cr \leq 1,60\%$;
- Traces $\leq Mo \leq 0,40\%$;
- Traces $\leq Ni \leq 1,50\%$; de préférence traces $\leq Ni \leq 1,0\%$; mieux traces $\leq Ni \leq 0,60\%$;
- Traces $\leq Cu \leq 0,80\%$;
- $0,02\% \leq V \leq 0,70\%$;
- Traces $\leq Nb \leq 0,08\%$;
- Traces $\leq Si \leq 1,20\%$; de préférence traces $\leq Si \leq 0,60\%$;
- Traces $\leq Al \leq 0,10\%$;
- Traces $\leq B \leq 0,010\%$;
- Traces $\leq Ti \leq 0,10\%$;
- Traces $\leq S \leq 0,15\%$; de préférence $0,005\% \leq S \leq 0,15\%$;
- Traces $\leq P \leq 0,10\%$;
- Traces $\leq Ca \leq 0,010\%$;
- Traces $\leq Te \leq 0,030\%$;
- Traces $\leq Se \leq 0,050\%$;
- Traces $\leq Bi \leq 0,10\%$;
- Traces $\leq Pb \leq 0,20\%$;
- Traces $\leq N \leq 0,025\%$;
- Traces $\leq O \leq 0,008\%$;

le reste étant du fer et des impuretés liées à l'élaboration ; et pour laquelle les relations suivantes sont vérifiées :

$$* V' = V\% + 2 Nb\% + Cu\%/5 \geq 0,18\% ;$$

EP 3 378 957 A1

* $B_s = 830 - 270C\% - 90Mn\% - 37Ni\% - 70Cr\% - 83Mo\% - 50Cu\% - 100V\% \leq B_{s_{lim}}$, avec $B_{s_{lim}}$ calculé comme suit :

$$B_{s_{lim}} = 530 + 330 (V' - 0,18), \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est inférieur à } 600 ;$$

$$B_{s_{lim}} = 600, \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est supérieur ou égal à } 600 ;$$

et **en ce que** sa microstructure comporte au moins 60% d'un mélange de ferrite bainitique et de carbures ou d'austénite résiduelle, le reste de la microstructure comportant au plus 40% de martensite et/ou de ferrite pro-eutectoïde et/ou de perlite, la présence de ferrite pro-eutectoïde et/ou de perlite étant limitée à au plus 10%.

2. Acier selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** $Ti \geq 3,5 \text{ N\%}$ si $B \geq 0,0010\%$.

3. Acier selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** $traces \leq N \leq 0,010\%$.

4. Procédé de fabrication d'une pièce mécanique, **caractérisé en ce que** :

- on met en forme à chaud en phase austénitique un demi-produit en acier dont la composition consiste en, exprimée en pourcentages pondéraux :

- * $0,15\% \leq C \leq 0,40\%$; de préférence $0,20\% \leq C \leq 0,35\%$;
- * $0,60\% \leq Mn \leq 1,80\%$; de préférence $0,80\% \leq Mn \leq 1,60\%$;
- * $Traces \leq Cr \leq 1,60\%$;
- * $Traces \leq Mo \leq 0,40\%$;
- * $Traces \leq Ni \leq 1,50\%$; de préférence $traces \leq Ni \leq 1,0\%$; mieux $traces \leq Ni \leq 0,60\%$;
- * $Traces \leq Cu \leq 0,80\%$;
- * $0,02\% \leq V \leq 0,70\%$;
- * $Traces \leq Nb \leq 0,08\%$;
- * $Traces \leq Si \leq 1,20\%$; de préférence $traces \leq Si \leq 0,60\%$;
- * $Traces \leq Al \leq 0,10\%$;
- * $Traces \leq B \leq 0,010\%$;
- * $Traces \leq Ti \leq 0,10\%$;
- * $Traces \leq S \leq 0,15\%$; de préférence $0,005\% \leq S \leq 0,15\%$;
- * $Traces \leq P \leq 0,10\%$;
- * $Traces \leq Ca \leq 0,010\%$;
- * $Traces \leq Te \leq 0,030\%$;
- * $Traces \leq Se \leq 0,050\%$;
- * $Traces \leq Bi \leq 0,10\%$;
- * $Traces \leq Pb \leq 0,20\%$;
- * $Traces \leq N \leq 0,025\%$;
- * $Traces \leq O \leq 0,008\%$;

le reste étant du fer et des impuretés liées à l'élaboration ; et pour laquelle les relations suivantes sont vérifiées :

- * $V' = V\% + 2 Nb\% + Cu\%/5 \geq 0,18\%$;
- * $B_s = 830 - 270C\% - 90Mn\% - 37Ni\% - 70Cr\% - 83Mo\% - 50Cu\% - 100V\% \leq B_{s_{lim}}$, avec $B_{s_{lim}}$ calculé comme suit :

$$B_{s_{lim}} = 530 + 330 (V' - 0,18), \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est inférieur à } 600 ;$$

$$B_{s_{lim}} = 600, \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est supérieur ou égal à } 600 ;$$

- on réalise un refroidissement à l'air calme, ou à l'air pulsé, ou sous un capot ou en caisse dudit demi-produit, de préférence à des vitesses de refroidissement supérieures ou égales à $0,3^\circ\text{C/s}$ dans l'intervalle $750-550^\circ\text{C}$

EP 3 378 957 A1

et comprises entre 0,1 et 5°C/s dans l'intervalle 550-300 °C ;

- on réalise au moins un revenu dudit demi-produit refroidi à une température Trev comprise entre 450 et 680°C pendant une durée totale de 15 min à 10 h.

- 5 5. Procédé selon la revendication 4, **caractérisé en ce que** $Ti \geq 3,5 \text{ N\%}$ si $B \geq 0,0010\%$.
6. Procédé selon la revendication 5, **caractérisé en ce que** $\text{traces} \leq N \leq 0,010\%$.
- 10 7. Procédé selon l'une des revendications 4 à 6, **caractérisé en ce qu'on** réalise après le refroidissement suivant la mise en forme à chaud une mise en forme du demi-produit, par exemple par usinage ou conformage, qui rapproche les dimensions du demi-produit des dimensions définitives précises du produit sans modifier sa microstructure.
- 15 8. Procédé selon l'une des revendications 4 à 7, **caractérisé en ce qu'on** réalise après le revenu une mise en forme du demi-produit, par exemple par usinage ou conformage, qui confère au demi-produit les dimensions définitives précises du produit sans modifier sa microstructure.
9. Procédé selon l'une des revendications 4 à 8, **caractérisé en ce qu'on** procède à une casse contrôlée de ladite pièce mécanique, qui est une pièce mécanique sécable.
- 20 10. Procédé selon l'une des revendications 4 à 9, **caractérisé en ce qu'on** procède à au moins un traitement thermique supplémentaire ultérieurement audit revenu, ledit traitement supplémentaire ayant un paramètre de revenu inférieur à celui dudit revenu.

11. Pièce mécanique en acier, **caractérisée en ce que** :

- sa composition consiste en, exprimée en pourcentages pondéraux :

- * $0,15\% \leq C \leq 0,40\%$; de préférence $0,20\% \leq C \leq 0,35\%$;
- * $0,60\% \leq Mn \leq 1,80\%$; de préférence $0,80\% \leq Mn \leq 1,60\%$;
- * $\text{Traces} \leq Cr \leq 1,60\%$;
- * $\text{Traces} \leq Mo \leq 0,40\%$;
- * $\text{Traces} \leq Ni \leq 1,50\%$; de préférence $\text{traces} \leq Ni \leq 1,0\%$; mieux $\text{traces} \leq Ni \leq 0,60\%$;
- * $\text{Traces} \leq Cu \leq 0,80\%$;
- * $0,02\% \leq V \leq 0,70\%$;
- * $\text{Traces} \leq Nb \leq 0,08\%$;
- * $\text{Traces} \leq Si \leq 1,20\%$; de préférence $\text{traces} \leq Si \leq 0,60\%$;
- * $\text{Traces} \leq Al \leq 0,10\%$;
- * $\text{Traces} \leq B \leq 0,010\%$;
- * $\text{Traces} \leq Ti \leq 0,10\%$;
- * $\text{Traces} \leq S \leq 0,15\%$; de préférence $0,005\% \leq S \leq 0,15\%$;
- * $\text{Traces} \leq P \leq 0,10\%$;
- * $\text{Traces} \leq Ca \leq 0,010\%$;
- * $\text{Traces} \leq Te \leq 0,030\%$;
- * $\text{Traces} \leq Se \leq 0,050\%$;
- * $\text{Traces} \leq Bi \leq 0,10\%$;
- * $\text{Traces} \leq Pb \leq 0,20\%$;
- * $\text{Traces} \leq N \leq 0,025\%$;
- * $\text{Traces} \leq O \leq 0,008\%$;

le reste étant du fer et des impuretés liées à l'élaboration ; et pour laquelle les relations suivantes sont vérifiées :

- * $V' = V\% + 2 \text{ Nb}\% + \text{Cu}\%/5 \geq 0,18\%$;
- * $Bs = 830 - 270C\% - 90Mn\% - 37Ni\% - 70Cr\% - 83 \text{ Mo}\% - 50Cu\% - 100V\% \leq Bs_{lim}$, avec Bs_{lim} calculé comme suit :

$$Bs_{lim} = 530 + 330 (V' - 0,18), \text{ si } 530 + 330 (V' - 0,18) \text{ est inférieur à } 600 ;$$

EP 3 378 957 A1

$B_{s_{lim}} = 600$, si $530 + 330 (V' - 0,18)$ est supérieur ou égal à 600 ;

5

et dont la microstructure comporte au moins 60% d'un mélange de ferrite bainitique et de carbures ou d'austénite résiduelle, le reste de la microstructure comportant au plus 40% de martensite et/ou de ferrite pro-eutectoïde et/ou de perlite, la présence de ferrite pro-eutectoïde et/ou de perlite étant limitée à au plus 10%.

10

12. Pièce mécanique selon la revendication 11, **caractérisée en ce que** $Ti \geq 3,5 \text{ N\%}$ si $B \geq 0,0010\%$.

13. Pièce mécanique selon la revendication 12, **caractérisée en ce que** $\text{traces} \leq N \leq 0,010\%$.

14. Pièce mécanique selon l'une des revendications 11 à 13, **caractérisée en ce qu'il s'agit** d'une pièce sécable.

15

15. Pièce mécanique selon la revendication 14, **caractérisée en ce qu'il s'agit** d'une bielle de moteur à explosion.

20

25

30

35

40

45

50

55



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 18 16 3690

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	WO 2011/124851 A2 (ASCOMETAL SA [FR]; SOURMAIL THOMAS [FR]) 13 octobre 2011 (2011-10-13) * revendications 1-14; tableaux 1, ex. F, 2 *	1-15	INV. C21D6/00 C21D8/00 C21D9/00 C21D1/18 C21D1/19 C21D1/20 C22C38/02 C22C38/04 C22C38/18 C22C38/44 C22C38/46 C22C38/50 C22C38/54 C22C38/58 C22C38/60
A	EP 0 856 590 A2 (DAIDO STEEL CO LTD [JP]) 5 août 1998 (1998-08-05) * revendications 1-3; tableaux 1-5 *	1-15	
A	EP 0 779 375 A1 (ASCOMETAL SA [FR]; USINOR SACILOR [FR]) 18 juin 1997 (1997-06-18) * revendications 1-12; exemples 1-3 *	1-15	
A	EP 1 426 453 A1 (ASCOMETAL SA [FR]) 9 juin 2004 (2004-06-09) * revendications 1-17 *	1-15	
A	FR 2 847 908 A1 (ASCOMETAL SA [FR]) 4 juin 2004 (2004-06-04) * revendications 1-18; exemples 1-4 *	1-15	
A	EP 1 070 153 B1 (CORUS UK LTD [GB]; UNITED ENG FORGINGS LTD [GB]) 17 décembre 2003 (2003-12-17) * revendications 1-24; tableaux 1-6 *	1-15	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) C21D C22C
A	EP 2 957 643 A1 (ASCO IND [FR]) 23 décembre 2015 (2015-12-23) * revendications 1-18 *	1-15	
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche La Haye		Date d'achèvement de la recherche 20 avril 2018	Examineur Chebeleu, Alice
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 18 16 3690

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.

20-04-2018

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2011124851 A2	13-10-2011	CN 102985569 A	20-03-2013
		EP 2556175 A2	13-02-2013
		FR 2958660 A1	14-10-2011
		JP 2013533919 A	29-08-2013
		US 2013037182 A1	14-02-2013
		WO 2011124851 A2	13-10-2011
EP 0856590 A2	05-08-1998	DE 69813920 D1	05-06-2003
		DE 69813920 T2	26-02-2004
		EP 0856590 A2	05-08-1998
EP 0779375 A1	18-06-1997	AR 004375 A1	04-11-1998
		AT 193733 T	15-06-2000
		BR 9606002 A	01-09-1998
		CA 2192509 A1	15-06-1997
		CN 1158908 A	10-09-1997
		DE 69608773 D1	13-07-2000
		DE 69608773 T2	01-02-2001
		DK 0779375 T3	16-10-2000
		EP 0779375 A1	18-06-1997
		ES 2148705 T3	16-10-2000
		FR 2742448 A1	20-06-1997
		GR 3034003 T3	30-11-2000
		JP H09176796 A	08-07-1997
		NO 965318 A	16-06-1997
		PL 317455 A1	23-06-1997
		PT 779375 E	31-10-2000
		US 5769970 A	23-06-1998
EP 1426453 A1	09-06-2004	AT 437968 T	15-08-2009
		CA 2452629 A1	03-06-2004
		CN 1511673 A	14-07-2004
		EP 1426453 A1	09-06-2004
		ES 2330209 T3	07-12-2009
		FR 2847910 A1	04-06-2004
		JP 2004183101 A	02-07-2004
		MX PA03011104 A	07-12-2004
		PL 363855 A1	14-06-2004
FR 2847908 A1	04-06-2004	US 2004149359 A1	05-08-2004
		AT 441730 T	15-09-2009
		CA 2452647 A1	03-06-2004
		CN 1519386 A	11-08-2004
		EP 1426452 A1	09-06-2004
		ES 2331949 T3	21-01-2010
		FR 2847908 A1	04-06-2004

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

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

EP 18 16 3690

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.

20-04-2018

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication	
		JP 4316361 B2	19-08-2009	
		JP 2004190138 A	08-07-2004	
		MX PA03010998 A	10-09-2004	
		PL 363854 A1	14-06-2004	
		US 2004108020 A1	10-06-2004	

EP 1070153	B1	17-12-2003	AT 256760 T	15-01-2004
			AU 7538798 A	27-09-1999
			CA 2323216 A1	16-09-1999
			DE 69820680 D1	29-01-2004
			EP 1070153 A1	24-01-2001
			GB 2335200 A	15-09-1999
			JP 2002506127 A	26-02-2002
			KR 20010041823 A	25-05-2001
			US 6299833 B1	09-10-2001
			WO 9946420 A1	16-09-1999

EP 2957643	A1	23-12-2015	BR 102015013910 A2	02-08-2016
			CA 2893355 A1	16-12-2015
			CN 105296891 A	03-02-2016
			EP 2957643 A1	23-12-2015
			FR 3022259 A1	18-12-2015
			JP 2016003395 A	12-01-2016
			KR 20150144296 A	24-12-2015
			RU 2015122868 A	10-01-2017
			US 2017044635 A1	16-02-2017

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

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- EP 0779375 B1 [0004]
- EP 1051531 B1 [0004] [0016]
- EP 0856590 B2 [0005]
- EP 1070153 B1 [0005]
- EP 1243665 A1 [0005]
- US 2006000088 A [0005]
- JP 2002356743 A [0005]
- EP 0787812 B1 [0037]
- WO 2011124851 A [0117] [0118] [0120] [0121] [0122]

Littérature non-brevet citée dans la description

- S. ENGINEER ; H. JUSTINGER ; P. JANSSEN ; M. HÄRTEL ; C. HAMPEL ; F. RANDELHOFF. *Int Conf Steel in Cars and Trucks*, 2011 [0037]
- H. ROELOFS ; S. HASLER ; M. LEMBKE ; F.G. CABBALLERO. *Int Conf Steel in Cars and Trucks*, 2011 [0037]